



SCHLUSSBERICHT – 16.12.2024

Externe Effekte des Verkehrs 2021

Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekte
des Strassen-, Schienen-, Luft- und
Schiffsverkehrs

Im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung

Impressum

Empfohlene Zitierweise

Autor: Ecoplan / INFRAS
Titel: Externe Effekte des Verkehrs 2021
Untertitel: Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekte des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs
Auftraggeber: Bundesamt für Raumentwicklung
Ort: Bern
Datum: 16.12.2024

Projektteam

Christoph Lieb, Projektleitung ab August 2023 (ECOPLAN)
Heini Sommer, Projektleitung bis August 2023 (ECOPLAN)
Matthias Amacher (ECOPLAN)
Martin Wagenbach (ECOPLAN)
Anne Greinus, Stv. Projektleitung (INFRAS)
Ursina Walther (INFRAS)
Maleika Wörner (INFRAS)
Quirin Oberpriller (INFRAS)
Bettina Schächli (INFRAS)
Anna Ehrler (INFRAS)
Alberto Castro (Swiss TPH)
Martin Rösli (Swiss TPH)
Thomas Götschi (Transportation and Health Consultancy)
Thomas Künzle (Meteotest)

Der Bericht gibt die Auffassung des Projektteams wieder, die nicht notwendigerweise mit derjenigen des Auftraggebers bzw. der Auftraggeberin oder der Begleitorgane übereinstimmen muss.

ECOPLAN AG

Forschung und Beratung
in Wirtschaft und Politik

www.ecoplan.ch

Monbijoustrasse 14
CH - 3011 Bern
Tel +41 31 356 61 61
bern@ecoplan.ch

Dätwylerstrasse 25
CH - 6460 Altdorf
Tel +41 41 870 90 60
altdorf@ecoplan.ch

INFRAS

Forschung und Beratung

www.infras.ch

Binzstrasse 23
CH – 8045 Zürich
Tel. +41 44 205 95 95
info@infras.ch

Begleitgruppe

Joséphine Leuba, Projektleitung (Bundesamt für Raumentwicklung ARE)
Nicole Mathys, Stv. Projektleitung (Bundesamt für Raumentwicklung ARE)
Matthias Balmer, bis April 2023 (Bundesamt für Raumentwicklung ARE)
Franziska Borer Blindenbacher (Bundesamt für Raumentwicklung ARE)
Martin Tschopp (Bundesamt für Raumentwicklung ARE)
Manfred Zbinden (Bundesamt für Strassen ASTRA)
Jan-Aaron Klaassen (Bundesamt für Umwelt BAFU)
Markus Liechti (Bundesamt für Verkehr BAV)
Alice Suri (Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL)
Theo Rindlisbacher (Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL)
Sebastian Dickenmann (Bundesamt für Energie BFE)
Alexandra Quandt (Bundesamt für Statistik BFS)
Damien Cataldi, bis Januar 2024 (Kanton Genf)
Nicolas Borzykowski, ab Januar 2024 (Kanton Genf)
Arnim Wagner (Kanton Zürich)

Thematische punktuelle Unterstützung

Iris Oberauer (Bundesamt für Strassen ASTRA)
Lara Lüthi (Bundesamt für Umwelt BAFU)
Roger Ramer (Bundesamt für Umwelt BAFU)
Yoann Carnal (Bundesamt für Verkehr BAV)
Anne-Kathrin Faust (Bundesamt für Energie BFE)

Expertengruppe

Arno Schroten (CE Delft)
Heike Link (Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung DIW)
Claus Doll (Fraunhofer ISI)
Georges Fuchs (STRATEC)
Björn Bünger (Umweltbundesamt UBA)

Der Bericht gibt die Auffassung des Projektteams wieder, die nicht notwendigerweise mit derjenigen des Auftraggebers bzw. der Auftraggeberin oder der Begleitorgane übereinstimmen muss.

ECOPLAN AG

Forschung und Beratung
in Wirtschaft und Politik

www.ecoplan.ch

Monbijoustrasse 14
CH - 3011 Bern
Tel +41 31 356 61 61
bern@ecoplan.ch

Dätwylerstrasse 25
CH - 6460 Altdorf
Tel +41 41 870 90 60
altdorf@ecoplan.ch

INFRAS

Forschung und Beratung

www.infras.ch

Binzstrasse 23
CH – 8045 Zürich
Tel. +41 44 205 95 95
info@infras.ch

Inhaltsübersicht

	Inhaltsverzeichnis	3
	Kurzfassung.....	12
	Résumé	30
1	Einleitung	48
2	Abgrenzungen	51
3	Methodik.....	71
4	Gesundheitskosten der Luftverschmutzung	92
5	Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung.....	137
6	Ernteaufälle durch Luftverschmutzung	156
7	Waldschäden durch Luftverschmutzung	173
8	Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung	194
9	Lärm.....	209
10	Klima.....	213
11	Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse	243
12	Natur und Landschaft	261
13	Bodenschäden durch toxische Stoffe	286
14	Unfälle	299
15	Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr.....	363
16	Exkurs: Überlastungskosten	398
17	Exkurs: Zusatzkosten in städtischen Räumen	400
18	Exkurs: Ungedekte marginale Infrastrukturkosten	402
19	Übersicht über die Ergebnisse	405

20	Anhang A: Gemeinsame Datengrundlagen	457
21	Anhang B: Detaillierte Betrachtungen zur Kalibrierung der Baseline Aktivität (SGB) für die Verknüpfung mit den Mobilitätsdaten (MZMV)	493
22	Literaturverzeichnis	497

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Kurzfassung.....	12
Résumé	30
1 Einleitung	48
1.1 Ausgangslage.....	48
1.2 Zielsetzung	48
1.3 Hinweis zu Corona	49
1.4 Aufbau des Berichtes	49
1.5 Dank	50
2 Abgrenzungen	51
2.1 Überblick	51
2.2 Kosten- und Nutzenbereiche.....	52
2.3 Verkehrsträger, Verkehrsmittel und Antriebsarten.....	56
2.3.1 Verkehrsträger.....	56
2.3.2 Verkehrsmittel	57
2.3.3 Antriebsarten	60
2.4 Raum.....	63
2.4.1 Territorialitätsprinzip und Halbstreckenprinzip	63
2.4.2 Übersicht räumliche Differenzierungen	66
2.4.3 Differenzierung nach Raumtyp.....	67
3 Methodik.....	71
3.1 Soziale, private und externe Kosten	71
3.1.1 Begrifflichkeiten	71
3.1.2 Die zwei Sichtweisen der externen Kosten.....	76
3.2 Generelles Konzept zur Ermittlung der externen Kosten.....	79
3.2.1 Grundkonzept.....	79
3.2.2 Umgang mit Internalisierungsbeiträgen	82
3.3 Umgang mit Unsicherheiten	85
3.3.1 Einleitung.....	85
3.3.2 Vorgehenskonzept zum Ausweis der Unsicherheiten pro Kostenbereich	87
3.4 Durchschnittskosten, Grenzkosten und Wohlfahrtsverluste	88
3.4.1 Übersicht über den Kostenausweis	88
3.4.2 Durchschnitts- und Grenzkosten.....	89
3.4.3 Kurzfristige versus langfristige Kosten	90
3.4.4 Wohlfahrtsverluste	91

4	Gesundheitskosten der Luftverschmutzung	92
4.1	Berechnungsgegenstand	92
4.2	Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen	92
4.2.1	Verkehrsbedingte Schadstoffbelastung der Bevölkerung	92
4.2.2	Epidemiologie	93
4.2.3	Wertgerüst	94
4.2.4	Verwendete Berechnungsmethodik	95
4.3	Mengengerüst	97
4.3.1	Verkehrsbedingte Schadstoffbelastung der Bevölkerung	97
4.3.2	Luftverschmutzungsbedingte Krankheits- und Todesfälle	103
4.4	Wertgerüst	115
4.4.1	Verwendete Kostensätze	115
4.4.2	Internalisierungsbeiträge	116
4.5	Vorgehen bei Differenzierungen	116
4.5.1	Differenzierung nach Antriebsart	116
4.5.2	Differenzierung nach Raumtypen	116
4.5.3	Differenzierung nach Kantonen	117
4.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	117
4.7	Ergebnisse	118
4.7.1	Externe Kosten	118
4.7.2	Soziale Kosten	127
4.8	Sensitivitätsanalyse	129
4.8.1	Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten	129
4.8.2	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	130
4.8.3	Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen	132
4.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	133
5	Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung	137
5.1	Berechnungsgegenstand	137
5.2	Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen	137
5.3	Mengengerüst	140
5.3.1	PM ₁₀ -Immissionen	140
5.3.2	Fassadenflächen	141
5.4	Wertgerüst	142
5.4.1	Renovationskosten	142
5.4.2	Kosten durch verkürzte Lebensdauer (Gebäudehülle)	142
5.4.3	Reinigungskosten	143
5.5	Vorgehen bei Differenzierungen	143
5.5.1	Differenzierung nach Antriebsart	143
5.5.2	Differenzierung nach Raumtypen	143
5.5.3	Differenzierung nach Kantonen	144
5.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	144
5.7	Ergebnisse	145

5.7.1	Externe Kosten.....	145
5.8	Sensitivitätsanalyse.....	152
5.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	152
6	Ernteauffälle durch Luftverschmutzung	156
6.1	Berechnungsgegenstand	156
6.2	Bewertungsmethodik.....	156
6.3	Mengengerüst	159
6.3.1	Ozonimmissionen.....	159
6.3.2	Belastungs-Wirkungs-Beziehungen	159
6.3.3	Ernteerträge	160
6.3.4	Verkehrsanteil an Ozonbelastung	161
6.4	Wertgerüst.....	162
6.5	Vorgehen bei Differenzierungen	162
6.5.1	Differenzierung nach Antriebsart.....	162
6.5.2	Differenzierung nach Kantonen.....	162
6.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	163
6.7	Ergebnisse	163
6.7.1	Externe Kosten.....	163
6.8	Sensitivitätsanalyse.....	170
6.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	170
7	Waldschäden durch Luftverschmutzung	173
7.1	Berechnungsgegenstand	173
7.2	Bewertungsmethodik.....	174
7.3	Mengengerüst	177
7.3.1	Vermindertes Holzwachstum	177
7.3.2	Verstärkter Windwurf.....	181
7.4	Wertgerüst.....	181
7.4.1	Vermindertes Holzwachstum	181
7.4.2	Verstärkter Windwurf.....	182
7.5	Vorgehen bei Differenzierungen	182
7.5.1	Differenzierung nach Antriebsart.....	182
7.5.2	Differenzierung nach Kantonen.....	183
7.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	183
7.7	Ergebnisse	183
7.7.1	Externe Kosten.....	183
7.8	Sensitivitätsanalyse.....	191
7.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	191

8	Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung	194
8.1	Berechnungsgegenstand	194
8.2	Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen	194
8.3	Mengengerüst	196
8.3.1	Emissionen von versauernden und eutrophierenden Luftschadstoffen	196
8.4	Wertgerüst	197
8.4.1	Kostensätze pro Tonne Luftschadstoff	197
8.5	Vorgehen bei Differenzierungen	198
8.5.1	Differenzierung nach Antriebsart	198
8.5.2	Differenzierung nach Kantonen	198
8.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	198
8.7	Ergebnisse	199
8.7.1	Externe Kosten	199
8.8	Sensitivitätsanalyse	206
8.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	206
9	Lärm	209
9.1	Berechnungsgegenstand	209
9.2	Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen	211
9.3	Vorgehen bei Differenzierungen	211
9.3.1	Differenzierung nach Antriebsart	211
9.3.2	Differenzierung nach Raumtypen	211
9.3.3	Differenzierung nach Kantonen	212
9.4	Überlegungen zu den Grenzkosten	212
10	Klima	213
10.1	Berechnungsgegenstand	213
10.2	Berechnungsmethodik und wesentliche Anpassungen	214
10.2.1	Methodische Anpassung: Schadenskostensatz	214
10.2.2	Aktuelle Schadenskostensätze anderer Länder	218
10.2.3	Methodische Anpassung: Nicht-CO ₂ -Emissionen im Luftverkehr	219
10.2.4	Verwendete Berechnungsmethode	220
10.3	Mengengerüst	224
10.3.1	Treibhausgaspotenziale	225
10.4	Wertgerüst	227
10.4.1	CO ₂ -Kostensatz	227
10.4.2	Kostensätze für klimawirksame Stickoxide und ultrafeine Partikel im Luftverkehr	229
10.4.3	Internalisierungsbeiträge	230
10.5	Vorgehen bei Differenzierungen	231
10.5.1	Differenzierung nach Antriebsart	231
10.5.2	Differenzierung nach Kantonen	231

10.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	231
10.7	Ergebnisse	231
10.7.1	Externe Kosten.....	231
10.7.2	Soziale Kosten	238
10.8	Sensitivitätsanalyse.....	238
10.8.1	Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten.....	238
10.8.2	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	239
10.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	240
11	Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse	243
11.1	Berechnungsgegenstand	243
11.2	Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen	243
11.3	Mengengerüst	246
11.4	Wertgerüst.....	247
11.5	Vorgehen bei Differenzierungen	249
11.5.1	Differenzierung nach Antriebsart.....	249
11.5.2	Differenzierung nach Kantonen.....	249
11.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	249
11.7	Ergebnisse	249
11.7.1	Externe Kosten.....	249
11.8	Sensitivitätsanalyse.....	256
11.8.1	Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten.....	256
11.8.2	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	256
11.8.3	Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen	258
11.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	258
12	Natur und Landschaft	261
12.1	Berechnungsgegenstand	261
12.1.1	Einleitung und Begriffe	261
12.1.2	Betrachtungsrahmen	262
12.2	Bewertungsmethodik.....	262
12.2.1	Relevante Ursache-Wirkungsketten und methodische Entwicklungen.....	262
12.2.2	Bewertungsmethodik.....	264
12.3	Mengengerüst	269
12.3.1	Längen (Flächen) Verkehrsinfrastrukturen	269
12.3.2	Allokation auf die Fahrzeugkategorien.....	271
12.3.3	Anrechnung von Ersatzmassnahmen	272
12.4	Wertgerüst.....	272
12.5	Vorgehen bei Differenzierungen	274
12.5.1	Differenzierung nach Antriebsart.....	274
12.5.2	Differenzierung nach Kantonen.....	274
12.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	274

12.7	Ergebnisse	275
12.7.1	Externe Kosten.....	275
12.8	Sensitivitätsanalyse	281
12.8.1	Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten	281
12.8.2	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	281
12.8.3	Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen	282
12.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	283
13	Bodenschäden durch toxische Stoffe	286
13.1	Berechnungsgegenstand	286
13.2	Bewertungsmethodik.....	286
13.3	Mengengerüst	288
13.3.1	Emissionen von Schwermetallen und PAK.....	288
13.3.2	Grenzwerte	289
13.4	Wertgerüst.....	290
13.5	Vorgehen bei Differenzierungen	290
13.5.1	Differenzierung nach Antriebsart.....	290
13.5.2	Differenzierung nach Kantonen.....	291
13.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	291
13.7	Ergebnisse	291
13.7.1	Externe Kosten.....	291
13.8	Sensitivitätsanalyse	297
13.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	297
14	Unfälle	299
14.1	Berechnungsgegenstand	299
14.1.1	Unfalldefinition und Abgrenzung	299
14.1.2	Eingenommene Sichtweisen.....	301
14.1.3	Territorialitätsprinzip	301
14.1.4	Verursacherprinzip	302
14.1.5	Berücksichtigte Unfallfolgekosten / Kostenbestandteile	303
14.2	Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen	304
14.2.1	Personenschäden	304
14.2.2	Sachschäden.....	307
14.2.3	Polizei- und Rechtsfolgekosten.....	308
14.3	Mengengerüst	309
14.3.1	Strassenverkehr	309
14.3.2	Schienenverkehr	320
14.3.3	Luftverkehr	322
14.3.4	Schiffsverkehr.....	323
14.4	Wertgerüst.....	324
14.4.1	Kostenbestandteile bei Personenschäden.....	324
14.4.2	Soziale Kostensätze für Personenschäden	325

14.4.3	Externe Anteile der Kostensätze für Personenschäden	326
14.4.4	Kostensätze für übrige Kostenbestandteile	330
14.4.5	Zusammenfassung der Kostensätze	332
14.5	Vorgehen bei Differenzierungen	335
14.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	336
14.7	Ergebnisse	337
14.7.1	Externe Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende.....	337
14.7.2	Soziale Kosten	346
14.7.3	Externe Kosten aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr	355
14.8	Sensitivitätsanalyse.....	356
14.8.1	Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten.....	356
14.8.2	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	357
14.8.3	Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen	359
14.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	360
15	Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr.....	363
15.1	Berechnungsgegenstand	363
15.2	Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen	364
15.2.1	Wesentliche Anpassungen in der Bewertungsmethodik.....	364
15.2.2	Verwendete Bewertungsmethodik	365
15.3	Mengengerüst	366
15.3.1	Methodik.....	366
15.3.2	Ergebnisse zum Mengengerüst	375
15.4	Wertgerüst.....	377
15.4.1	Einleitung.....	377
15.4.2	Externe Nutzen durch den Fuss- und Veloverkehr	378
15.4.3	Zusammenfassung der verwendeten Kostensätze zur Bewertung der Nutzen.....	381
15.4.4	Internalisierungsbeiträge.....	382
15.5	Vorgehen bei Differenzierungen	382
15.5.1	Differenzierung nach Antriebsart.....	382
15.5.2	Differenzierung nach Kantonen.....	382
15.6	Überlegungen zu den Grenzkosten	382
15.7	Ergebnisse	383
15.7.1	Externe Nutzen.....	383
15.7.2	Soziale Nutzen	386
15.8	Sensitivitätsanalyse.....	389
15.8.1	Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten.....	389
15.8.2	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	390
15.8.3	Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen	392
15.9	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	393
15.9.1	Externe Nutzen.....	393
15.9.2	Soziale Nutzen	396

16	Exkurs: Überlastungskosten	398
17	Exkurs: Zusatzkosten in städtischen Räumen	400
17.1	Räumliche Trenneffekte	400
17.2	Beeinträchtigung des Ortsbilds und Verminderung der Aufenthaltsqualität	400
18	Exkurs: Ungedeckte marginale Infrastrukturkosten	402
19	Übersicht über die Ergebnisse	405
19.1	Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende	405
19.1.1	Überblick Gesamtverkehr	405
19.1.2	Strassenverkehr	409
19.1.3	Schienenverkehr	414
19.1.4	Luftverkehr	417
19.1.5	Schiffsverkehr	418
19.2	Soziale Effekte	419
19.2.1	Überblick Gesamtverkehr	419
19.2.2	Strassenverkehr	422
19.2.3	Schienenverkehr	426
19.2.4	Luftverkehr	428
19.2.5	Schiffsverkehr	429
19.3	Externe Effekte aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr	430
19.4	Externe und soziale Effekte pro Leistungseinheit	431
19.4.1	Datengrundlagen	431
19.4.2	Strassenverkehr	432
19.4.3	Schienenverkehr	437
19.4.4	Luftverkehr	438
19.4.5	Schiffsverkehr	438
19.4.6	Vergleich der Verkehrsträger	439
19.5	Unsicherheiten	443
19.6	Vergleich zu den bisherigen Berechnungen	446
19.6.1	Übersicht	446
19.6.2	Strassenverkehr	447
19.6.3	Schienenverkehr	449
19.6.4	Luftverkehr	449
19.6.5	Schiffsverkehr	450
19.7	Entwicklung der externen Kosten 2010 bis 2021	451
19.7.1	Vorgehen für die Rückrechnung	451
19.7.2	Resultate nach Verkehrsträger	452
19.7.3	Resultate nach Kostenbereich	454
20	Anhang A: Gemeinsame Datengrundlagen	457
20.1	Fahr- und Verkehrsleistungen	457
20.1.1	Fahr- und Verkehrsleistungen MIV	457
20.1.2	Verkehrsleistungen Fuss- und Veloverkehr	458

20.1.3	Fahr- und Verkehrsleistungen Schienenverkehr.....	459
20.1.4	Differenzierung nach Raumtypen.....	460
20.1.5	Differenzierung nach Kantonen.....	462
20.1.6	Differenzierung nach Antriebsarten	462
20.1.7	Differenzierung Helikopter nach Personen- und Güterverkehr.....	462
20.2	Schadstoffemissionen	462
20.2.1	Strassenverkehr	462
20.2.2	Schienenverkehr	463
20.2.3	Schiffsverkehr.....	463
20.2.4	Luftverkehr	464
20.3	Diskontsatz	464
20.4	Aktualisierung und Übertragung von monetären Werten (Value transfer).....	466
20.5	Kosten von Krankheits- und Todesfällen	468
20.5.1	Einleitung.....	468
20.5.2	Medizinische Heilungskosten.....	473
20.5.3	Produktionsausfall	478
20.5.4	Wiederbesetzungskosten.....	482
20.5.5	Immaterielle Kosten von Todesfällen	483
20.5.6	Immaterielle Kosten von Krankheitsfällen.....	485
20.5.7	Zusammenfassung der Kostensätze pro Krankheitsbild	488
20.6	Berechnung der verlorenen Lebensjahre.....	489
21	Anhang B: Detaillierte Betrachtungen zur Kalibrierung der Baseline Aktivität (SGB) für die Verknüpfung mit den Mobilitätsdaten (MZMV)	493
22	Literaturverzeichnis	497

Kurzfassung

Ausgangslage und Zweck

Die externen Effekte des Verkehrs sind Bestandteil der vom Bundesamt für Statistik (BFS) publizierten Statistik «**Kosten und Finanzierung des Verkehrs**» (KFV). Diese umfassende Zusammenstellung stellt eine wichtige Grundlage für die Verkehrspolitik dar. Zudem sind die externen Kosten des Schwerverkehrs – neben weiteren Aspekten – bei der **Festlegung des Tarifes der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA)** relevant.

Die externen Effekte des Verkehrs werden vom Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) jährlich ausgewiesen und müssen **transparent und gemäss dem aktuellen Stand des Wissens berechnet** werden (vgl. Art. 7, al. 3 Schwerverkehrsabgabengesetz). Um die Aktualität der Berechnungsmethode zu gewährleisten, beauftragt das ARE regelmässig eine Methodenüberprüfung. Der vorliegende Bericht dokumentiert die Überprüfung, präsentiert die Resultate für das **Referenzjahr 2021** und nimmt entsprechende **Rückrechnungen bis 2010** vor. Diese Arbeiten folgen auf die Methodenberichte für die Referenzjahre 2010 (Ecoplan; INFRAS (2014)) und 2015 (INFRAS; Ecoplan (2019)).

Im Rahmen der vorliegenden Methodenüberprüfung wurden die externen Effekte des Verkehrs auf den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse gebracht. Es wurden insbesondere **Datengrundlagen (Mengengerüste), Belastungs-Wirkungs-Beziehungen und Kostensätze aktualisiert**. So wurden z.B. neue Krankheitsbilder (Lungenkrebs, Diabetes und Demenz), die durch Luftverschmutzung verursacht werden, in die Berechnungen integriert oder der Klimakostensatz aktualisiert. Weiter wurde / wurden:

- die **Sicht Verkehrsteilnehmende** ins Zentrum gestellt (die Sicht Verkehrsträger wird nicht mehr berechnet);
- die relevanten Kostenbestandteile überprüft und angepasst: der Bereich «zusätzliche Kosten in städtischen Räumen» wird nicht mehr berechnet, **die Überlastungskosten der Verkehrsinfrastruktur** werden ab sofort in die Publikation der externen Effekte integriert;
- zusätzliche Differenzierungen eingeführt: separate Resultate für **Elektromobilität**, nach **Gemeindetyp** (städtisch, intermediär, ländlich) sowie nach **Kanton**.

Das ARE konnte auf finanzielle Unterstützung durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und aller 26 Kantone zählen. Das Projekt wurde inhaltlich vom BFS, von den Bundesämtern für Strassen (ASTRA), Verkehr (BAV), Zivilluftfahrt (BAZL), Umwelt (BAFU) und Energie (BFE) begleitet. Internationale Expertinnen und Experten (siehe Impressum) haben das Vorgehenskonzept validiert.

Definition, Abgrenzung und Berechnungsmethode

a) Definition

Eine Externalität wird in der Ökonomie wie folgt definiert: Es handelt sich um eine negative oder positive Auswirkung, die durch eine Verkehrsaktivität verursacht wird, aber nicht im entsprechenden Marktpreis enthalten ist und daher weder in der Nachfragefunktion (Konsument) noch in der Angebotsfunktion (Produzent) berücksichtigt wird. Die Abgrenzung, welche Auswirkungen privat (fallen direkt beim verursachenden Verkehrsteilnehmenden an) und welche extern sind, erfolgt über die «Einheit», welche die Mobilitätsentscheidungen trifft, also das Individuum oder das Unternehmen (Sicht Verkehrsteilnehmende).¹ Zu den **externen Kosten** des Verkehrs gehören z.B. die Kosten durch Luftverschmutzung oder Lärm. Bei den **externen Nutzen** des Verkehrs sind lediglich die externen Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs von Bedeutung und dementsprechend in der Studie zu berücksichtigen. Unbestritten dabei ist, dass der Verkehr nebst den erwähnten Gesundheitsnutzen in vielfältiger Weise weitere Nutzen generiert. Es handelt sich aber nicht um Externalitäten aus Sicht Verkehrsteilnehmende (siehe Box Seite 55).

Für die Berechnung der Kostendeckung des Schwerverkehrs (Vorgaben durch das Schwerverkehrsabgabegesetz und den Bundesgerichtsentscheid vom 17. Dezember 2011) werden die externen Kosten aus der Sicht «Verkehrsart» zusätzlich berechnet. In dieser Sicht wird der Schwerverkehr als Gruppe betrachtet, d.h. Kosten werden als extern definiert, wenn sie vom Schwerverkehr verursacht werden und ausserhalb des Schwerverkehrs anfallen. Im Vergleich zur Sicht Verkehrsteilnehmende werden also die Unfallkosten abgezogen, die von einem Fahrzeug des Schwerverkehrs verursacht und von einem anderen Fahrzeug des Schwerverkehrs getragen werden.

b) Abgrenzungen

Räumliche Abgrenzung

- Strasse und Schiene: Territorialitätsprinzip

Alle gefahrenen Kilometer, die auf der schweizerischen Verkehrsinfrastruktur stattfinden, werden berücksichtigt. Dies unabhängig davon, ob das Fahrzeug in der Schweiz immatrikuliert ist oder nicht. Das gleiche Prinzip gilt für die Aufteilung nach Kanton und Raumtyp.

- Luft- und Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

Für alle leistungsabhängigen Auswirkungen wird die Hälfte der Distanz von jedem Flug oder von jeder Schifffahrt aus der Schweiz oder in die Schweiz gezählt. Der Abfahrts- und Ankunftsort wird nach dem Fahrzeug und nicht nach dem Passagier oder dem transportierten Gut bestimmt.

¹ Bisher stand die «Sicht Verkehrsträger» (Strasse, Schiene, Luft und Schiff), also eine Externalität in Bezug auf eine Gruppe von Nutzenden im Zentrum. Das bedeutet z.B., dass die Kosten, die ein Velo verursacht und die ein Fussgänger trägt, nicht als extern gezählt wurden, weil beide Verkehrsteilnehmenden Strassennutzende waren. Die Verkehrsträgersicht widerspiegelt nicht die individuellen Verkehrsentscheide und wird daher nicht mehr berechnet.

Zeitliche Abgrenzung

- Die im Jahr 2021 zurückgelegten Kilometer bzw. die im Jahr 2021 verursachten Kosten und Nutzen werden berücksichtigt. Dies schliesst auch Kosten ein, die erst in der Zukunft anfallen, aber im Jahr 2021 verursacht wurden – ein typisches Beispiel hierfür sind Folgekosten von Verkehrsunfällen im Jahr 2021 (z.B. Produktionsausfälle durch die Invalidität eines Unfallopfers).
- Beim Bereich vor- und nachgelagerte Prozesse werden annualisierte (d.h. bezogen auf ein Nutzungsjahr anfallende) Emissionen einbezogen, die während der ganzen Lebensdauer des Fahrzeugs, der Infrastruktur und der Energiebereitstellung entstanden sind oder noch entstehen werden.

c) Berechnungsmethoden

Aus der Ökonomie sind verschiedene Herangehensweisen bekannt, um Externalitäten zu berechnen. Die externen Kosten und Nutzen des Verkehrs werden, wenn möglich, nach dem **Schadenskosten-Ansatz** monetarisiert: Der Schaden (z.B. durch Luftverschmutzung, Lärm oder Unfälle), der aufgrund der Verkehrsaktivität entsteht, wird abgeschätzt. Wenn dies nicht sinnvoll möglich ist, wird ein alternativer Ansatz verwendet:

- Vermeidungskosten: Nötige Investition der Gesellschaft, um die Schäden im Voraus zu vermeiden oder
- Reparatur- und Ersatzkosten: Kosten, um die entstandenen Schäden zu reparieren oder zu kompensieren.

Konkret werden für die Monetarisierungen z.B. folgende Informationen genutzt:

- relevante, beobachtbare Marktpreise, wie z.B. die Lohnkosten;
- Preise auf «verwandten» Märkten, wie z.B. die Auswirkung des Lärms auf Wohnpreise (Revealed Preferences);
- Zahlungsbereitschaft von Personen basierend auf Befragungen, wie z.B. die Zahlungsbereitschaft, für die Verringerung des Mortalitätsrisiko (Stated Preferences).

Die Schätzung der externen Effekte bedingt, dass Annahmen getroffen und Unsicherheiten akzeptiert werden müssen. Dies aufgrund der Datenlage, den nicht leicht zu isolierenden Belastung-Wirkungs-Beziehungen und der Abhängigkeit bestimmter Kosten von zukünftigen Entwicklungen. Um Überschätzungen der externen Effekte zu vermeiden, verwenden wir immer dann den «at least» Ansatz, wenn kein eindeutiger “best guess” Wert vorliegt (siehe Kapitel 3.3). Die Resultate sind also als Grössenordnungen zu interpretieren und für die wichtigsten Parameter werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

Wichtigste Änderungen im Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Im Rahmen dieses Projekts wurden **Datengrundlagen (Mengengerüste), Belastungs-Wirkungs-Beziehungen und Kostensätze aktualisiert**, die wichtigsten davon sind (aufgelistet in der Reihenfolge des Berichts):

- Die verkehrsbedingte Schadstoffbelastung der Bevölkerung basierend auf dem aktualisierten Immissionsmodell PolluMap des BAFU (siehe Kapitel 4.2.1)
- Die Belastung-Wirkungs-Beziehungen im Gesundheitsbereich basierend auf den jüngsten epidemiologischen Studien (siehe Kapitel 4.2.2 und 15.3.1)
- Die Kostensätze im Gesundheitsbereich, einschliesslich der neu berücksichtigten Krankheiten wie Demenz, Diabetes und Lungenkrebs (siehe Kapitel 4.4.1 bzw. 20.5)
- Die Emissionsfaktoren für alle Fahrzeuge und Schadstoffe, differenziert nach Antriebsart, nach der letzten Version des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA, siehe Kapitel 4.5 bzw. 20.2)
- Die Klimaauswirkungen der Nicht-CO₂-Emissionen im Luftverkehr, die neu auf der tatsächlichen Entwicklung von Nicht-CO₂-Emissionen basiert und nicht mehr auf einem fixen Umrechnungsfaktor, der auf CO₂-Emissionen angewendet wurde (siehe Kapitel 10.2.3)
- Der Klimakostensatz, der nach dem Schadenskostenansatz mit dem neuen, international anerkannten GIVE-Modell berechnet und an das Schweizer Einkommens- und Preisniveau angepasst wurde (siehe Kapitel 10.4). Er ersetzt den bisherigen Kostensatz, der auf den Vermeidungskosten mit einem Reduktionsziel aus 2009 basierte.
- Die Emissionsfaktoren aus Mobitool für die vor- und nachgelagerten Prozesse, für alle Fahrzeuge, Antriebsarten und Schadstoffe (siehe Kapitel 11.3)
- Die Zuteilung der Unfallopfer im Strassenverkehr auf die Verursacher wird neu direkt aus den Daten des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) hergeleitet (siehe Kapitel 14.3.1a).
- Die Schätzung des Gesamtunfallgeschehens (inkl. Dunkelziffer), erfolgt über eine einfache Schätzgleichung basierend auf Daten der Vorjahre der Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu) und des ASTRA (siehe Kapitel 14.3.1b). Dank diesem Vorgehen kann das Publikationsdatum der Resultate der externen Effekte des Verkehrs um fast ein Jahr vorgezogen werden.

Aus Gründen der Verfügbarkeit von Input-Daten wurden die Lärmkosten nicht überarbeitet. In den folgenden Vergleichen mit der alten Methode sind sie daher vor und nach der Methodenüberprüfung gleich. Dieser Bericht wird um die Lärmzahlen ergänzt, sobald diese verfügbar sind.

Abbildung K-1 zeigt die Auswirkungen der Methodenrevision auf die Ergebnisse für das Jahr 2021 nach Kostenbestandteil und Verkehrsträger. Insgesamt führen die methodischen Anpassungen zu einem erheblichen Kostenanstieg von insgesamt 69%. Rund drei Viertel des Anstiegs sind auf die Erhöhung des Klimakostensatzes zurückzuführen (Bereiche Klima und vor- und nachgelagerte Prozesse), der Rest mehrheitlich auf die höheren Gesundheitskosten der Luftverschmutzung (neue Krankheitsbilder und höhere Inzidenz, trotz der durch das Immissionsmodell gemessenen Verbesserung der Luftqualität).

Abbildung K-1: Externe Kosten und Nutzen des Verkehrs 2021 aus Sicht Verkehrsteilnehmer, nach bisheriger und neuer Methode, relative und absolute Veränderung der Ergebnisse, nach Verkehrsträger und Kostenbestandteil (Lärm ohne Änderung, weiterhin mit bisheriger Berechnungsmethode)

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

Nutzen sind als negative Zahlen ausgewiesen

Strasse

Vergleich neue versus bisherige Berechnung 2021 (in Mio. CHF)	Bisherige Berechnung	Neue Berechnung	Veränderung in %	Veränderung in Mio. CHF
Strassenverkehr				
Gesundheit Luft	2'847	4'616	62%	1'769
Gebäude Luft	223	202	-9%	-21
Ernteauffälle Luft	44	52	19%	8
Waldschäden Luft	47	49	4%	2
Biodiversitätsverluste Luft	81	78	-4%	-3
Lärm	2'113	2'113	0%	-
Klima	1'593	5'230	228%	3'637
Natur und Landschaft	1'150	971	-16%	-178
Bodenschäden	145	154	6%	9
Vor- und nachgelagerte Prozesse	1'227	4'253	246%	3'025
Unfälle	4'180	4'426	6%	246
Städtische Räume	207	-	-100%	-207
LSVA	-556	-556	0%	-
Total mit LSVA-Abzug	13'301	21'589	62%	8'287
<i>Gesundheitsnutzen FVV</i>	<i>-1'522</i>	<i>-5'617</i>	<i>269%</i>	<i>-4'095</i>

FVV = Fuss- und Veloverkehr

Schiene

Vergleich neue versus bisherige Berechnung 2021 (in Mio. CHF)	Bisherige Berechnung	Neue Berechnung	Veränderung in %	Veränderung in Mio. CHF
Schienenverkehr				
Gesundheit Luft	367	1'040	183%	673
Gebäude Luft	29	45	58%	17
Ernteauffälle Luft	1	1	12%	0
Waldschäden Luft	1	1	6%	0
Biodiversitätsverluste Luft	1	1	-1%	-0
Lärm	417	417	0%	-
Klima	4	12	210%	8
Natur und Landschaft	136	134	-2%	-3
Bodenschäden	31	35	13%	4
Vor- und nachgelagerte Prozesse	80	101	27%	21
Unfälle	36	36	0%	-0
Städtische Räume	39	-	-100%	-39
Total	1'141	1'823	60%	682

Luftverkehr

Vergleich neue versus bisherige Berechnung 2021 (in Mio. CHF)	Bisherige Berechnung	Neue Berechnung	Veränderung in %	Veränderung in Mio. CHF
Luftverkehr				
Gesundheit Luft	23	67	195%	44
Gebäude Luft	2	3	47%	1
Ernteaufälle Luft	1	1	12%	0
Waldschäden Luft	1	1	2%	0
Biodiversitätsverluste Luft	2	2	-1%	-0
Lärm	69	69	0%	-
Klima	561	1'757	213%	1'197
Natur und Landschaft	7	7	0%	-0
Bodenschäden	-	-	0%	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	130	408	214%	278
Unfälle	22	22	-1%	-0
Total	818	2'337	186%	1'519

Schiffsverkehr

Vergleich neue versus bisherige Berechnung 2021 (in Mio. CHF)	Bisherige Berechnung	Neue Berechnung	Veränderung in %	Veränderung in Mio. CHF
Schiffsverkehr				
Gesundheit Luft	73	215	195%	142
Gebäude Luft	6	9	63%	4
Ernteaufälle Luft	3	4	12%	0
Waldschäden Luft	3	4	6%	0
Biodiversitätsverluste Luft	5	5	-1%	-0
Lärm	-	-	0%	-
Klima	14	45	210%	30
Natur und Landschaft	5	5	0%	-0
Bodenschäden	-	-	0%	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	4	14	285%	10
Unfälle	1	1	4%	0
Total	115	301	163%	187

Hauptergebnisse

a) Überblick der Resultate

Abbildung K-2 zeigt die totalen externen Kosten und Nutzen nach Verkehrsträger (ohne Lärm). Die Strasse macht mit 83% den grössten Anteil aus. Dieser Verkehrsträger wird auch am häufigsten genutzt, auf ihn entfallen gut drei Viertel der in den Berechnungen berücksichtigten Personenkilometer und knapp 60% der Tonnenkilometer. Der Anteil des Luftverkehrs an den externen Kosten beträgt knapp 10%, derjenige des Schienen- bzw. Schiffsverkehrs 6% bzw. 1%. Der Güterverkehr ist über alle Verkehrsträger für 19% der externen Kosten verantwortlich (nach Abzug der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA)).

Die externen Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs belaufen sich auf 5.6 Mrd. CHF, was fast dem 7-fachen an externen Kosten (v.a. Unfallkosten) entspricht, die durch den Fuss- und Veloverkehr verursacht werden.

Abbildung K-2: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende 2021 (ohne Lärm, mit LSVA-Abzug)

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip
Nutzen sind als negative Zahlen ausgewiesen

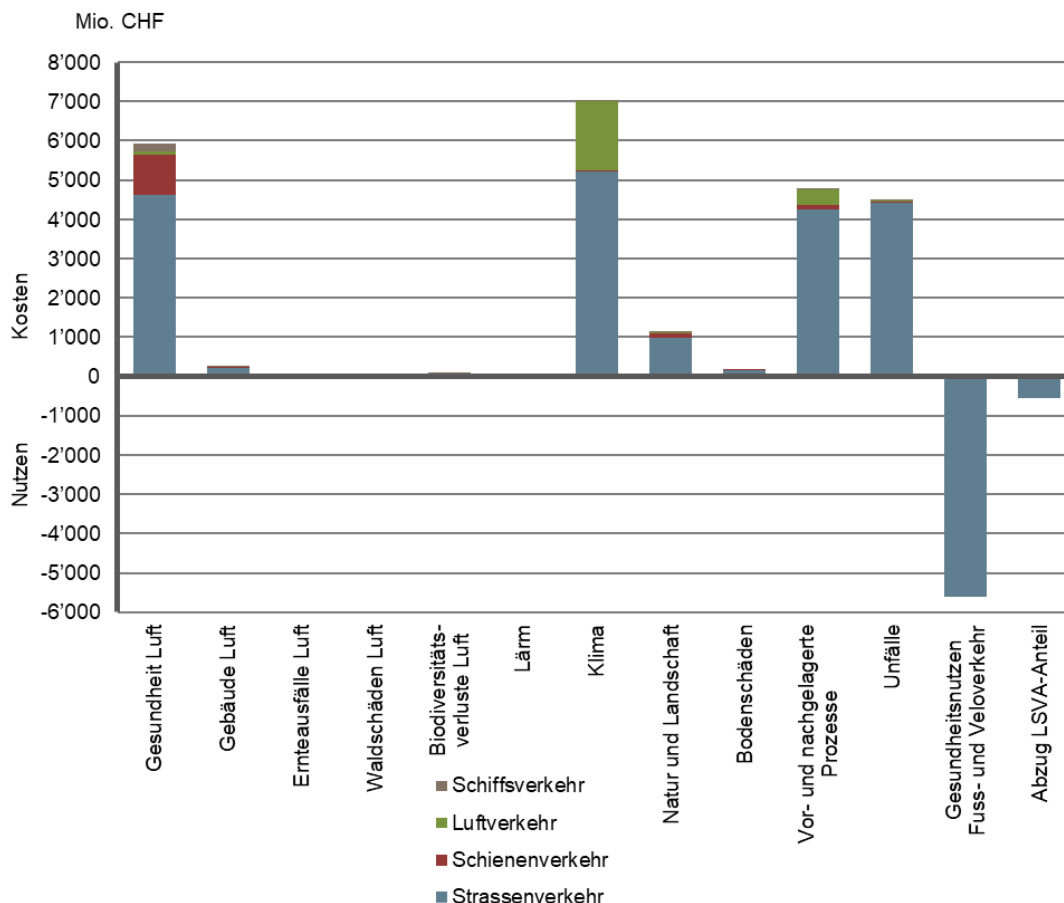
Externe Kosten in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Strassenverkehr	15'842.6	3'633.2	19'475.8
Schienenverkehr	944.0	461.9	1'405.9
Luftverkehr	1'959.5	308.8	2'268.3
Schiffsverkehr	139.2	162.2	301.4
Total externe Kosten	18'885.3	4'566.1	23'451.4
in % des Totals	80.5%	19.5%	100.0%
<i>Gesundheitsnutzen Fuss- und Veloverkehr</i>	<i>-5'617.2</i>		<i>-5'617.2</i>

Abbildung K-3 zeigt die externen Kosten und Nutzen nach Bereichen. Der grösste Kostenbestandteil über alle Verkehrsträger ist das Klima mit 7.0 Mrd. CHF. Es folgen Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung mit 5.9 Mrd. CHF, vor- und nachgelagerte Prozesse mit 4.8 Mrd. CHF, Unfälle mit 4.5 Mrd. CHF und Schäden an Natur und Landschaft mit 1.1 Mrd. CHF. Die weiteren Kostenbestandteile liegen alle unter 0.3 Mrd. CHF.

Abbildung K-3: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende 2021 nach Kostenbestandteilen (ohne Lärm)

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

Nutzen und Internalisierungsbeiträge sind als negative Zahlen ausgewiesen



Soziale Kosten, soziale Gesundheitsnutzen, Internalisierungsbeiträge

Die sozialen Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten belaufen sich auf 37 Mrd. CHF. Die Differenz von 13.5 Mrd. CHF mit den externen Kosten besteht aus den Kosten, die direkt vom Verursacher bezahlt werden. Zu den sozialen Kosten, aber nicht zu den externen Kosten, zählen also knapp 13 Mrd. CHF private Unfallkosten (immaterielle Kosten für den Unfallverursacher, Versicherungsbeiträge) und die Internalisierungsbeiträge über die LSVA (556 Mio. CHF), die emissionsabhängigen Landegebühren (gut 2 Mio. CHF), die Sanktionen wegen Überschreitung der CO₂-Emissionsvorschriften für Personenwagen und Lieferwagen (knapp 36 Mio. CHF) und die CO₂-Kompensationspflicht für fossile Treibstoffimporteure (gut 110 Mio. CHF).

Die sozialen Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs belaufen sich auf 57 Mrd. CHF. Sie umfassen neben den externen Nutzen (5.6 Mrd. CHF) auch die privaten Nutzen, von denen die Fussgängerinnen und Velofahrerinnen direkt profitieren, insbesondere den immateriellen

Nutzen der gewonnenen Lebensjahre (48 Mrd. CHF). Die gesundheitlichen sozialen Nutzen des Fuss- und Veloverkehrs wurden als Zwischenschritt berechnet, um den externen Nutzen auszuweisen. Der soziale Nutzen von Mobilität anderer Art und für andere Verkehrsträger wurde im Rahmen dieses Projekts nicht monetarisiert (siehe Box S. 55).

Sensitivitäten

Abbildung K-4 zeigt die wichtigsten durchgeführten Sensitivitätsanalysen. Die grösste Bandbreite wurde für den Klimakostensatz (siehe Kapitel 10.4.1) berechnet, was dazu führt, dass die Ergebnisse gut doppelt so hoch oder 35% tiefer sein könnten. Die Bandbreite ist bei den anderen Sensitivitäten geringer: Die Sensitivitäten für die Effektschätzer der Luftverschmutzung auf die Gesundheitskosten und die Sensitivität für den statistischen Wert eines Lebens (VOSL) variieren die externen Kosten um 12 bis 16% (siehe Kapitel 19.5). Die Sensitivität zu Nicht-CO₂-Emissionen des Luftverkehrs (siehe 10.4.2) führt zu 7% (d.h. 1.7 Mrd. CHF) höheren totalen externen Kosten.

Abbildung K-4: Sensitivitätsanalysen externe Kosten 2021 aus Sicht Verkehrsteilnehmer (ohne Lärm, ohne LSVA-Abzug)

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

Externe Kosten in Mio. CHF Sensitivitäten	Strassen- verkehr	Schienen- verkehr	Luft- verkehr	Schiffs- verkehr	Total
Klimakostensatz hoch	41'081	1'653	7'002	432	50'168
Effektschätzer Gesundheit Luft h	23'081	2'117	2'315	450	27'964
VOSL hoch	23'121	1'790	2'302	378	27'590
Kostensätze non-CO ₂ -Emis. ERF hoher Wert	20'032	1'406	3'978	301	25'717
Basisberechnung	20'032	1'406	2'268	301	24'007
Effektschätzer Gesundheit Luft tie	17'775	896	2'234	196	21'101
VOSL tief	16'942	1'023	2'234	225	20'424
Klimakostensatz tief	13'314	1'351	758	260	15'683

Entwicklung 2010-2021

Hinweis: Der Bereich Lärm wurde noch nicht überarbeitet. Um Vergleiche über die Zeit zu ermöglichen, wird der Lärmbereich *nach der bisherigen Methode* für alle Jahre (inklusive 2021) in die Summen unten einbezogen.

Durch vereinfachte Rückrechnungen wurde die Zeitreihe 2010-2020 basierend auf den neuen Methoden und Datengrundlagen erstellt. Dadurch kann die Kostenentwicklung unabhängig von methodischen Änderungen dargestellt und diskutiert werden.

Abbildung K-5 zeigt die Kosten nach Verkehrsträger im Zeitablauf sowie die relative Veränderung im Vergleich zu 2010 (Index). Die externen Kosten weisen zwischen 2010 und 2019 einen

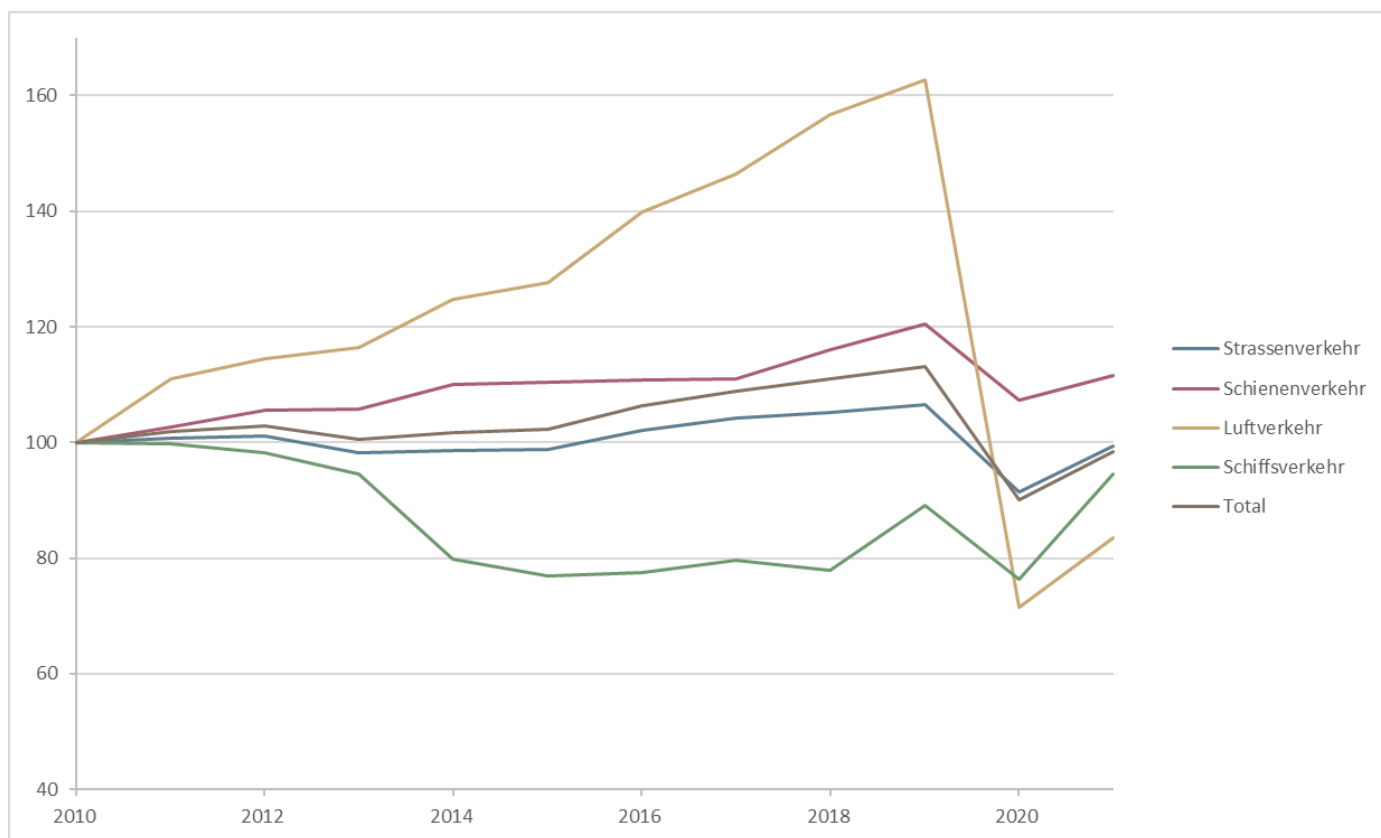
Aufwärtstrend auf, mit einem durchschnittlichen Anstieg pro Jahr von knapp 1.4%. Die Auswirkungen der Covid-Pandemie zeigen sich in den Jahren 2020 und 2021, vor allem im Luftverkehr.

Die externen Kosten des Verkehrs 2021 liegen leicht unter dem Niveau von 2010, sie fallen um 13% geringer aus als 2019 und um 9% höher als 2020.

Abbildung K-5: Entwicklung der externen Kosten pro Verkehrsträger 2010 bis 2021 (Niveau und Index 2010), inkl. Lärm nach «alter» Methode und LSVA-Abzug, Sicht Verkehrsteilnehmende

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

Externe Kosten (Mio CHF)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Strassenverkehr	21'734	21'907	21'995	21'350	21'412	21'485	22'198	22'651	22'864	23'177	19'888	21'589
Schienenverkehr	1'635	1'678	1'727	1'730	1'798	1'806	1'812	1'816	1'899	1'969	1'755	1'823
Luftverkehr	2'809	3'116	3'217	3'272	3'502	3'585	3'929	4'116	4'402	4'571	2'008	2'345
Schiffsverkehr	319	318	313	301	254	245	247	254	248	284	243	301
Total	26'497	27'019	27'251	26'653	26'966	27'121	28'186	28'836	29'412	30'001	23'895	26'058



Die Veränderung der externen Kosten von einem Jahr zum anderen ist hauptsächlich auf die Veränderung der Fahrleistungen zurückzuführen. So ist z.B. im Strassenverkehr die Anzahl der Fahrzeugkilometer von 6.8 Millionen im Jahr 2010 auf 7.7 Millionen im Jahr 2019 (+14%) und 6.9 Millionen im Jahr 2021 (+1.4%) gestiegen. Die Kosten des Strassenverkehrs reagieren

weniger als proportional zu den gefahrenen Kilometern, was vor allem auf technologische Entwicklungen hin zu effizienteren und saubereren Motoren und auf höhere Internalisierungsbeiträge zurückzuführen ist. Auch im Bereich der Sicherheit wurden Fortschritte gemacht: Die externen Unfallkosten sind zwischen 2010 und 2021 um gut 30% gesunken.

Die Bevölkerung stieg zwischen 2010 und 2021 um 11%, was bedeutet, dass mehr Menschen von Luftverschmutzung und Lärmbelastung betroffen sind. Steigende Preise oder Einkommen führen ebenfalls zu einem Anstieg der externen Kosten, da Schäden zu einem höheren Preis monetarisiert werden. So ist das reale Pro-Kopf-BIP 2010-2021 um 9% gestiegen. Der Landesindex der Konsumentenpreise sank um 1% über die elf Jahre und hat somit die Kosten leicht gedämpft.

b) Strassenverkehr

Abbildung K-6 zeigt die externen Kosten und Nutzen des Strassenverkehrs nach Verkehrsmittel und Kostenbestandteil. Der motorisierte private Personenverkehr macht knapp drei Viertel der externen Kosten des Strassenverkehrs aus. 19% der Kosten sind durch den Güterverkehr verursacht, der Rest durch Fuss- und Veloverkehr (gut 4%) und den öffentlichen Verkehr (knapp 3%).

Die Kosten hängen in erster Linie von den gefahrenen Kilometern ab. Für einen Vergleich der Verkehrsmittel sind daher die durchschnittlichen Kosten pro Personenkilometer bzw. pro Tonnenkilometer relevant.

Abbildung K-6: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Strassenverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen und Fahrzeugkategorien

Externe Effekte	Personenverkehr										Güterverkehr						Gesamt
Strassenverkehr	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr							total
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	Tr/Arbm	
Gesundheit Luft	3'007	60	51	43	2	9	0	0	0	212	20	8	341	271	592	0	4'616
Gebäude Luft	132	3	2	2	0	0	0	0	0	9	1	0	15	12	26	0	202
Ernteaussfälle Luft	33	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	9	4	2	0	52
Waldschäden Luft	31	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	9	4	2	0	49
Biodiversitätsverluste Luft	53	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	12	6	3	0	78
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	3'786	39	86	2	0	0	0	0	0	131	0	0	477	359	349	0	5'230
Natur und Landschaft	720	7	13	0	4	1	13	0	18	21	1	1	70	50	52	0	971
Bodenschäden	67	3	1	0	0	0	0	0	0	7	1	0	18	31	24	0	154
Vor- und nachgelagerte Prozesse	3'081	58	65	1	1	3	12	0	0	44	6	5	212	482	282	0	4'253
Unfälle	2'596	17	477	40	25	101	518	21	105	44	5	14	218	99	68	78	4'426
Abzug LSVA-Anteil	-9	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-285	-259	0	-556
Total aller Kostenbereiche (mit LSVA Abzug)	13'497	187	697	88	33	114	542	22	123	476	34	28	1'381	1'033	1'142	78	19'476
Externe Kosten Rp / pkm bzw. tkm (mit LSVA Abzug)	17	6	38	105	22	24	25	17	3	20	8	3	156	15	12	k.W.	
Externe Gesundheitsnutzen					-36	-293	-1'123	0	-4'165								-5'617
Externe Gesundheitsnutzen Rp / pkm					-25	-61	-52	0	-98								

Beim Strassenverkehr sind die Klimakosten am grössten (27% der externen Kosten), dann folgen die gesundheitlichen Kosten durch Luftverschmutzung (24%), die Unfälle (23%) und die vor- und nachgelagerten Prozesse (22%).

Beim Fuss- und Veloverkehr machen die Unfälle 92% der externen Kosten aus. Der Rest setzt sich aus mit der Infrastruktur verbundenen Kosten (Natur und Landschaft, vor- und nachgelagerte Prozesse) und der Luftverschmutzung durch Elektrovlos (Abriebemissionen) zusammen.

Differenzierung nach Antriebsart

Die Differenzierung nach Antriebsart zeigt, dass die Elektromobilität (ausser schnelle und langsame E-Bikes beim Veloverkehr) noch eine sehr geringere Rolle spielt. 2021 sind knapp 1% der externen Kosten des motorisierten Strassenverkehrs durch E-Fahrzeuge verursacht. Das Potenzial zur Verringerung der externen Effekte durch die Elektromobilität ist gross: Wenn z.B. alle Personenwagen (PW) elektrisch betrieben würden, könnten die Klimakosten vermieden werden, während die vor- und nachgelagerten Prozesse um 23% zunehmen würden (Batterien, etc.), was eine Nettoerduktion von gut 3 Mrd. CHF, d.h. 23% der externen Kosten von PW bedeuten würde. Im Bereich der Luftverschmutzung gibt es ebenfalls ein Reduktionspotenzial. Elektro-PW weisen knapp 6.5% tiefere direkte Emissionen (inkl. Abriebemissionen) von PM₁₀ auf als fossil angetriebene PW.

Sicht Verkehrsart Schwerverkehr

Die Sicht Verkehrsart Schwerverkehr und deren konkrete Auslegung für die Berechnung des Deckungsgrades des Schwerverkehrs via LSVA wurde vom Bundesgericht vorgeschrieben.² Mit dieser Sichtweise werden die Kosten bestimmt, die der Schwerverkehr den anderen Verkehrsteilnehmenden und der Allgemeinheit auferlegt. Dies führt zu folgendem Unterschied im Vergleich zu den externen Effekten aus Sicht Verkehrsteilnehmende, die in diesem Bericht im Zentrum stehen: Die Unfallkosten, die durch ein Fahrzeug des Schwerverkehrs verursacht und von einem anderen Fahrzeug des Schwerverkehrs getragen werden, sind bei der Sicht Verkehrsart nicht extern. Abbildung K-7 zeigt die externen Kosten aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr. Im Vergleich zu den oben dargestellten Zahlen (Abbildung K-6) sind die Unfallkosten 6% niedriger.

Für einen Überblick über die Kostendeckung des Schwerverkehrs, einschliesslich der Infrastruktur- und Staukosten sowie aller Einnahmen, die vom Schwerverkehr gezahlt werden, siehe das Faktenblatt auf der BAV-Website.³

Abbildung K-7: Externe Kosten aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen und Fahrzeugkategorien

Externe Kosten Sicht Verkehrsart Strassenverkehr	Gesellschafts- wagen	Lastwagen	Sattelschlepper	Total Schwerverkehr
Gesundheit Luft	60.0	271.2	591.9	923.1
Gebäude Luft	2.6	11.8	25.8	40.2
Ernteaussfälle Luft	0.6	4.5	2.3	7.3
Waldschäden Luft	0.6	4.1	2.1	6.8
Biodiversitätsverluste Luft	0.8	5.9	3.1	9.7
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	39.4	359.0	349.3	747.7
Natur und Landschaft	6.9	49.9	51.8	108.7
Bodenschäden	3.3	31.1	24.0	58.4
Vor- und nachgelagerte Prozesse	58.3	481.8	282.4	822.5
Unfälle	8.4	96.8	67.3	172.5
Zwischentotal aller Kostenbereiche	180.9	1'316.1	1'399.9	2'896.9
Abzug LSVA-Anteil	-2.9	-285.3	-259.0	-547.2
Total aller Kostenbereiche (mit LSVA Abzug)	178.0	1'030.9	1'140.9	2'349.7

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

c) Schienenverkehr

Beim Schienenverkehr entfallen zwei Drittel der externen Kosten (ohne Lärm) auf den Personenverkehr, ein Drittel auf den Güterverkehr. Die Struktur nach Kostenbestandteil ist anders

² Bundesgericht, Urteil vom 17. Dezember 2011, LSVA, Abklassierung EURO-3.

³ Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe (LSVA) - BAV

Abbildung K-8: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Schienenverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen und Verkehrsart

Externe Kosten in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Schieneverkehr			
Gesundheit Luft	706.5	333.7	1'040.2
Gebäude Luft	30.8	14.5	45.3
Ernteauffälle Luft	0.2	0.6	0.8
Waldschäden Luft	0.2	0.6	0.8
Biodiversitätsverluste Luft	0.2	0.8	1.0
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	2.5	9.4	11.9
Natur und Landschaft	101.2	32.3	133.5
Bodenschäden	31.2	4.2	35.4
Vor- und nachgelagerte Prozesse	47.3	53.7	101.0
Unfälle	23.9	11.9	35.9
Total	944.0	461.9	1'405.9
Kosten in Rp/pkm (PV) bzw. Rp/tkm (GV)	5.6	4.5	

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

als beim Strassenverkehr: Klimakosten sind praktisch keine vorhanden und die Unfallkosten sind gering. Die grössten Kostenbestandteile sind die Gesundheitsschäden durch Luftverschmutzung (74%), Schäden an Natur und Landschaft (9%) sowie vor- und nachgelagerte Prozesse (7%).

Die Kosten pro pkm und tkm sind niedriger als bei den meisten Verkehrsmitteln auf der Strasse ausser Tram und zu Fuss.

d) Luftverkehr

Abbildung K-9 zeigt die externen Kosten des Luftverkehrs. Davon sind 86% auf den Personenverkehr zurückzuführen. Der Klimabereich ist der grösste Kostenbestandteil, sein Anteil ist mit 77% deutlich höher als bei den anderen Verkehrsträgern (30% über alle Verkehrsträger). Die Kosten für vor- und nachgelagerte Prozesse machen 18% aus. Die anderen Kostenbestandteile, die mit der lokalen Luftverschmutzung und der Landnutzung zusammenhängen, sind gering. Unfälle sind ebenfalls selten.

Die externen Kosten des Luftverkehrs pro pkm sind beim Personenverkehr niedriger als bei Personenwagen, was vor allem auf die langen Distanzen und die hohe Auslastung der Flugzeuge zurückzuführen ist. Sie liegen jedoch über den externen Kosten pro pkm im Schienenverkehr, vor allem aufgrund der Klimakosten. Beim Güterverkehr sind die externen Kosten des Luftverkehrs pro tkm gut zweieinhalb Mal höher als bei Lastwagen und achtmal höher als beim Schienenverkehr, da die Frachtlast (Gewicht) beim Luftverkehr gering ist.

Abbildung K-9: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Luftverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen und Verkehrsart

Externe Kosten in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Luftverkehr			
Gesundheit Luft	60.6	6.1	66.6
Gebäude Luft	2.6	0.3	2.9
Ernteaussfälle Luft	1.3	0.2	1.4
Waldschäden Luft	1.2	0.2	1.4
Biodiversitätsverluste Luft	1.7	0.2	1.9
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	1'518.2	238.9	1'757.1
Natur und Landschaft	6.6	0.8	7.3
Bodenschäden	-	-	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	346.3	61.6	407.9
Unfälle	21.2	0.7	21.8
Total	1'959.5	308.8	2'268.3
Kosten in Rp/pkm (PV) bzw. Rp/tkm (GV)	12.2	35.5	

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

e) Schiffsverkehr

Abbildung K-10 zeigt die externen Kosten des Schiffsverkehrs, aufgeteilt nach Personen- und Güterverkehr, und innerhalb des Güterverkehrs, zwischen der Schifffahrt auf dem Rhein und dem Rest. Im Gegensatz zu allen anderen Verkehrsträgern ist der Güterverkehr hier mit 54% der externen Kosten wichtiger als der Personenverkehr.

Gesundheitsschäden aufgrund von Luftverschmutzung machen mehr als 70% der Kosten aus. Die Klimakosten haben einen Anteil von knapp 15%, was halb so hoch ist wie beim Total über alle Verkehrsträger. 5% der externen Kosten sind auf die vor- und nachgelagerten Prozesse zurückzuführen. Die anderen Kostenbestandteile liegen unter 10 Mio. CHF.

Abbildung K-10: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Schiffsverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen und Verkehrsart

Externe Kosten in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	davon Rhein	Übrige	Total
Schiffsverkehr					
Gesundheit Luft	103.6	111.2	71.8	39.4	214.8
Gebäude Luft	4.5	4.8	3.1	1.7	9.3
Ernteaussfälle Luft	1.5	2.3	1.8	0.5	3.8
Waldschäden Luft	1.4	2.1	1.7	0.4	3.5
Biodiversitätsverluste Luft	1.9	2.9	2.3	0.6	4.8
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	23.1	21.7	13.6	8.1	44.8
Natur und Landschaft	0.9	4.6	4.5	0.1	5.4
Bodenschäden	-	-	-	-	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	2.0	11.8	11.6	0.2	13.8
Unfälle	0.2	0.8	0.8	0.0	1.0
Total	139.2	162.2	111.3	51.0	301.4
Kosten in Rp/pkm (PV) bzw. Rp/tkm (GV)	114.3	8.8	6.1	138.7	

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

f) Räumliche Differenzierungen

Externe Kosten nach Kantonen

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung der externen Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs auf die Kantone. Je nach Kostenbestandteil fand diese Aufteilung über kantonal differenzierte Emissionen, Immissionen oder (gewichtete) Fahrleistung der Fahrzeugkategorien statt. Die letzte Spalte zeigt die externen Kosten (verursacht durch den Verkehr) pro Einwohner/in, um unterschiedlich grosse Kantone vergleichen zu können. Der Schweizer Durchschnitt liegt bei 2'450 CHF. Städtische Kantone wie Basel-Stadt und Genf haben besonders niedrige Kosten pro Einwohner (ca. 1'400 respektive 1'600 CHF pro Einwohner). Niedrige Durchschnittskosten finden sich auch in Kantonen, in denen im Verhältnis weniger Güter auf der Strasse transportiert werden, wie Appenzell Inner- und Ausserrhoden und Schaffhausen. Die durchschnittlichen externen Kosten sind am höchsten in den Alpenkantonen (Uri über 5'000 CHF, Tessin, Glarus und Nidwalden über 3'000 CHF), bei denen der Anteil des Güterverkehrs hoch ist.

Abbildung K-11: Externe Kosten im Strassen- und Schienenverkehr 2021: Aufteilung auf Kantone und Fahrzeugkategorien (ohne Abzug LSVA und Lärm)

Externe Kosten in Mio. CHF	Strassenverkehr													Schienenverkehr			Gesamttotal	Durchschnitt CHF pro Einwohner	Gesundheits- nutzen FVW		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Personenverkehr					Güterverkehr				Total Strasse	Personen- verkehr	Güter- verkehr				Total	
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Öffentlicher Personenverkehr Bus (inkl. Trolley)	Li	LW	SS								
Zürich	2'056	32	108	19	7	25	104	4	23	88	11	203	195	207	3'083	169	34	203	3'285	2'107	1'070
Bern	1'658	24	89	10	4	13	64	2	14	53	3	168	158	169	2'430	156	74	229	2'659	2'544	627
Luzern	711	11	38	4	1	5	22	1	5	31	0	67	77	86	1'059	40	5	46	1'104	2'640	225
Uri	99	2	4	0	0	0	2	0	0	4	0	10	26	27	175	7	14	21	197	5'323	18
Schwyz	305	4	16	1	0	1	7	0	2	9	0	29	23	24	421	24	19	43	464	2'845	84
Obwalden	55	1	3	0	0	0	2	0	0	1	0	6	4	4	76	4	0	5	80	2'097	18
Nidwalden	81	2	4	0	0	0	2	0	1	2	0	10	13	14	128	3	0	3	132	3'014	23
Glarus	75	1	4	0	0	0	2	0	1	2	0	11	9	10	117	6	2	8	125	3'045	25
Zug	197	2	10	1	0	2	8	0	2	10	0	19	12	12	277	12	4	16	293	2'269	98
Freiburg	508	7	26	3	1	4	18	1	4	14	0	46	50	53	733	32	4	36	770	2'349	168
Solothurn	449	10	24	3	1	3	17	1	4	16	0	48	74	79	728	31	33	64	792	2'839	167
Basel-Stadt	152	2	8	3	1	3	17	1	4	16	5	11	15	19	256	8	5	14	270	1'376	178
Basel-Land	422	8	21	3	1	4	20	1	4	14	3	49	58	62	670	25	21	46	716	2'453	193
Schaffhaus	97	1	6	1	0	1	5	0	1	6	0	9	8	9	145	9	0	9	154	1'843	53
Appenzell	72	1	5	0	0	1	3	0	0	2	0	7	3	3	96	6	0	6	103	1'854	23
Appenzell	17	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1	23	2	0	2	25	1'560	7
St. Gallen	984	14	49	5	2	6	32	1	7	38	0	114	97	101	1'449	54	13	67	1'515	2'932	315
Graubünd	342	6	17	1	0	2	10	0	2	17	0	46	40	40	524	36	18	54	578	2'878	106
Aargau	1'227	19	65	6	2	8	37	1	8	40	0	130	147	159	1'848	80	83	163	2'011	2'879	383
Thurgau	446	6	25	2	1	3	15	1	3	10	0	40	39	44	634	32	8	40	675	2'371	146
Tessin	772	10	39	3	1	4	22	1	6	24	0	72	85	88	1'126	31	47	78	1'204	3'424	249
Vaud	1'399	16	65	9	3	12	53	2	12	35	1	145	107	108	1'968	89	36	126	2'094	2'557	564
Wallis	475	6	25	3	1	3	18	1	5	24	0	52	38	41	690	41	23	64	754	2'149	199
Neuenbur	252	2	12	2	1	2	11	1	3	10	0	25	12	13	345	20	14	33	378	2'148	135
Genf	531	3	31	8	3	11	49	2	11	42	4	53	18	20	786	15	4	19	805	1'586	501
Jura	126	1	6	1	0	1	4	0	1	3	0	9	8	8	168	9	1	9	177	2'395	41
Total	13'506	190	697	88	33	114	542	22	123	510	28	1'381	1'318	1'401	19'954	944	462	1'406	21'360	2'454	5'617

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrradähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Samstagskleiner, FVW = Fuss- und Veloverkehr.

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, faG = fahrfähiges Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, FVW = Fuss- und Veloverkehr.

Externe Kosten durch Luftverschmutzung nach Raumtyp

Für die durch den Strassen- und Schienenverkehr verursachten Gesundheitskosten der Luftverschmutzung (5.7 Mrd. CHF) und Gebäudeschäden (0.2 Mrd. CHF) konnte die Differenzierung nach Urbanisierungsgrad der Gemeinden (3 Kategorien nach DEGURBA⁴) ermittelt werden.

Abbildung K-12 zeigt die aufgeteilten Kosten für den Strassen- und Schienenverkehr. 55% der Kosten von Gesundheits- und Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung fallen in mitteldicht besiedelten Gebieten an, 24% in dicht besiedelten Gebieten und 21% in gering besiedelten Gebieten. Der untere Teil der Tabelle zeigt zum Vergleich den Anteil der Fahrleistung in jedem Raumtyp. In der rechten Spalte werden die Kosten auf die Wohnbevölkerung bezogen, deren Anteile in jedem Raumtyp unten rechts angegeben sind.

Der Anteil an den externen Kosten ist in dicht besiedelten Gebieten höher als der Anteil an den Fahrleistungen, aber tiefer als der Bevölkerungsanteil. Dies ist auf höhere Schäden aufgrund der dichten Besiedelung bzw. tiefere Kosten aufgrund der kurzen Distanzen zurückzuführen. In mitteldicht und gering besiedelten Gebieten verhält es sich genau umgekehrt.

Abbildung K-12: Externe Effekte Luftverschmutzung (Gesundheit und Gebäude) im Strassenverkehr 2021: Aufteilung nach Raumtyp und Fahrzeugkategorie

Externe Kosten in Mio. CHF	Strassenverkehr												Schienenverkehr		Gesamt- total Mio CHF	Durch- schnitt CHF pro Einwoh- ner
	Personenverkehr								Güterverkehr			Total	Per- sonen- verkehr	Güter- verkehr		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr		Öffentlicher Personenverkehr		Li	LW	SS					
PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Bus (inkl. Trolley)	Tram									
dicht besiedelt	757	14	13	20	1	4	101	8	84	56	121	1'179	183	45	1'406	544
mitteldicht besiedelt	1'705	35	29	20	1	4	113	0	206	162	353	2'628	401	221	3'250	728
gering besiedelt	677	14	11	4	0	1	29	0	66	66	143	1'012	154	82	1'248	802
Total	3'140	63	53	45	2	9	242	8	356	283	618	4'818	737	348	5'904	686
Anteil dicht besiedelt	24%	22%	25%	45%	45%	45%	42%	96%	24%	20%	20%	24%	25%	13%	24%	
Anteil mitteldicht besiedelt	54%	55%	54%	45%	45%	45%	47%	4%	58%	57%	57%	55%	54%	63%	55%	
Anteil gering besiedelt	22%	23%	22%	10%	10%	10%	12%	0%	19%	23%	23%	21%	21%	24%	21%	
Vergleichsgrössen	Anteil Fzkm Strassenverkehr												Anteil Zugkm		Anteil Bevölkerung	
dicht besiedelt	19%	17%	19%	43%	43%	43%	34%	95%	19%	17%	13%	19%	19%	10%	30%	
mitteldicht besiedelt	56%	59%	56%	49%	49%	49%	45%	5%	59%	59%	61%	56%	54%	60%	52%	
gering besiedelt	25%	25%	25%	7%	7%	7%	21%	0%	22%	25%	26%	24%	27%	30%	18%	

PW = Personnenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

⁴ Europäischer Urbanisierungsgrad - Degree of Urbanisation (DEGURBA) (Politische Gemeinden) | Bundesamt für Statistik (admin.ch)

Résumé

Contexte et objectif

Les effets externes des transports font partie intégrante de la statistique « **Coûts et financement des transports** » (CFT) publiée par l'Office fédéral de la statistique (OFS). Cette vue d'ensemble constitue une base importante pour la politique des transports. En outre, les coûts externes du trafic lourd sont, entre autres aspects, pertinents pour calculer le tarif de la **redevance poids lourds liée aux prestations (RPLP)**.

Les effets externes des transports sont présentés chaque année par l'Office fédéral du développement territorial (ARE) et doivent être calculés de manière **transparente et en fonction de l'état des connaissances scientifiques** (cf. art. 7, al. 3, de la loi relative à une redevance sur le trafic des poids lourds (LRPL)). Afin de garantir l'actualité de la méthode de calcul, l'ARE en mandate régulièrement le réexamen. Le présent rapport documente ce réexamen, présente les résultats pour l'**année de référence 2021** et procède aux **calculs rétroactifs correspondants jusqu'en 2010**. Ces travaux font suite aux rapports méthodologiques pour les années 2010 (Ecoplan ; INFRAS (2014)) et 2015 (INFRAS ; Ecoplan (2019)).

Dans le cadre de la présente révision méthodologique, les effets externes des transports ont été actualisés de sorte à refléter l'état actuel des connaissances scientifiques. Les **bases de données (structures quantitatives), les relations de causalité et les taux de coûts ont notamment été mis à jour**. Par exemple, de nouvelles pathologies (cancer des poumons, diabète et démence) causées par la pollution atmosphérique ont été intégrées dans les calculs ou le coût climatique a été actualisé. Les autres nouveautés sont les suivantes :

- L'**approche « usager du mode de transport »** devient centrale (l'approche « mode de transport » n'est plus calculée) ;
- Les domaines de coûts pertinents ont été révisés et adaptés ; le domaine « coûts supplémentaires dans les espaces urbains » n'est plus calculé, les « **coûts liés à la surcharge de l'infrastructure de transport** » sont dès à présent intégrés dans la publication consacrée aux effets externes ;
- Enfin des différenciations supplémentaires ont été introduites : résultats séparés pour la **mobilité électrique**, en fonction du **type de commune** (urbaine, intermédiaire, rurale) et du **canton**.

L'ARE a pu compter sur le soutien financier de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et des 26 cantons. Quant au contenu du projet, il a bénéficié du suivi de l'OFS et des offices fédéraux des routes (OFROU), des transports (OFT), de l'aviation civile (OFAC), de l'environnement (OFEV) et de l'énergie (OFEN). Des experts internationaux (voir impressum) ont validé le concept retenu.

Définition, délimitation et méthode de calcul

a) Définition

En économie, une externalité est définie comme un effet négatif ou positif causé par une activité de transport, mais qui n'est pas inclus dans le prix du marché correspondant et qui n'est donc pris en compte ni au niveau de la demande (consommateur) ni à celui de l'offre (producteur). La délimitation entre les effets privés (qui affectent directement l'utilisateur du mode de transport qui en est à l'origine) et les effets externes intervient au niveau de l'*unité* qui prend les décisions en matière de mobilité, c'est-à-dire de l'individu ou de l'entreprise (approche « usager du mode de transport »).⁵ Les **coûts externes** des transports comprennent par exemple les coûts liés à la pollution atmosphérique ou au bruit. Quant aux **bénéfices externes** des transports, ils se limitent aux déplacements à pied et à vélo (mobilité douce), importants pour la santé, et doivent en conséquence être pris en compte dans l'étude. Indubitablement, les transports sont à bien des égards bénéfiques, et ce, non seulement pour la santé. Il ne s'agit toutefois pas d'externalités selon l'approche « usager du mode de transport » (voir encadré page 55).

Pour calculer la couverture des coûts du trafic des poids lourds (exigences de la LRPL et de l'arrêt du Tribunal fédéral du 17 décembre 2011), les coûts externes sont calculés en plus selon l'approche « catégorie trafic ». Avec cette approche, le trafic lourd est considéré comme un groupe, c'est-à-dire que les coûts sont définis comme externes lorsqu'ils sont causés par le trafic lourd, mais qu'ils ne sont pas payés par celui-ci. Si l'on compare avec l'approche « usager du mode de transport », les coûts des accidents engendrés par un véhicule du trafic lourd et supportés par un autre véhicule du trafic lourd sont retranchés.

b) Délimitations

Délimitation spatiale

- Route et rail : principe de territorialité

Tous les kilomètres parcourus sur l'infrastructure de transport suisse sont pris en compte, indépendamment du fait que le véhicule est immatriculé en Suisse ou non. Le même principe s'applique à la répartition par canton et par type de territoire.

- Avion et bateau : principe du demi-trajet

Pour tous les effets liés aux prestations, la moitié de la distance parcourue en avion ou en bateau au départ ou à destination de la Suisse est comptabilisée. Les points de départ et d'arrivée sont déterminés en fonction du véhicule et non du passager ou de la marchandise transportée.

⁵ Jusqu'à présent, on privilégiait l'approche « mode de transport » (route, rail, avion et bateau), donc une externalité se référant à un groupe d'utilisateurs. Cela signifie par exemple que les coûts occasionnés par un cycliste ou supportés par un piéton n'étaient pas comptés comme externes, car tous deux étaient des usagers de la route. L'approche « mode de transport » ne reflète pas les décisions individuelles en matière de transport et n'est donc plus calculée.

Délimitation dans le temps

- Les kilomètres parcourus en 2021 ou les coûts et bénéfices générés en 2021 sont pris en compte. Cela inclut également les coûts qui n'interviennent qu'ultérieurement, mais qui ont été causés en 2021 — un exemple typique est celui des coûts consécutifs aux accidents de la route en 2021 (p. ex. manques à gagner dus à l'invalidité d'une victime d'accident).
- Concernant les processus amont et aval, on prend en compte les émissions annualisées (c.-à-d. liées à une année d'utilisation) qui ont été ou seront occasionnées pendant toute la durée de vie du véhicule, de l'infrastructure et de la fourniture d'énergie.

c) Méthodes de calcul

En économie, il existe différentes approches pour calculer les externalités. Les coûts et bénéfices externes des transports sont, si possible, calculés en valeurs monétaires selon l'**approche du coût des dommages** : il s'agit d'évaluer les dommages occasionnés par l'activité de transport (p. ex. en lien avec la pollution de l'air, le bruit ou des accidents). Si cela n'est manifestement pas possible, on recourt à d'autres approches :

- Coûts d'évitement : investissement nécessaire de la société pour des mesures destinées à empêcher l'apparition des dommages
- Coûts de réparation ou de remplacement : frais pour réparer ou compenser les dommages causés.

Concrètement, les informations suivantes sont par exemple utilisées pour quantifier les valeurs monétaires :

- prix pertinents et observables sur le marché, tels que les coûts salariaux ;
- prix sur les marchés connexes, comme l'impact du bruit sur les prix des logements (préférences révélées) ;
- Propension des personnes à payer, fondée sur des enquêtes, comme la volonté de payer pour réduire le risque de mortalité (préférences déclarées).

L'estimation des effets externes implique d'émettre des hypothèses et d'accepter les incertitudes, compte tenu des données disponibles, des relations de causalité qui ne sont pas faciles à élucider et de certains coûts qui dépendent de développements futurs. Pour éviter de surestimer les effets externes, nous utilisons toujours l'approche « at least » lorsqu'une valeur « best guess » évidente n'existe pas (voir chapitre 3.3). Les résultats doivent donc être interprétés comme des ordres de grandeur et des analyses de sensibilité sont effectuées pour les principaux paramètres.

Principaux changements par rapport aux calculs précédents

Dans le cadre de ce projet, les **bases de données (structures quantitatives), les relations de causalité et les taux de coûts ont été mis à jour**. Les plus importants sont les suivants (listés selon leur ordre d'apparition dans le rapport) :

- L'exposition de la population aux polluants émis par la circulation calculée à l'aide du modèle PolluMap de l'OFEV (voir chapitre 4.2.1)
- Les relations de causalité dans le domaine de la santé basées sur les études épidémiologiques les plus récentes (voir chapitres 4.2.2 et 15.3.1)
- Les coûts unitaires dans le domaine de la santé, y compris pour les maladies nouvellement prises en compte comme la démence, le diabète et le cancer des poumons (voir chapitres 4.4.1 et 20.5)
- Les facteurs d'émission pour tous les véhicules et polluants, différenciés selon le mode de propulsion, selon la dernière version du Manuel des facteurs d'émission (HBEFA, voir chapitres 4.5 et 20.2)
- L'impact climatique des émissions hors CO₂ dans l'aviation, qui est désormais basé sur l'évolution réelle de ces émissions et non plus sur un facteur de conversion fixe qui était appliqué aux émissions de CO₂ (voir chapitre 10.2.3)
- Le coût climatique, calculé selon la méthode du coût des dommages avec le nouveau modèle GIVE reconnu au niveau international et adapté au niveau des revenus et prix suisses (voir chapitre 10.4). Il remplace l'ancien coût climatique, qui était basé sur les coûts d'évitement avec un objectif de réduction datant de 2009.
- Les facteurs d'émission de Mobitool pour les processus amont et aval, pour tous les véhicules, types de propulsion et polluants (voir chapitre 11.3)
- La répartition des victimes d'accidents de la route entre les responsables est désormais directement calculée à partir des données de l'Office fédéral des routes (OFROU) (voir chapitre 14.3.1a)
- L'estimation du nombre total d'accidents (y c. chiffres noirs) est réalisée à l'aide d'une simple régression basée sur les données des années précédentes du Bureau suisse de prévention des accidents (bpa) et de l'OFROU (voir chapitre 14.3.1b). Cette procédure permettra d'avancer de presque une année la date de publication des résultats des effets externes des transports.

Faute de disposer des données de référence, les coûts du bruit n'ont pas été révisés. Dans les comparaisons suivantes avec l'ancienne méthode, ils sont donc identiques avant et après la révision de la méthode. Le rapport sera complété par les chiffres relatifs au bruit dès qu'ils seront disponibles.

La Abbildung K-1 montre l'impact de la révision de la méthode sur les résultats pour l'année 2021, par domaine de coût et par mode de transport. Au total, les ajustements apportés aux méthodes entraînent une augmentation considérable des coûts, de 69 % au total. Environ trois quarts de l'augmentation sont dus au relèvement du coût climatique (domaines du climat et processus amont et aval), le reste étant majoritairement dû à l'augmentation des coûts de la santé liés à la pollution atmosphérique (nouvelles pathologies et incidence plus élevée, malgré l'amélioration de la qualité de l'air mesurée par le modèle d'immission PolluMap).

Figure K-13 : Coûts et bénéfices externes des transports en 2021 selon l'approche « usager du mode de transport », avec ancienne et nouvelle méthode, variation relative et absolue des résultats, par mode de transport et par domaine de coût (bruit sans modification, toujours avec l'ancienne méthode de calcul)

Transport par la route / par le rail : principe de territorialité ; transport aérien / par bateau : principe du demi-trajet
Les bénéfices apparaissent sous forme de chiffres négatifs

Route

Comparaison ancienne et nouvelle méthode Calcul 2021 (en Mio de CHF)	Précédent calcul	Nouveau calcul	Changement en %	Changement en Mio de CHF
Transport routier				
Pollution air - santé	2'847	4'616	62%	1'769
Pollution air - bâtiments	223	202	-9%	-21
Pollution air - pertes de récoltes	44	52	19%	8
Pollution air - dommages aux forêts	47	49	4%	2
Pollution air - pertes de biodiversité	81	78	-4%	-3
Bruit*	2'113	2'113	0%	-
Climat	1'593	5'230	228%	3'637
Nature et paysage	1'150	971	-16%	-178
Dommages aux sols	145	154	6%	9
Processus amont et aval	1'227	4'253	246%	3'025
Accidents	4'180	4'426	6%	246
Coûts supplémentaires dans les espaces urbains	207	-	-100%	-207
RPLP	-556	-556	0%	-
Total avec déduction RPLP	13'301	21'589	62%	8'287
<i>Bénéfices santé mobilité douce</i>	<i>-1'522</i>	<i>-5'617</i>	<i>269%</i>	<i>-4'095</i>

Rail

Comparaison ancienne et nouvelle méthode Calcul 2021 (en Mio de CHF)	Précédent calcul	Nouveau calcul	Changement en %	Changement en Mio de CHF
Transport ferroviaire				
Pollution air - santé	367	1'040	183%	673
Pollution air - bâtiments	29	45	58%	17
Pollution air - pertes de récoltes	1	1	12%	0
Pollution air - dommages aux forêts	1	1	6%	0
Pollution air - pertes de biodiversité	1	1	-1%	-0
Bruit*	417	417	0%	-
Climat	4	12	210%	8
Nature et paysage	136	134	-2%	-3
Dommages aux sols	31	35	13%	4
Processus amont et aval	80	101	27%	21
Accidents	36	36	0%	-0
Coûts supplémentaires dans les espaces urbains	39	-	-100%	-39
Total	1'141	1'823	60%	682

Transport aérien

Comparaison ancienne et nouvelle méthode Calcul 2021 (en Mio de CHF)	Précédent calcul	Nouveau calcul	Changement en %	Changement en Mio de CHF
Transport aérien				
Pollution air - santé	23	67	195%	44
Pollution air - bâtiments	2	3	47%	1
Pollution air - pertes de récoltes	1	1	12%	0
Pollution air - dommages aux forêts	1	1	2%	0
Pollution air - pertes de biodiversité	2	2	-1%	-0
Bruit*	69	69	0%	-
Climat	561	1'757	213%	1'197
Nature et paysage	7	7	0%	-0
Dommages aux sols	-	-	0%	-
Processus amont et aval	130	408	214%	278
Accidents	22	22	-1%	-0
Total	818	2'337	186%	1'519

Bateau

Comparaison ancienne et nouvelle méthode Calcul 2021 (en Mio de CHF)	Précédent calcul	Nouveau calcul	Changement en %	Changement en Mio de CHF
Bateau				
Pollution air - santé	73	215	195%	142
Pollution air - bâtiments	6	9	63%	4
Pollution air - pertes de récoltes	3	4	12%	0
Pollution air - dommages aux forêts	3	4	6%	0
Pollution air - pertes de biodiversité	5	5	-1%	-0
Bruit*	-	-	0%	-
Climat	14	45	210%	30
Nature et paysage	5	5	0%	-0
Dommages aux sols	-	-	0%	-
Processus amont et aval	4	14	285%	10
Accidents	1	1	4%	0
Total	115	301	163%	187

Principaux résultats

a) Synthèse des résultats

La Abbildung K-2 montre les coûts et bénéfices externes totaux par mode de transport (sans le bruit). La route représente la plus grande part (83 %). Ce mode de transport est également le plus utilisé, puisqu'il représente un peu plus des trois quarts des personnes-kilomètres pris en compte dans les calculs et près de 60 % des tonnes-kilomètres. La part du transport aérien dans les coûts externes s'élève à près de 10 %, celles du transport ferroviaire et par bateau à respectivement 6 % et 1 %. Tous modes de transport confondus, le transport de marchandises est à l'origine de 19 % des coûts externes (après déduction de RPLP).

Les bénéfices externes pour la santé de la mobilité douce s'élèvent à 5,6 milliards de francs, ce qui correspond à près de 7 fois ses coûts externes (surtout les coûts des accidents).

Figure K-14 : Effets externes selon l'approche « usager du mode de transport » en 2021 (sans le bruit, avec déduction de la RPLP)

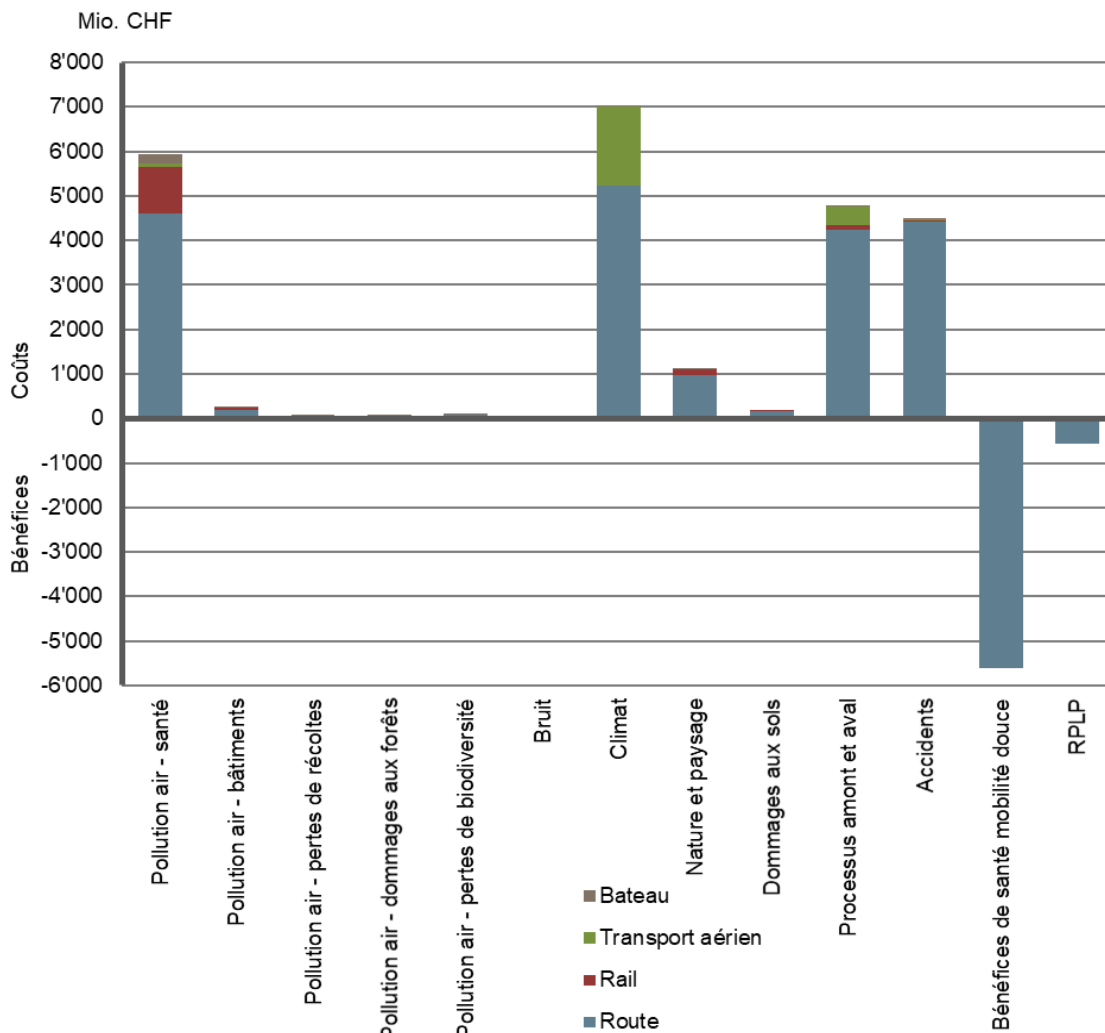
Transport par la route / par le rail : principe de territorialité ; transport aérien / par bateau : principe du demi-trajet
Les bénéfices apparaissent sous forme de chiffres négatifs

Coûts externes en Mio de CHF	Transport de personnes	Transport de marchandises	Total
Route	15'842.6	3'633.2	19'475.8
Rail	944.0	461.9	1'405.9
Transport aérien	1'959.5	308.8	2'268.3
Bateau	139.2	162.2	301.4
Total des coûts externes	18'885.3	4'566.1	23'451.4
en % du total	80.5%	19.5%	100.0%
<i>Bénéfices de santé mobilité douce</i>	-5'617.2		-5'617.2

La Abbildung K-3 présente les coûts et les bénéfices externes. Le plus grand domaine de coût, tous modes de transport confondus, est le climat, avec 7,0 milliards de francs. Viennent ensuite les coûts de santé liés à la pollution atmosphérique avec 5,9 milliards, les processus amont et aval avec 4,8 milliards, les accidents avec 4,5 milliards et les dommages à la nature et au paysage avec 1,1 milliard. Les autres domaines de coûts sont tous inférieurs à 0,3 milliard de francs.

Figure K-15 : Effets externes selon l'approche « usager du mode de transport » en 2021 par domaines de coût (sans le bruit)

Transport par la route / par le rail : principe de territorialité ; transport aérien / par bateau : principe du demi-trajet
Les bénéfices et les parts des coûts internalisés apparaissent sous forme de chiffres négatifs.



Coûts sociaux, bénéfices sociaux pour la santé, montants d'internalisation

Les coûts sociaux liés à l'environnement, à la santé et aux accidents s'élèvent à 37 milliards de francs. La différence de 13,5 milliards de francs avec les coûts externes consiste en coûts supportés directement par la personne qui en est à l'origine. Sont donc considérés comme coûts sociaux, mais pas comme coûts externes, près de 13 milliards de francs de coûts privés liés aux accidents (coûts immatériels pour l'auteur de l'accident, cotisations d'assurance), les contributions d'internalisation par le biais de la RPLP (556 mio CHF), les taxes d'atterrissage liées aux émissions (un peu plus de 2 mio CHF), les sanctions pour dépassement des prescriptions concernant les émissions de CO₂ pour les voitures de tourisme et véhicules utilitaires

légers (un peu moins de 36 mio CHF) et l'obligation de compenser les émissions de CO₂ pour les importateurs de carburants fossiles (un peu plus de 110 mio CHF).

Les bénéfices sociaux pour la santé inhérents à la mobilité douce s'élèvent à 57 milliards de francs. Outre les bénéfices externes (5,6 mia CHF), ils comprennent également les bénéfices privés dont les piétons et les cyclistes profitent directement, notamment les bénéfices immatériels des années de vie gagnées (48 mia CHF). Les bénéfices sociaux en termes de santé de la mobilité douce ont été calculés en tant qu'étape intermédiaire afin de démontrer les bénéfices externes. Les bénéfices sociaux d'autres types de mobilité et pour d'autres modes de transport n'ont pas été monétarisés dans le cadre de ce projet (voir encadré p. 55).

Analyses de sensibilité

La Abbildung K-4 présente les principales analyses de sensibilité effectuées. La fourchette la plus large a été calculée pour le coût climatique (voir chapitre 10.4.1), ce qui fait que les résultats pourraient être bien deux fois plus élevés ou 35 % plus bas. La fourchette est moins large pour les autres sensibilités. Les sensibilités pour les estimateurs d'effet de la pollution atmosphérique sur les coûts de la santé et la sensibilité pour la valeur de la vie statistique (VOSL) font varier les coûts externes de 12 à 16 % (voir chapitre 19.5). L'analyse de sensibilité sur les émissions hors CO₂ de l'aviation (voir 10.4.2) entraîne une augmentation de 7 % (soit 1,7 mia CHF) des coûts externes totaux.

Figure K-16 : Analyses de sensibilité des coûts externes 2021 avec approche « usager du mode de transport » (sans bruit, sans déduction de la RPLP)

Transport par la route / par le rail : principe de territorialité ; transport aérien / par bateau : principe du demi-trajet

Coûts externes en Mio de CHF Sensibilités	Route	Rail	Transport aérien	Bateau	Total
Coût climatique haut	41'081	1'653	7'002	432	50'168
Estimateurs d'effets pollution santé hauts	23'081	2'117	2'315	450	27'964
VOSL haute	23'121	1'790	2'302	378	27'590
Coûts émissions hors CO ₂	20'032	1'406	3'978	301	25'717
Valeur ERF haute					
Calcul de base	20'032	1'406	2'268	301	24'007
Estimateurs d'effets pollution santé bas	17'775	896	2'234	196	21'101
VOSL basse	16'942	1'023	2'234	225	20'424
Coût climatique bas	13'314	1'351	758	260	15'683

Évolution entre 2010 et 2021

Remarque : le domaine du bruit n'a pas encore été révisé. Afin de permettre des comparaisons dans le temps, le domaine du bruit calculé *selon la méthode précédente* est inclus dans les totaux ci-dessous pour toutes les années (y c. 2021).

Grâce à des calculs rétroactifs simplifiés, la série temporelle 2010-2020 basée sur les nouvelles méthodes et bases de données a été établie. Cela permet de présenter et discuter l'évolution des coûts indépendamment des changements de méthodes.

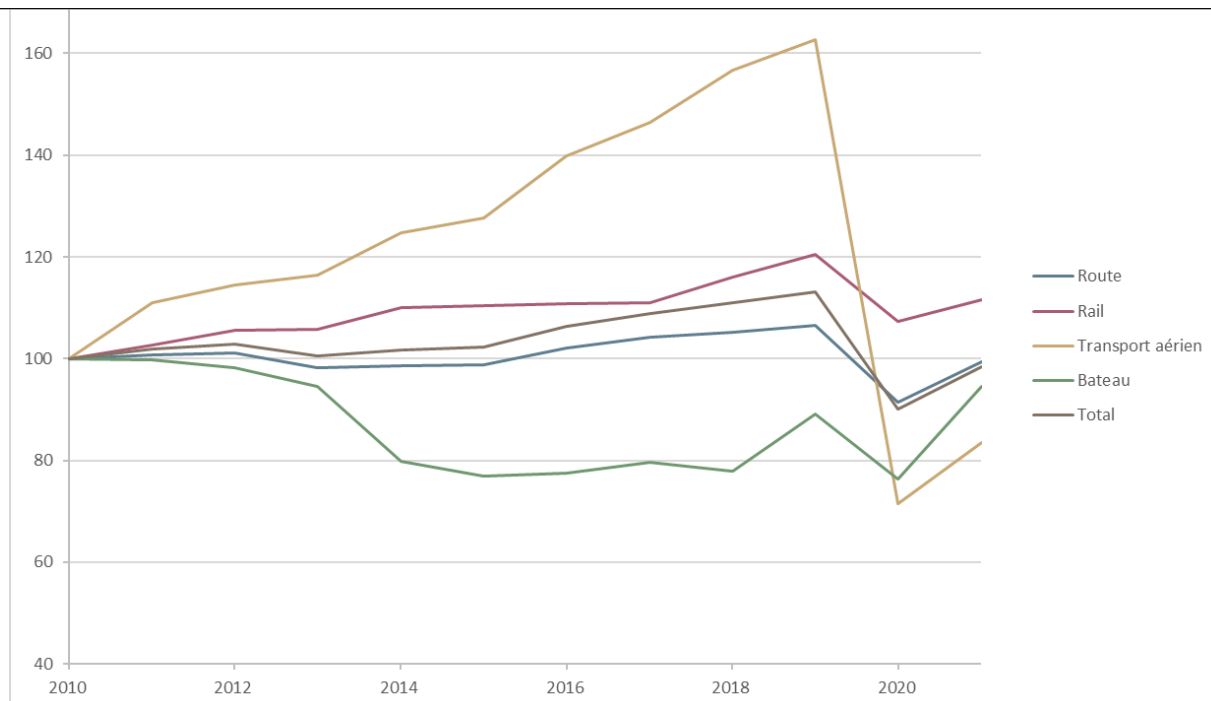
La figure Abbildung K-5 montre les coûts par mode de transport sur toute la période ainsi que la variation relative par rapport à 2010 (indice). Les coûts externes affichent une tendance à la hausse entre 2010 et 2019, avec une augmentation moyenne de près de 1,4 % par an. Les impacts de la pandémie de COVID-19 se font sentir en 2020 et 2021, principalement dans le transport aérien.

En 2021, les coûts externes des transports sont légèrement inférieurs à ceux de 2010, inférieurs de 13 % à ceux de 2019 et supérieurs de 9 % à ceux de 2020.

Figure K-17 : Évolution des coûts externes par mode de transport de 2010 à 2021 (niveau et indice 2010), y compris bruit calculé selon l'ancienne méthode et déduction de la RPLP, approche « usager du mode de transport »

Transport par la route / par le rail : principe de territorialité ; transport aérien / par bateau : principe du demi-trajet

Coûts externes (Mio CHF)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Route	21'734	21'907	21'995	21'350	21'412	21'485	22'198	22'651	22'864	23'177	19'888	21'589
Rail	1'635	1'678	1'727	1'730	1'798	1'806	1'812	1'816	1'899	1'969	1'755	1'823
Transport aérien	2'809	3'116	3'217	3'272	3'502	3'585	3'929	4'116	4'402	4'571	2'008	2'345
Bateau	319	318	313	301	254	245	247	254	248	284	243	301
Total	26'497	27'019	27'251	26'653	26'966	27'121	28'186	28'836	29'412	30'001	23'895	26'058



La variation des coûts externes d'une année à l'autre est principalement due à la variation des distances parcourues. Par exemple, dans le transport routier, le nombre de véhicules-kilomètres est passé de 6,8 millions en 2010 à 7,7 millions en 2019 (+14 %) puis 6,9 millions en 2021 (+1,4 %). Les coûts du transport routier réagissent moins que proportionnellement aux kilomètres parcourus, principalement en raison des développements technologiques (moteurs plus efficaces et plus propres) et montants d'internalisation plus élevés. Des progrès ont également été réalisés dans le domaine de la sécurité : les coûts externes dus aux accidents ont baissé de bien 30 % entre 2010 et 2021.

La population a augmenté de 11 % entre 2010 et 2021, ce qui signifie que davantage de personnes sont touchées par la pollution atmosphérique et le bruit. L'augmentation des prix ou des revenus entraîne également une hausse des coûts externes, car les dommages sont monétarisés à un prix plus élevé. Ainsi, le PIB réel par habitant a augmenté de 9 % entre 2010 et 2021. L'indice suisse des prix à la consommation baissait lui de 1 %, ce qui a légèrement atténué les coûts.

b) Transport routier

La Abbildung K-6 présente les coûts et les bénéfices externes du transport routier par moyen de transport et domaine de coûts. Le transport motorisé privé de personnes représente près des trois quarts des coûts externes du transport routier et le transport de marchandises 19 % des coûts, la mobilité douce représentant un peu plus de 4 % et les transports publics à peine 3 %.

Les coûts dépendent principalement du nombre de kilomètres parcourus. Il est donc pertinent de prendre en compte les coûts moyens par personne-kilomètre ou par tonne-kilomètre pour comparer les moyens de transport.

Figure K-18 : Effets externes selon l'approche « usager du mode de transport » en 2021, selon domaines de coûts et catégories de véhicules

Effets externes	Transport de personnes												Transport de marchandises			Total
Transport routier	Transport de personnes privé motorisé				Mobilité douce					Transports publics						
en Mio. CHF	Voiture	Car	Moto	Cyclo-moteur	E-bike rapide	E-bike lent	Vélo	EaV	Marche	Bus	Trolley	Tram	VuL	Camion	Camion articulé	
Pollution air - santé	3'007	60	51	43	2	9	0	0	0	212	20	8	341	271	592	4'616
Pollution air - bâtiments	132	3	2	2	0	0	0	0	0	9	1	0	15	12	26	202
Pollution air - pertes de récoltes	33	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	9	4	2	52
Pollution air - dommages aux forêts	31	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	9	4	2	49
Pollution air - pertes de biodiversité	53	1	1	0	0	0	0	0	0	3	0	0	12	6	3	78
Bruit	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Climat	3'786	39	86	2	0	0	0	0	0	131	0	0	477	359	349	5'230
Nature et paysage	720	7	13	0	4	1	13	0	18	21	1	1	70	50	52	971
Dommages aux sols	67	3	1	0	0	0	0	0	0	7	1	0	18	31	24	154
Processus amont et aval	3'081	58	65	1	1	3	12	0	0	44	6	5	212	482	282	4'253
Accidents	2'596	17	477	40	25	101	518	21	105	44	5	14	218	99	68	4'426
RPLP	-9	-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-285	-259	-556
Total tous les domaines (après déduction PRPLP)	13'497	187	697	88	33	114	542	22	123	476	34	28	1'381	1'033	1'142	19'476
Coûts externes en cts/pkm resp. cts/km (après déduction RPLP)	17	6	38	105	22	24	25	17	3	20	8	3	156	15	12	
Bénéfices externes de santé					-36	-293	-1'123	0	-4'165							-5'617
Bénéfices externes de santé cts/pkm					-25	-61	-52	0	-98							

NA = aucune valeur; EaV: engin assimilé à un véhicule; VuL: véhicule utilitaire léger

Pour le transport routier, les coûts climatiques sont les plus importants (27 % des coûts externes), suivis des coûts de la santé dus à la pollution atmosphérique (24 %), des accidents (23 %) et des processus amont et aval (22 %).

Pour la mobilité douce, les accidents représentent 92 % des coûts externes. Le reste se compose de coûts liés à l'infrastructure (nature et paysage, processus amont et aval) et à la pollution atmosphérique par les vélos électriques (émissions dues à l'abrasion des pneus).

Différenciation selon le mode de propulsion

La différenciation selon le mode de propulsion montre que la mobilité électrique (à l'exception des vélos électriques rapides et lents pour le trafic cycliste) joue un rôle encore très limité. En 2021, juste 1 % des coûts externes du trafic routier motorisé relève des véhicules électriques. Le potentiel de réduction des effets externes de la mobilité électrique est important. Par exemple, si toutes les voitures de tourisme étaient électriques, les coûts climatiques pourraient être évités, tandis que les processus amont et aval augmenteraient de 23 % (batteries, etc.), ce qui représenterait une réduction nette d'un peu plus de 3 milliards de francs, soit 23 % des coûts externes des voitures. Il existe également un potentiel de réduction dans le domaine de la pollution atmosphérique. Les voitures électriques présentent des émissions directes de PM₁₀ (émissions d'abrasion incluses) inférieures de près de 6,5 % à celles de voitures carburant aux énergies fossiles.

L'approche « catégorie trafic poids lourds »

L'approche « catégorie trafic poids lourds » et son interprétation concrète pour calculer le taux de couverture du trafic poids lourds via la RPLP ont été prescrites par le Tribunal fédéral.⁶ Cette approche permet de déterminer les coûts que le trafic lourd occasionne aux autres usagers et à la collectivité. Il en résulte la différence suivante par rapport aux effets externes selon l'approche « usager du mode de transport », qui sont au centre du présent rapport : avec cette approche, les coûts des accidents causés par un véhicule du trafic lourd et supportés par un autre véhicule du trafic lourd ne sont pas considérés comme externes. La Abbildung K-7 montre les coûts externes avec l'approche « catégorie trafic poids lourds ». Par rapport aux chiffres présentés ci-dessus (Abbildung K-6), les coûts des accidents sont inférieurs de 6 %.

Pour un aperçu de la couverture des coûts du trafic poids lourd, y compris des coûts d'infrastructure et des embouteillages ainsi que toutes les recettes payées par le trafic lourd, voir la fiche d'information sur le site web de l'OFT.⁷

Figure K-19 : Coûts externes selon l'approche « catégorie trafic poids lourds » en 2021 par domaines de coûts et catégories de véhicules

Coûts externes catégorie trafic poids lourds	Car	Camion	Camion articulé	Total trafic lourd
Transport routier				
Pollution air - santé	60.0	271.2	591.9	923.1
Pollution air - bâtiments	2.6	11.8	25.8	40.2
Pollution air - pertes de récoltes	0.6	4.5	2.3	7.3
Pollution air - dommages aux forêts	0.6	4.1	2.1	6.8
Pollution air - pertes de biodiversité	0.8	5.9	3.1	9.7
Bruit	NA	NA	NA	NA
Climat	39.4	359.0	349.3	747.7
Nature et paysage	6.9	49.9	51.8	108.7
Dommages aux sols	3.3	31.1	24.0	58.4
Processus amont et aval	58.3	481.8	282.4	822.5
Accidents	8.4	96.8	67.3	172.5
Total intermédiaire, tous les domaines de coûts	180.9	1'316.1	1'399.9	2'896.9
Déduction RPLP	-2.9	-285.3	-259.0	-547.2
Total tous les domaines (après déduction RPLP)	178.0	1'030.9	1'140.9	2'349.7

NA: aucune valeur

c) Transport ferroviaire

En ce qui concerne le transport ferroviaire, deux tiers des coûts externes (sans le bruit) sont imputables au transport de personnes et un tiers au transport de marchandises. La structure

⁶ Tribunal fédéral, arrêt du 17 décembre 2011, RPLP, taxation des EURO-3.

⁷ Redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations (RPLP)

par domaine de coût est différente de celle du transport routier : les coûts climatiques sont pratiquement inexistantes et les coûts des accidents sont faibles. Les domaines de coûts les plus importants sont les atteintes à la santé dues à la pollution atmosphérique (74 %), les dommages à la nature et au paysage (9 %) ainsi que les processus amont et aval (7 %).

Les coûts par pkm et tkm sont inférieurs à ceux de la plupart des moyens de transport sur route, à l'exception du tram et de la marche à pied.

Figure K-20 : Effets externes selon l'approche « usager du mode de transport » pour le transport ferroviaire en 2021, selon domaines de coûts et catégorie de trafic

Coûts externes en Mio. CHF	Transport de personnes	Transport de marchandises	Total
Transport ferroviaire			
Pollution air - santé	706.5	333.7	1'040.2
Pollution air - bâtiments	30.8	14.5	45.3
Pollution air - pertes de récoltes	0.2	0.6	0.8
Pollution air - dommages aux forêts	0.2	0.6	0.8
Pollution air - pertes de biodiversité	0.2	0.8	1.0
Bruit*	NA	NA	NA
Climat	2.5	9.4	11.9
Nature et paysage	101.2	32.3	133.5
Dommages aux sols	31.2	4.2	35.4
Processus amont et aval	47.3	53.7	101.0
Accidents	23.9	11.9	35.9
Total	944.0	461.9	1'405.9
Coûts externes en cts/pkm resp. cts/tkm	5.6	4.5	

NA = Aucune valeur

d) Transport aérien

La Abbildung K-9 montre les coûts externes du transport aérien qui sont imputables à hauteur de 86 % au transport de personnes. Le domaine du climat est le plus important en termes de coûts, avec une part (77 %) nettement plus élevée que pour les autres modes de transport (30 % pour tous les modes de transport). Les coûts des processus amont et aval représentent 18 %. Les autres domaines de coût liés à la pollution atmosphérique locale et à l'utilisation du territoire sont faibles. Les accidents sont également rares.

Les coûts externes du transport aérien par pkm sont plus faibles pour le transport de personnes que pour les voitures de tourisme, ce qui s'explique principalement par les longues distances et le taux de remplissage élevé des avions. En ce qui concerne le transport de marchandises,

les coûts externes du transport aérien par tkm sont deux fois et demie plus élevés que ceux des camions et huit fois plus élevés que ceux du transport ferroviaire, car le fret (poids) y est réduit.

Figure K-21 : Effets externes selon l'approche « usager du mode de transport » pour le transport aérien en 2021, selon les domaines de coûts et la catégorie de trafic

Coûts externes en Mio. CHF	Transport de personnes	Transport de marchandises	Total
Trafic aérien			
Pollution air - santé	60.6	6.1	66.6
Pollution air - bâtiments	2.6	0.3	2.9
Pollution air - pertes de récoltes	1.3	0.2	1.4
Pollution air - dommages aux forêts	1.2	0.2	1.4
Pollution air - pertes de biodiversité	1.7	0.2	1.9
Bruit	NA	NA	NA
Climat	1'518.2	238.9	1'757.1
Nature et paysage	6.6	0.8	7.3
Dommages aux sols	-	-	-
Processus amont et aval	346.3	61.6	407.9
Accidents	21.2	0.7	21.8
Total	1'959.5	308.8	2'268.3
Coûts externes en cts/pkm resp. cts/tkm	12.2	35.5	

NA = Aucune valeur

e) Transport par bateau

La Abbildung K-10 montre les coûts externes du transport par bateau, répartis entre les transports de personnes et de marchandises, et au sein du transport de marchandises, entre la navigation sur le Rhin et le reste. Contrairement à tous les autres modes de transport, le transport de marchandises, qui représente 54 % des coûts externes, est ici plus important que le transport de personnes.

Les problèmes de santé liés à la pollution atmosphérique représentent plus de 70 % des coûts. Les coûts pour le climat représentent une part d'à peine 15 %, soit deux fois moins que le total tous modes confondus. Les processus amont et aval interviennent à raison de 5 % dans les coûts externes. Les autres domaines de coûts sont inférieurs à 10 millions de francs.

Figure K-22 : Effets externes selon l'approche « usager du mode de transport » pour le transport par bateau en 2021, selon les domaines de coûts et la catégorie de trafic

Coûts externes en Mio. CHF	Transport de personnes	Transport de marchandises	dont Rhin	Autres	Total
Bateau					
Pollution air - santé	103.6	111.2	71.8	39.4	214.8
Pollution air - bâtiments	4.5	4.8	3.1	1.7	9.3
Pollution air - pertes de récoltes	1.5	2.3	1.8	0.5	3.8
Pollution air - dommages aux forêts	1.4	2.1	1.7	0.4	3.5
Pollution air - pertes de biodiversité	1.9	2.9	2.3	0.6	4.8
Bruit	-	-	-	-	-
Climat	23.1	21.7	13.6	8.1	44.8
Nature et paysage	0.9	4.6	4.5	0.1	5.4
Dommages aux sols	-	-	-	-	-
Processus amont et aval	2.0	11.8	11.6	0.2	13.8
Accidents	0.2	0.8	0.8	0.0	1.0
Total	139.2	162.2	111.3	51.0	301.4
Coûts externes en cts/pkm resp. cts/tkm	114.3	8.8	6.1	138.7	

f) Différenciations spatiales

Coûts externes par cantons

Le tableau suivant montre la répartition des coûts externes des transports routier et ferroviaire entre les cantons. Selon le domaine de coût, cette répartition s'est faite selon les émissions, immissions ou prestations kilométriques (pondérées) des catégories de véhicules, différenciées par canton. La dernière colonne montre les coûts externes (causés par les transports) par habitant, afin de pouvoir comparer des cantons de différentes tailles. La moyenne suisse est de 2 450 francs. Les cantons urbains comme Bâle-Ville et Genève ont des coûts par habitant particulièrement bas (respectivement environ 1400 et 1600 CHF par habitant). On trouve également des coûts moyens faibles dans les cantons où proportionnellement moins de marchandises sont transportées par la route, comme Appenzell Rhodes intérieures et extérieures et Schaffhouse. Les coûts externes moyens sont les plus élevés dans les cantons alpins (Uri plus de 5000 CHF, Tessin, Glaris et Nidwald plus de 3000 CHF), où la part du transport de marchandises est importante.

Figure K-23 : Coûts externes des transports routier et ferroviaire en 2021 : Répartition par canton et par catégorie de véhicules (sans déduction RPLP et bruit)

Cantons en Mio de CHF	Route													Total route	Transport ferroviaire		Total	Moyenne	Bénéfices santé mobilité douce Mio CHF		
	Transport de personnes						Transport de marchandises								Transport personnes	Transport marchand- ises				Mio CHF	CHF par habitant
	Transport motorisé privé de personnes			Mobilité douce			Transports publics routiers														
	Volkswagen	Car	Moto	Cyclo- moteur	E-bike rapide	E-bike lent	Vélo	E-sv	Marche	Bus (y c. Trolley)	Tram	VuL	Camion								
Zürich	2056	32	108	19	7	25	104	4	23	88	11	203	195	207	3'083	169	34	203	2'107	1'070	
Berne	1'658	24	89	10	4	13	64	2	14	53	3	168	158	169	2'430	156	74	229	2'544	629	
Lucerne	711	11	38	4	1	5	22	1	5	31	0	67	77	86	1'059	40	5	46	2'640	225	
Uri	99	2	4	0	0	0	2	0	0	4	0	10	26	27	175	7	14	21	5'323	18	
Schwyz	305	4	16	1	0	1	7	0	2	9	0	29	23	24	421	24	19	43	2'845	84	
Obwald	55	1	3	0	0	0	2	0	0	1	0	6	4	4	76	4	0	5	2'097	18	
Nidwald	81	2	4	0	0	0	2	0	1	2	0	10	13	14	128	3	0	3	3'014	23	
Glarus	75	1	4	0	0	0	2	0	1	2	0	11	9	10	117	6	2	8	3'045	25	
Zoug	197	2	10	1	0	2	8	0	2	10	0	19	12	12	277	12	4	16	2'269	98	
Fribourg	508	7	26	3	1	4	18	1	4	14	0	46	50	53	733	32	4	36	2'349	168	
Soleure	449	10	24	3	1	3	17	1	4	16	0	48	74	79	728	31	33	64	2'839	167	
Bâle-Ville	152	2	8	3	1	3	17	1	4	16	5	11	15	19	256	8	5	14	1'376	178	
Bâle-Campagne	422	8	21	3	1	4	20	1	4	14	3	49	58	62	670	25	21	46	2'453	193	
Schaffhouse	97	1	6	1	0	1	5	0	1	6	0	9	8	9	145	9	0	9	1'843	53	
Appenzell Rh. Ex.	72	1	5	0	0	1	3	0	0	2	0	7	3	3	96	6	0	6	1'854	23	
Appenzell Rh. Int.	17	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	1	23	2	0	2	1'560	7	
St. Gall	984	14	49	5	2	6	32	1	7	38	0	114	97	101	1'449	54	13	67	2'932	315	
Grisons	342	6	17	1	0	2	10	0	2	17	0	46	40	40	524	36	18	54	2'878	106	
Argovie	1'227	19	65	6	2	8	37	1	8	40	0	130	147	159	1'848	80	83	163	2'879	383	
Thurgovie	446	6	25	2	1	3	15	1	3	10	0	40	39	44	634	32	8	40	2'371	146	
Tessin	772	10	39	3	1	4	22	1	6	24	0	72	85	88	1'126	31	47	78	3'424	249	
Vaud	1'399	16	65	9	3	12	53	2	12	35	1	145	107	108	1'968	89	36	126	2'557	564	
Valais	475	6	25	3	1	3	18	1	5	24	0	52	38	41	690	41	23	64	2'149	199	
Neuchâtel	252	2	12	2	1	2	11	1	3	10	0	25	12	13	345	20	14	33	2'148	135	
Genève	531	3	31	8	3	11	49	2	11	42	4	53	18	20	786	15	4	19	1'586	501	
Jura	126	1	6	1	0	1	4	0	1	3	0	9	8	8	168	9	1	9	2'395	41	
Total	13'506	190	697	88	33	114	542	22	123	510	28	1'381	1'318	1'401	19'954	944	462	1'406	2'454	5'617	

NA = aucune valeur, EsV/ engin assinié à un véhicule, VuL: véhicule utilitaire léger

Coûts externes de la pollution atmosphérique par type d'espace

Pour les coûts de santé dus à la pollution atmosphérique (5,7 mia CHF) et les dommages aux bâtiments (0,2 mia CHF) causés par les transports routier et ferroviaire, il a été possible d'établir une différenciation selon le degré d'urbanisation des communes (3 catégories selon la typologie DEGURBA⁸).

La Abbildung K-12 montre la répartition des coûts entre le transport routier et le transport ferroviaire. 55 % des coûts des dommages causés à la santé et aux bâtiments par la pollution atmosphérique concernent des zones moyennement peuplées, 24 % des zones densément peuplées et 21 % des zones peu peuplées. La partie inférieure du tableau montre, à titre de comparaison, la proportion de kilomètres parcourus dans chaque type d'espace. Dans la colonne de droite, les coûts sont rapportés à la population résidente, dont les pourcentages dans chaque type d'espace sont indiqués en bas à droite.

Dans les zones densément peuplées, la part des coûts externes est plus élevée que la part des kilomètres parcourus, mais plus faible que celle de la population. Cela s'explique par des dommages plus importants en raison de la densité de population ou des coûts moindres en raison des courtes distances. L'inverse se produit dans les zones moyennement et faiblement peuplées.

Figure K-24 : Effets externes de la pollution atmosphérique (santé et bâtiments) due au transport routier en 2021 : répartition par type d'espace et par catégorie de véhicule

Coûts externes en mio de CHF	Route											Transport ferroviaire		Total	Moyenne CHF par habitant	
	Transport personnes								Transport marchandises			Total route	Transport personnes			Transport marchand- ises
	Transport motorisé privé de personnes				Mobilité douce		Transports publics routiers									
	Voiture	Car	Moto	Cyclo- moteur	E-bike rapide	E-bike lent	Bus (y c. Trolley)	Tram	VuL	Camion	Camion articulé					
densément peuplée	757	14	13	20	1	4	101	8	84	56	121	1'179	183	45	1'406	544
urbanisation intermédiaire	1705	35	29	20	1	4	113	0	206	162	353	2'628	401	221	3'250	728
faiblement peuplée	677	14	11	4	0	1	29	0	66	66	143	1'012	154	82	1'248	802
Total	3'140	63	53	45	2	9	242	8	356	283	618	4'818	737	348	5'904	686
part densément peuplée	24%	22%	25%	45%	45%	45%	42%	96%	24%	20%	20%	24%	25%	13%	24%	
part urbanisation intermédiaire	54%	55%	54%	45%	45%	45%	47%	4%	58%	57%	57%	55%	54%	63%	55%	
part faiblement peuplée	22%	23%	22%	10%	10%	10%	12%	0%	19%	23%	23%	21%	21%	24%	21%	
Grandeurs de comparaison	Part des veh-km - route											Part des train-km		Part de la population		
densément peuplée	19%	17%	19%	43%	43%	43%	34%	95%	19%	17%	13%	19%	19%	10%	30%	
urbanisation intermédiaire	56%	59%	56%	49%	49%	49%	45%	5%	59%	59%	61%	56%	54%	60%	52%	
faiblement peuplée	25%	25%	25%	7%	7%	7%	21%	0%	22%	25%	26%	24%	27%	30%	18%	

VuL: véhicule utilitaire léger

⁸ Degré d'urbanisation européen — Degree of Urbanisation (DEGURBA) (communes politiques) | Office fédéral de la statistique (admin.ch)

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die externen Kosten und Nutzens des Strassen- und Schienenverkehrs werden vom Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) seit 2005 jährlich publiziert,⁹ seit 2010 sind auch die externen Kosten des Luft-, Schiffs- sowie Fuss- und Veloverkehrs integriert. Die Zahlen bilden eine wichtige Grundlage für die Verkehrspolitik. Relevant sind sie unter anderem für die Festlegung der Höhe der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA).¹⁰ Die LSVA soll mithelfen, die vom Schwerverkehr verursachten externen Kosten zu internalisieren. Die Ergebnisse fliessen zudem in die Statistik «Kosten und Finanzierung des Verkehrs (KFV)» des Bundesamtes für Statistik (BFS) ein. Im Weiteren stellen die daraus abgeleiteten Kostensätze einen wichtigen Input für viele Kosten-Nutzen-Analysen von Verkehrsinfrastrukturprojekten auf nationaler und kantonaler Ebene dar und dienen als zentrale Grundlage für die Schweizer Normen zu Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr (Grundnorm SN 641 820¹¹ und Detailnormen VSS 41 821 bis 41 828¹²).

Die Berechnungsmethodik der externen Effekte wurde 2012 – 2014 einer vertieften Überprüfung unterzogen, eine kleinere Aktualisierung fand 2016 – 2019 statt.¹³ Nun steht die nächste Überprüfung der Berechnungsmethodik und Aktualisierung der Datengrundlagen an. Dies mit der Stossrichtung, dass die ausgewiesenen Kennzahlen zu den Kosten und Nutzen des Verkehrs verstärkt auf die Frage der effizienten Nutzung des Verkehrssystems ausgerichtet werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Arbeiten ist es, die externen Kosten und Nutzen des Verkehrs für das Jahr 2021 zu ermitteln. Nebst einer Überprüfung der Berechnungsmethodik und Aktualisierung der Datengrundlagen gilt es dabei insbesondere die folgenden Zielsetzungen zu verfolgen:

- Einbezug weiterer Differenzierungsebenen bei der Ermittlung der Kosten und Nutzen (nach Antriebsart (Fossil, Elektro, weitere), nach Raumtyp und nach Kantonen).
- Fokus auf die Sicht Verkehrsteilnehmende bei der Ermittlung der externen Kosten und Nutzen (statt wie bisher auf die Sicht Verkehrsträger¹⁴, die nicht mehr berechnet wird). Die Sicht Verkehrsteilnehmende bildet die Grundlage für eine vermehrt effizienzorientierte Tarifierung des Verkehrs (vgl. oben).¹⁵

⁹ Vor 2005 erfolgte die Publikation der externen Kosten in grösseren Abständen.

¹⁰ Gemäss Artikel 7 des SVAG (Schwerverkehrsabgabegesetzes, SR 641.81) müssen die Berechnungen der externen Kosten und Nutzen des Schwerverkehrs periodisch nachgeführt werden und dem jeweiligen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse entsprechen.

¹¹ SN 641 820 (2018).

¹² Hier insbesondere von Interesse: VSS 41 824 (2013) und VSS 41 828 (2022).

¹³ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019).

¹⁴ Für die Definition dieser Sichtweisen siehe Kapitel 3.1.2.

¹⁵ Einzig im Strassenverkehr muss zusätzlich die Sicht «Verkehrsart Schwerverkehr» ermittelt werden, da sie weiterhin als Grundlage für die Bemessung der LSVA benötigt wird (vgl. Kapitel 3.1.2).

- Ausweis der Überlastungskosten (Zeitverlustkosten im motorisierten Strassenverkehr und Komfortverlustkosten im öffentlichen Verkehr) in einem Exkurs sowie einem kurzen Exkurs zu den (ungedeckten) marginalen Infrastrukturkosten;
- Überlegungen zu den Grenzkosten¹⁶, da sie für eine effizienzorientierte Bepreisung des Verkehrs eine wichtige Grundlage darstellen;
- Erhöhung der Nachvollziehbarkeit, indem auch Vereinfachungen der Berechnungen geprüft werden (insbesondere bei den Unfallkosten);
- Berechnung einer konsistenten Zeitreihe der externen Effekte für die Jahre 2010 bis 2021;
- Aufbau eines neuen Aktualisierungstools für die Berechnung der externen Effekte der Folgejahre 2022, 2023 usw. durch das ARE basierend auf einer skriptbasierten Programmierung (Python).

1.3 Hinweis zu Corona

Die Corona-Pandemie hat keinen Einfluss auf die im vorliegenden Bericht angewendete Berechnungsmethodik, wohl aber über die reduzierten Verkehrsleistungen auf die tatsächlichen Kosten (vor allem im Luftverkehr 2021). Mit dem Aktualisierungstool wird es möglich sein, die Kosten in den Folgejahren für unterschiedliche Verkehrsmengen zu ermitteln, bzw. bei der Rückrechnung auf 2020 die Corona-Effekte zu berücksichtigen.

1.4 Aufbau des Berichtes

Der vorliegende Bericht ist wie folgt strukturiert:

- In Kapitel 2 wird auf verschiedene Abgrenzungen eingegangen. Dazu gehören unter anderem
 - die berücksichtigten Kosten- und Nutzenbereiche (Kapitel 2.2),
 - die Abgrenzung der Verkehrsträger sowie die Aufteilung der Ergebnisse nach Personen- / Güterverkehr und Verkehrsmittel sowie die Aufteilung auf Antriebsarten (Kapitel 2.3),
 - die Erläuterung des Territorial- und des Halbstreckenprinzips sowie die Differenzierung nach Raumtypen (Kapitel 2.4).
- In Kapitel 3 wird die Berechnungsmethodik genauer erläutert:
 - Definition der sozialen und externen Kosten sowie Erläuterung zur Interpretation des Verursacherprinzips (Kapitel 3.1),
 - Generelles Berechnungskonzept und Umgang mit Internalisierungsbeiträgen (Kapitel 3.2),
 - Umgang mit Unsicherheiten (Kapitel 3.3),
 - Diskussion der Durchschnitts- und Grenzkosten sowie der Wohlfahrtsverluste (Kapitel 3.4).
- In den Kapiteln 4 bis 15 werden die Methodik und die Kostenschätzungen der betrachteten Kostenbereiche jeweils zusammengefasst (wobei das Kapitel 9 zum Lärm noch nicht in Auftrag gegeben wurde).

¹⁶ Vgl. dazu die Ausführungen in Kapitel 3.4.

- Zu ausgewählten Aspekten folgen in den Kapiteln 16 bis 18 thematische Exkurse: Überlastungskosten, Zusatzkosten in städtischen Räumen sowie ungedeckte marginale Infrastrukturkosten.
- Kapitel 19 fasst die Ergebnisse der externen und sozialen Kosten und Nutzen in einer Übersicht zusammen und weist Kostensätze pro Kilometer aus.
- Im Anhang A werden gemeinsame Datengrundlagen erläutert, die in mehreren Kapiteln eine Rolle spielen.
- Im Anhang B werden Details der Berechnungsmethodik zur Bestimmung der Gesundheitsnutzen erläutert.

1.5 Dank

Allen Personen und Institutionen, welche die Untersuchungen in irgendeiner Form unterstützt haben, danken wir an dieser Stelle bestens. Dies bezieht sich insbesondere auf diverse Datenlieferantinnen und Datenlieferanten sowie die Teilnahme an Sitzungen der Begleitgruppe. Unser Dank insbesondere geht an die Begleitgruppe (ARE, ASTRA, BAFU, BAV, BAZL, BFE, BFS, Kantone Genf und Zürich), an die thematischen Unterstützungen (gleiche Ämter wie in der Begleitgruppe, sowie BAG, bfu, EFV, SECO und SSUV) und an die kritischen Reviewers, die am Expertenworkshop teilgenommen haben (CE Delft, DIW Berlin, Fraunhofer ISI, STRATEC und UBA). Ohne die aktive Unterstützung und das Know-how dieser Personen wäre dieser Bericht nicht möglich gewesen.

2 Abgrenzungen

2.1 Überblick

Die inhaltliche Abgrenzung der Studie ergibt sich aus den vorgesehenen Verwendungszwecken der Ergebnisse:

- Sie dient als Input in die BFS-Statistik der Kosten und Finanzierung des Verkehrs (KFV-Statistik).¹⁷
- Sie stellt die zentrale Grundlage dar für die gesetzlich geforderte Aktualisierung der externen Kosten des Strassengüterverkehrs bei der Festlegung der LSVA.
- Zudem dient sie als Grundlage für die Verkehrspolitik (z.B. Normen zur Kosten-Nutzen-Analyse, insbesondere VSS 41 828)

Aus diesen Anforderungen ergeben sich die in der Abbildung 2-1 zusammengefassten inhaltlichen Abgrenzungen (die in den folgenden Kapiteln weiter vertieft werden):

- **Verkehrsträger:** Es sind alle landgestützten Verkehrsträger sowie der Schiffs- und Luftverkehr berücksichtigt. Innerhalb der Verkehrsträger ist mindestens zwischen dem Personen- und Güterverkehr zu unterscheiden (vgl. Abschnitt 2.3).
- **Kostenbereiche:** Es sind sämtliche Auswirkungen des Verkehrs auf Mensch und Umwelt abgedeckt, soweit sie einer Monetarisierung zugänglich sind und überhaupt zu relevanten sozialen Kosten (oder Nutzen) führen. Entsprechend werden alle bisherigen Kosten- und Nutzenbereiche aus der Vorgängerstudie berücksichtigt. Eine Ausnahme betreffen die Zusatzkosten in städtischen Gebieten, die neu als Exkurs thematisiert werden. Neu werden zudem die Überlastungskosten (Zeitverlustkosten im motorisierten Strassenverkehr und Komfortkosten im öffentlichen Verkehr) ausgewiesen werden, ohne sie ins Total der externen Kosten zu integrieren. In einem Exkurs wird qualitativ auch auf die ungedeckten marginalen Infrastrukturkosten eingegangen, wobei davon auszugehen ist, dass diese Null betragen (Kap. 18).
- **Zeitliche Abgrenzung:** Die Berechnungen im Rahmen des Projekts erfolgen primär für das Jahr 2021. Zusätzlich wird jedoch eine vereinfachte Rückrechnung für die Jahre 2010 – 2020 erstellt, um eine methodisch konsistente Zeitreihe darstellen zu können. Zudem wird ein Aktualisierungstool erstellt, das es dem ARE erlaubt, künftig die Berechnungen mit den jeweils aktuellen Inputdaten des zu berechnenden Jahres für die nächsten 10 Jahre fortzuschreiben.

¹⁷ In der KFV-Statistik werden vier Kostenbereiche unterschieden: Verkehrsmittel, Infrastruktur, Sicherheit und Umwelt. Im vorliegenden Bericht werden die Kosten der Bereiche Sicherheit und Umwelt betrachtet.

Abbildung 2-1: Inhaltliche Abgrenzungen in der Übersicht¹⁸

Verkehrsträger und Aufteilung auf Personen- und Güterverkehr	Kostenbereiche
Strassenverkehr - Motorisierter privater Personenverkehr - Fuss- und Veloverkehr (privater Personenverkehr mit Muskelkraft) - Öffentlicher Personenverkehr - Güterverkehr	Berücksichtigte Bereiche - A Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung - B Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung - C Ernteaufschläge durch Luftverschmutzung - D Waldschäden durch Luftverschmutzung - E Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung - F Lärm - G Klima - H Vor- und nachgelagerte Prozesse - I Natur und Landschaft - J Bodenschäden durch toxische Stoffe - K Unfälle - L Gesundheitsnutzen Fuss- und Veloverkehr
Schienenverkehr - Personenverkehr - Güterverkehr	
Luftverkehr - Personenverkehr - Güterverkehr	
Schiffsverkehr - Personenverkehr - Güterverkehr	Exkurse - Zusatzkosten in städtischen Räumen - Überlastungskosten - Ungedekte marginale Infrastrukturkosten

2.2 Kosten- und Nutzenbereiche

Die vorliegende Studie deckt die relevanten Auswirkungen des Verkehrs auf Mensch und Umwelt ab, die mit sozialen Kosten (oder Nutzen) verbunden sind und sich monetär bewerten lassen. Die Ursache-Wirkungsketten sind zum Teil komplex und werden im Detail in den einzelnen Kapiteln beschrieben. Als Orientierungshilfe aller in den bisherigen Studien abgedeckten Auswirkungen (Folgen) des Verkehrs dient die folgende Abbildung. Sie dient vor allem zur Strukturierung der Wirkungszusammenhänge der Umweltfolgen des Verkehrs. Zur Darstellung von Umweltfolgen wird sehr oft das so genannte DPSIR-Modell angewandt.¹⁹ Mit Hilfe dieses Modells wird der kausale Zusammenhang zwischen Verkehrsaktivitäten (Driving Forces), Umweltbelastung («Pres-

¹⁸ Es handelt sich um einen Grobüberblick. Die detaillierte Abgrenzung erfolgt in den Kapiteln 2.2 und 2.3.

¹⁹ Das DPSIR-Modell steht für **D**Driving Forces (Aktivität, Treiber), **P**ressures (Umweltbelastung), **S**tate (Umweltqualität, Umweltzustand), **I**mpacts (Folgen, Beeinträchtigung für Mensch und Umwelt) und **R**esponses (Massnahmen & Antworten der Politik / Gesellschaft).

sure»), der Umweltqualität bzw. dem Umweltzustand («State») sowie den Folgen («Impact») veranschaulicht. Gemäss Modell reagiert die Politik mit Massnahmen, die wiederum an verschiedenen Stellen des Modells ansetzen und so die Folgen direkt oder indirekt beeinflussen können.²⁰

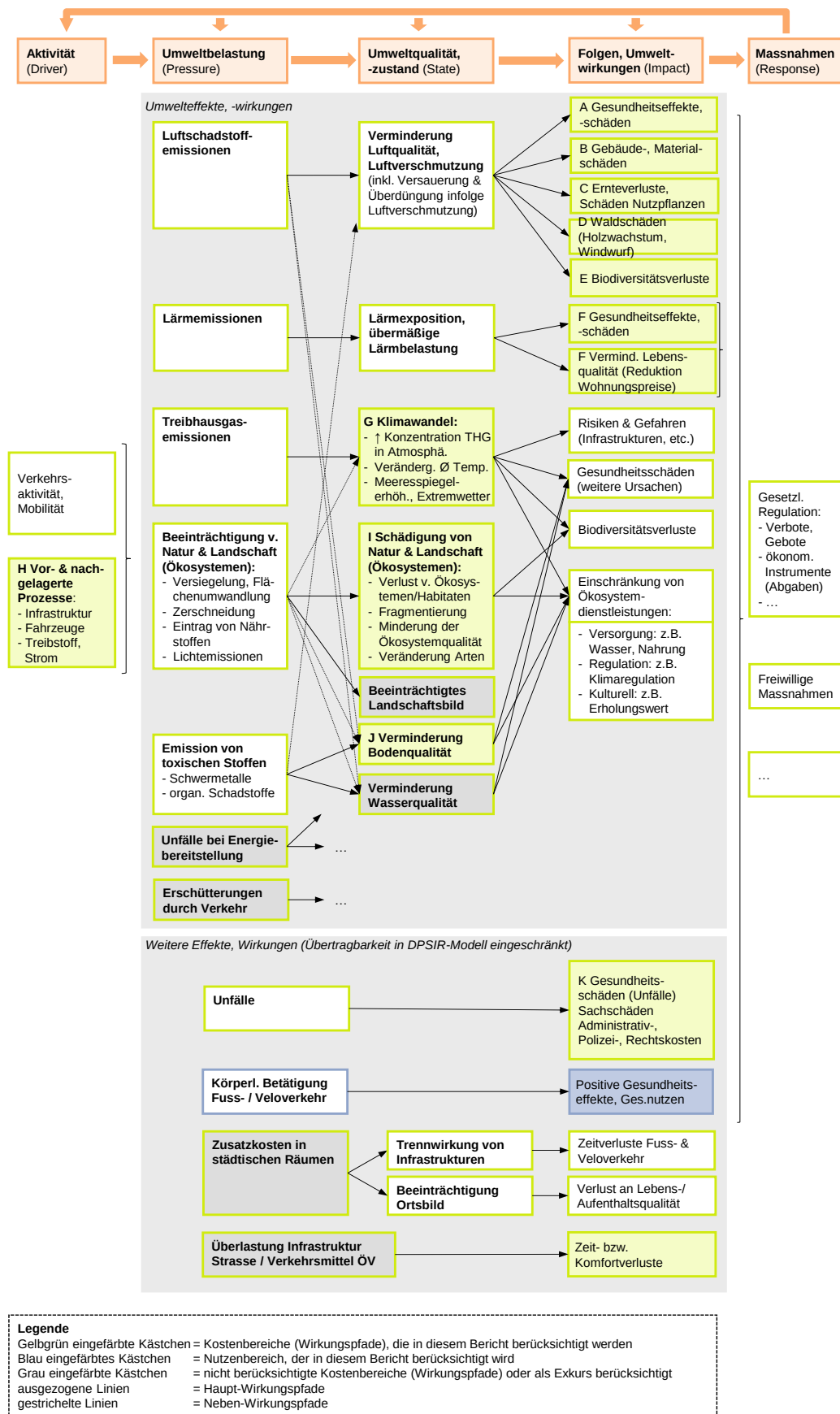
In der folgenden Abbildung sind nebst den Wirkungsketten auch die in der vorliegenden Studie berücksichtigten Kostenbereiche dargestellt.

Für Wirkungen ausserhalb des Umweltbereichs eignet sich das DPSIR-Modell weniger gut. Sie sind in der Abbildung deshalb vereinfacht dargestellt. Wichtige im Bericht nicht berücksichtigte Kostenbereiche sind ebenfalls in der Abbildung dargestellt.

Die Berechnungen der externen Kosten des Verkehrs setzen an unterschiedlichen Punkten an. Wenn möglich werden die «Impacts» (Schäden, Folgen) monetarisiert, teilweise wird aber auf übergeordneter Ebene angesetzt, nämlich bei der Umweltbelastung oder dem Umweltzustand. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die Reparaturkosten (wie bei Natur und Landschaft, Bodenschäden) ermittelt werden bzw. generell, wenn der Zustand eines Umweltsystems im Fokus steht (wie bei Natur und Landschaft).

²⁰ Politische Massnahmen können einerseits direkt die Treiber oder Aktivitäten («Drivers») an der Quelle beeinflussen, andererseits aber auch bei den Umweltbelastungen, dem Umweltzustand oder erst bei den Folgen (z.B. Massnahmen zur Minderung / Reparatur der Folgen) ansetzen. Beim Verkehrslärm an einer Strasse mit vielen Anwohnern sind z.B. folgende unterschiedlichen Massnahmen denkbar: (temporäre) Sperrung der Strasse (Verringerung von Aktivität / Treiber), Durchfahrt nur für lärmarme Fahrzeuge / Reifen (Reduktion Umweltbelastung), Bau von Lärmschutzwänden (Verbesserung Umweltzustand) oder bezahlte Kuraufenthalte für Anwohner (Minderung der Folgen) sein. Bei den Massnahmen ist zu erwähnen, dass es in der Schweiz zwar vielfältige Massnahmen zur Verminderung der Umweltwirkungen des Verkehrs gibt (z.B. gesetzliche Grenzwerte zu Lärm- oder Luftimmissionen), aber bisher erst wenig Massnahmen zur Internalisierung getroffen worden sind (eine Ausnahme ist z.B. die LSVa für den Schwerverkehr).

Abbildung 2-2: Wirkungsketten (nach DPSIR-Modell) und berücksichtigte Kostenbereiche



Box: Externe Nutzen des Verkehrs

Der vorliegende Bericht beschränkt sich grundsätzlich auf die Ermittlung der externen Kosten und Nutzen des Verkehrs aus mikroökonomischer Sicht (d.h. auf die Effekte, die nicht im Preis enthalten sind oder anders ausgedrückt auf jene Effekte, die weder in der Nachfrage noch im Angebot enthalten sind). Im Bericht werden nur die direkten (kurzfristigen) Auswirkungen des Verkehrs berücksichtigt, die von individuellen Mobilitätsentscheidungen abhängen. Dabei wird von einer gegebenen Infrastruktur ausgegangen (vgl. auch Kapitel 3.4.2).

Bei den externen Nutzen des Verkehrs sind lediglich die externen Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs (vgl. Kapitel 15) von Bedeutung und dementsprechend in der Studie zu berücksichtigen.

Unbestritten dabei ist, dass der Verkehr nebst den erwähnten Gesundheitsnutzen in vielfältiger Weise weitere Nutzen generiert. Es handelt sich aber bei diesen positiven Effekten entweder um private (oder interne) Nutzen (z.B. kürzere Reisezeit, tiefere Transportkosten, höhere Verkehrssicherheit), preisliche Effekte (z.B. tiefere Preise für Konsumgüter und breiteres Konsumgüterangebot wegen tieferen Transportkosten), Transferleistungen (z.B. Einnahmen aus Entgelt für die Strassenbenutzung) oder um sogenannte nicht-verkehrliche Nutzungen (wie z.B. Markt- und Veranstaltungsplatz, Schlittelweg, Ort für Begegnung und Spiel), die keine besondere Abgeltung einer einzelnen Fahrt bedingen.

Ebenfalls unbestritten ist, dass die Gesamtnutzen des Verkehrs grösser sind als die Gesamtkosten. Grobe Abschätzungen im Auftrag des ARE und ASTRA ergaben für das Jahr 2006 einen Nutzenüberschuss im Strassen- und Schienenverkehr in der Grössenordnung von 3 bis 8 Mrd. CHF.²¹ Dieses Ergebnis widerspiegelt die ökonomische Grundlogik, dass im Verkehr oder in der Wirtschaft letztlich nur Aktivitäten unternommen werden, die den involvierten Akteuren mehr private Nutzen stiften als private Kosten verursachen.

Für die Bepreisung des Verkehrs relevant ist die Frage, in welchem Ausmass die Verkehrsaktivitäten zu externen Nutzen führen, die den externen Kosten gegenüberzustellen sind. Denn aus ökonomischer Sicht gilt: Liegen externe (Grenz-)Kosten vor, sollten sie internalisiert werden; gibt es relevante externe (Grenz-) Nutzen, sind diese entsprechend zu entschädigen.

Die erwähnten Untersuchungen zu den externen Nutzen des Verkehrs im Auftrag von ARE und ASTRA kamen zum Ergebnis, dass der allergrösste Teil des Nutzens als privater Nutzen direkt bei den Verkehrsteilnehmenden anfällt, wie z.B. Zeitersparnisse oder geringere Fahrzeugkosten. Bei vielen Nutzen, die Dritten zufallen, wie z.B. günstigere Lebensmittel im Einkaufsladen, handelt es sich um Markteffekte, die einen normalen Anpassungsprozess darstellen und nichts mit externen Nutzen zu tun haben. Gemäss diesen Untersuchungen zeigt sich, «dass vor allem bei Notfalltransporten externe Nutzen zu erwarten sind, diese aber insgesamt sehr gering sind.»

²¹ Ecoplan; INFRAS (2006a), S. 1

Externe Kosten und Nutzen gehören zur Ebene der mikroökonomischen Analyse. Es werden also die direkten Effekte des Konsums und der Produktion von Mobilität berücksichtigt. Makroökonomische indirekte Effekte wie die sogenannten «wider economic benefits» werden hingegen auftragsgemäss nicht miteinbezogen. Darunter werden folgende Effekte verstanden:

- Wachstumseffekte, wenn dank verbesserter Erreichbarkeit von Agglomerationen oder anderen Gebieten ein grösserer Arbeits-, Zuliefer- und Absatzmarkt entsteht und in der Folge Nachfrager und Anbieter eine grössere Auswahl haben und es daher zu besseren und produktiveren Kombinationen von Produktionsfaktoren kommen sollte (sogenannte «agglomeration externalities»). Dieser Effekt kann allerdings für einzelne Regionen auch negativ ausfallen, wenn beispielsweise aufgrund von Verkehrsinfrastrukturen das bestehende Angebot auf dem Arbeitsmarkt infolge von Abwanderung abnimmt.
- Nutzen durch die Verbesserung des Wettbewerbs, sei es durch den Aufbruch von Monopolen dank tieferer Transportkosten (in der Schweiz ein praktisch vernachlässigbarer Aspekt) oder durch das Erzielen von Skaleneffekten (economies of scale) infolge einer Vergrösserung des Absatzmarktes.
- Die Beschäftigungseffekte bei Unterbeschäftigung.

Gemäss unserem Kenntnisstand wurde bisher nicht untersucht, welche Konsequenzen mögliche «wider economic benefits» für die Bepreisung eines bestehenden Verkehrsinfrastrukturnetzes haben.

2.3 Verkehrsträger, Verkehrsmittel und Antriebsarten

2.3.1 Verkehrsträger

Die Abgrenzung der Verkehrsträger und Verkehrsmittel orientiert sich am Gesamtkonzept der Mobilitäts- und Verkehrsstatistik (BFS, 2005) und der Statistik der Kosten und der Finanzierung des Verkehrs (BFS, 2019). Vorliegend werden grundsätzlich alle Verkehrsaktivitäten erfasst, die im Gesamtkonzept des BFS berücksichtigt werden. Ausgeschlossen sind Aktivitäten auf Infrastrukturen, die primär dem Sport, der Freizeitbeschäftigung, dem Militär, der Land- und Forstwirtschaft dienen.²² Die folgende Abbildung zeigt die berücksichtigten Infrastrukturen.

²² Darunter fallen das Wandern, Joggen, Nordic Walking, Mountainbiken, Motocross, Rudern, Kanu, Kajak, Pedalo, Schwimmen, Segeln, Motorbootfahren, Segelfliegen, Ballonfahren, Skifahren, Skilifte und Flugfelder (vgl. Ecoplan; ISPMZ (2013), Anhang A).

Abbildung 2-3: Berücksichtigte Verkehrsträger und Infrastrukturen

Verkehrsträger	Infrastruktur
Strassenverkehr	Autobahnen, Autostrassen Strassen der Klassen 1–3 gemäss Swisstopo 2011 ²³ einschliesslich Fuss- und Velowege Öffentliche Parkplätze und Parkhäuser Spezielle Fuss- und Veloverkehrsinfrastrukturen (Fussgängerzonen, Treppen, Unterführungen, Fuss- und Veloverkehrsbrücken, befestigte Velowege etc.) ²⁴
Schienenverkehr	Eisenbahnen (inkl. Adhäsionsbahn) ²⁵
Luftverkehr	Landesflughäfen Regionalflughäfen
Schiffsverkehr	Anlegestellen der öffentlichen Personenschifffahrt Güterhäfen und Terminals am Rhein

2.3.2 Verkehrsmittel

Die folgende Abbildung fasst die Aufteilung auf Personen- und Güterverkehr sowie die berücksichtigten Verkehrsmittel (oder Fahrzeugkategorien) zusammen, die im Folgenden erläutert werden.

²³ Swisstopo (2011) klassifizierte in ihren Karten Strassen nach deren Ausbau:

- Autobahn: Richtungsgetrennte, kreuzungsfreie Strasse mit Mittelstreifen (für Fuss- und Veloverkehr verboten).
- Autostrasse: Nicht-richtungsgetrennte, kreuzungsfreie Strasse mit zwei oder mehr Fahrbahnen ohne Mittelstreifen (für Fuss- und Veloverkehr verboten).
- 1.-Klass-Strassen: Hauptstrassen mit mindestens 6 Meter Breite, so dass zwei Lastwagen sich ungehindert kreuzen können, und für den gemischten Verkehr (Velos, Traktoren) gestattet. Diese Strassen haben oft einen Velostreifen und Trottoir.
- 2.-Klass-Strassen: Nebenstrassen mit mindestens 4 Meter Breite, so dass zwei Autos sich ungehindert kreuzen können. Ortsverbindungen, wichtige Strassen innerorts und Quartierstrassen.
- 3.-Klass-Strassen: Strassen 3. Klasse sind mindestens 2.80 Meter breit und damit auch für Lastwagen und Autobusse einspurig befahrbar. Sie haben nicht zwingend einen Hartbelag. Erschliessung von Dörfern, Einzelgebäuden.
- 4.-Klass-Strassen: Fahrwege 4. Klasse sind mindestens 1.80 Meter breit. Diese Naturstrassen haben in der Mitte oft Gras. Bei normalen Verhältnissen sind sie mit Personenwagen befahrbar. Sie können mit einem Fahrverbot hinterlegt sein.
- 5.-Klass-Strassen: Wege der 5. Klasse sind Feld- und Waldwege ohne ausreichenden Unterbau. Oft nur mit Geländefahrzeugen oder Traktoren befahrbar. Velowege wiederum können mit Hartbelag ausgestattet sein.
- 6.-Klass-Strassen: Wege der 6. Klasse sind Fussgängern vorbehalten. Es kann sich dabei von Bergpfaden bis zu breiten Spazierwegen handeln. Sie sind oft Teil von Wanderwegen.

²⁴ Der Fuss- und Veloverkehr gehört ebenfalls zum Verkehrsträger Strasse, da er weitgehend dieselben Infrastrukturen benutzt.

²⁵ Bei einer Adhäsionsbahn (oder Reibungsbahn) erfolgt der Antrieb alleine über die Haftung der Räder. Die Adhäsionsbahn hat den Vorteil, dass wenig Reibungsverluste auftreten. Seil- und Zahnradbahnen müssten theoretisch auch in die Berechnungen mit aufgenommen werden. Aus Relevanzgründen wird jedoch auftragsgemäss auf die Integration reiner Zahnrad- oder Seilbahnen verzichtet. Gewisse Bahnen verkehren jedoch je nach Steilheit der Strecke mit Adhäsion oder Zahnrad (z.B. Matterhorn-Gotthard-Bahn). Diese Bahnen werden berücksichtigt.

Abbildung 2-4: Verkehrsträger, -objekt, -formen und -mittel

Verkehrsträger	Verkehrsobjekt	Verkehrsform	Verkehrsmittel
Strassenverkehr	Personenverkehr	privater motorisierter Strassenverkehr (ausschliesslich ohne Muskelkraft angetrieben)	Personenwagen* Gesellschaftswagen / Reisebusse / Cars* Motorräder* Motorfahrräder ^{1*}
		Fuss- und Veloverkehr	E-Bike ^{2*} Pedelec ^{2*} Velos* fahrzeugähnliche Geräte (fäG) ³ Fussverkehr
		Öffentlicher Strassenverkehr	Autobusse* Trolleybusse* Trams*
	Güterverkehr		Lieferwagen* Lastwagen* Sattelschlepper* Traktor / Arbeitmaschine ⁴
Schienenverkehr	Personenverkehr		
	Güterverkehr		
Luftverkehr	Personenverkehr		Linien- und Charterverkehr (Personenanteil) General Aviation Helikopter
	Güterverkehr		Linien- und Charterverkehr (Frachtanteil) Helikopter
Schiffverkehr	Personenverkehr	Öffentliche Personenschifffahrt	
	Güterverkehr	Güterverkehr auf Schweizer Seen Güterverkehr auf dem Rhein	

* Diese Verkehrsmittel des Strassenverkehrs werden zudem nach Antriebsart differenziert (vgl. Kapitel 2.3.3).

¹ Klassische Mofas ohne E-Bikes, Steh-Roller etc.

² Pedelec wird als Synonym für «langsame E-Bike» (BFS-Kategorie) verwendet. Pedelegs sind Elektrofahrräder mit einer Motorleistung bis 500 Watt, d.h. einer Tretunterstützung bis 25 km/h. E-Bikes hier entsprechen der BFS-Kategorie «schnelle E-Bikes». Sie haben eine stärkere Motorleistung von 500 bis 1000 Watt, d.h. eine Tretunterstützung bis 45 km/h. Bei der Differenzierung der Verkehrsmittel im Strassenverkehr nach Antriebsart werden diese Kategorien ebenfalls unterschieden (vgl. folgendes Kap. 2.3.3).

³ Gemäss ASTRA Bundesamt für Strassen (2017) gilt: «Mit Rädern oder Rollen ausgestattete Fortbewegungsmittel, welche ausschliesslich durch die Körperkraft des Benützers angetrieben werden wie Rollschuhe, Inline-Skates, Trottinette oder Kinderräder. Fahrräder und Rollstühle gelten nicht als fahrzeugähnliche Geräte (Art. 1 Abs. 10 VRV Verkehrsregelverordnung)»

⁴ Traktoren und Arbeitsmaschinen können nur bei den Unfällen differenziert werden.

- **Strassenverkehr:** Bei der Differenzierung der Ergebnisse nach **Verkehrsmittel** (vgl. Abbildung) werden folgende Überlegungen berücksichtigt:
 - Eine separate Betrachtung des Schwerverkehrs ist aufgrund der Schwerverkehrsabgabe (SVA) notwendig. Zum Schwerverkehr gehören Fahrzeuge über 3.5 t Gesamtgewicht der folgenden drei Kategorien: Lastwagen, Sattelzüge und Gesellschaftswagen. Diese zahlen

die Schwerverkehrsabgabe (SVA), d.h. entweder die LSVA (Lastwagen, Sattelzüge) oder die pauschale Schwerverkehrsabgabe (Gesellschaftswagen).²⁶

- Die Herleitung der Fahrzeugkilometer (Fzkm) für die entsprechenden Kategorien muss möglich sein, um Kostensätze pro Fahrleistung (Fahrzeugkilometer, Fzkm) als Basis für die Bemessung der LSVA ausweisen zu können. Die Fahrleistungen werden durch das Bundesamt für Statistik ermittelt.
- Es wird nach Möglichkeit nach den in Abbildung 2-4 dargestellten Verkehrsmitteln differenziert. Nicht in allen Kostenbereichen ist aufgrund der Datengrundlagen eine so differenzierte Aufteilung möglich. Die Abbildung zeigt, dass im Strassenverkehr insgesamt 13 Verkehrsmittel (bzw. Fahrzeugkategorien) unterschieden werden.
- Zu beachten ist, dass die E-Bikes neu beim Fuss- und Veloverkehr enthalten sind, anstatt wie bisher bei den Mofas und damit beim motorisierten Individualverkehr (MIV). Auch im «Mikrozensus Mobilität und Verkehr (MZMV)»²⁷ werden die schnellen E-Bikes zum Fuss- und Veloverkehr gezählt. Das ist korrekter und einfacher verständlich. Die Aufteilung nach ausschliesslich mit Muskelkraft angetriebenen Velos, Pedelecs und E-Bikes erfolgt im Rahmen der Differenzierung nach Antriebsart.
- **Schienenverkehr:** Es wird wie bisher zwischen Personen- und Güterverkehr differenziert.
- **Luftverkehr:** Neben dem Linien- und Charterverkehr werden auch die General Aviation²⁸ und Helikopter in die Transportrechnung Luftverkehr integriert, sofern die Flüge an einem der drei Landesflughäfen oder einem Regionalflughafen starten oder enden (Flugfelder und Heliports werden hingegen ausgeschlossen).²⁹ Nicht berücksichtigt wird gemäss Vorgabe die militärische Aviatik. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden Luftfrachtersatzverkehre³⁰ sowie Verkehre von und zu Flughäfen, da diese bereits bei den Verkehrsträgern Strasse und Schiene erfasst sind. Es wird wie bisher zwischen Personen- und Güterverkehr differenziert.³¹
- **Schiffsverkehr:** Im Schiffsverkehr sind schliesslich gemäss Abgrenzung die Rheinhäfen in Basel sowie die Anlegestellen der öffentlichen Personenschifffahrt und des Güterverkehrs zu berücksichtigen.
Es wird zwischen Personen- (Dampf-, Motor- und Fährschiffe) und Güterverkehr (Lastkahn, Schwimmbagger) differenziert.

²⁶ Die Busse des öffentlichen Verkehrs stellen eigentlich auch Schwerverkehr dar, da sie mehr als 3,5t wiegen. Da die Busse aber von der SVA befreit sind, werden sie hier nicht zum Schwerverkehr gezählt.

²⁷ BFS Bundesamt für Statistik; ARE Bundesamt für Raumentwicklung (2023)

²⁸ Alle gewerblichen Flüge abzüglich der Linien- und Charterflüge sowie alle nicht-gewerblichen Flüge mit Motorflächenflugzeugen und Helikoptern (nur Personenverkehr).

²⁹ Flüge von einem Regionalflughafen zu einem Flugfeld werden gemäss dem Halbstreckenprinzip halb miteinbezogen.

³⁰ Luftfrachtersatzverkehr nennt man Gütertransporte, die als Luftverkehr gelten, jedoch – meist weil zum gefragten Zeitpunkt keine Luftverkehrskapazitäten vorhanden sind – auf der Strasse transportiert werden.

³¹ Der Güterverkehr umfasst im Luftverkehr Frachtflüge, Belly Freight (Gütertransport im Frachtraum der Personenflugzeuge) und Gütertransporte mit Helikoptern. Es gilt zu bemerken, dass die Trennung von Güter- und Personenverkehr im Luftverkehr deutlich schwieriger ist als im Strassen- und Schienenbereich. Der Luftfrachtverkehr der Schweiz basiert weitgehend auf Belly Freight Transporten.

2.3.3 Antriebsarten

Neu werden die Ergebnisse nach Antriebsarten differenziert. Im Folgenden stellen wir mit Bezug auf die Relevanz der Differenzierung die Festlegungen nach den Verkehrsträgern und anschließend in Bezug auf die Kostenbereiche vor.

Die verschiedenen Antriebsarten im **Strassenverkehr** sind für die Verkehrsmittel unterschiedlich relevant. Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6 zeigen den Fahrzeugbestand nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten im Jahr 2021 (absolut bzw. in Prozent).

Abbildung 2-5: Fahrzeugbestand nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten, 2021

	Total	Fossil				Elektrisch	Plug-in-Hybrid		Rest Brenn- stoffzelle	Gas	Andere
		Benzin	Diesel	Normal-Hybrid							
				Benzin	Diesel						
Personenwagen	4'709'366	3'054'773	1'360'111	140'926	20'836	71'697	43'337	1'362	154	10'971	5'199
Motorräder	791'323	772'847	1'087	60	5	17'164	-	-	-	14	146
Mofas	244'527	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lieferwagen	412'776	57'865	348'537	10	233	3'305	1	-	-	2'611	214
Lastwagen	28'034	124	27'656	1	10	82	-	-	31	97	33
Lastenzüge	13'913	61	13'726	-	6	40	-	-	16	48	16
Anhänger	13'913	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sattelschlepper	10'807	20	10'713	-	-	6	-	-	1	66	1
Privatcars	3'076	15	2'777	-	193	36	-	-	-	49	6
Bus	6'010	28	5'579	-	239	46	-	-	-	103	15
Trolleybus	536	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tram	731	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Quelle: Eigene Darstellung; Daten: BFS

Abbildung 2-6: Anteile am Fahrzeugbestand nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten, in %, 2021

	Total	Fossil				Elektrisch	Plug-in-Hybrid		Rest Brenn- stoffzelle	Gas	Andere
		Benzin	Diesel	Normal-Hybrid							
				Benzin	Diesel		Benzin	Diesel			
Personenwagen	100.0%	64.9%	28.9%	3.0%	0.4%	1.5%	0.9%	0.0%	0.0%	0.2%	0.1%
Motorräder	100.0%	97.7%	0.1%	0.0%	0.0%	2.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Lieferwagen	100.0%	14.0%	84.4%	0.0%	0.1%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.1%
Lastwagen	100.0%	0.4%	98.7%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.1%
Lastenzüge	100.0%	0.4%	98.7%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.1%
Sattelschlepper	100.0%	0.2%	99.1%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.0%
Privatcars	100.0%	0.5%	90.3%	0.0%	6.3%	1.2%	0.0%	0.0%	0.0%	1.6%	0.2%
Bus	100.0%	0.5%	92.8%	0.0%	4.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	1.7%	0.2%

Quelle: Eigene Darstellung; Daten: BFS

In Absprache mit dem ARE und BFS (sowie der Begleitgruppe) wurde folgende Differenzierung nach **drei Antriebskategorien** festgelegt, die wie folgt zusammengesetzt sind:³²

- **Fossiler Antrieb:** Benzin und Diesel (inkl. normal-hybride Fahrzeuge (ohne Stecker)³³)
- **Elektrischer Antrieb:** batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEV)
- **Rest:** Plug-in-Hybrid (Benzin und Diesel), Brennstoffzelle, Gas und «Andere»

Mit den beiden detailliert betrachteten Antriebskategorien (fossil und elektrisch) wird für alle Fahrzeugkategorien im Jahr 2021 mehr als 98% des Fahrzeugbestandes abgebildet (bei ÖV-Bussen 98.0%, bei Privatscars 98.2%, bei Personenwagen 98.7%, im Güterverkehr 99.4% und bei Motorrädern gar 100.0% – vgl. Abbildung 2-6).

Bei den Velos wird im Rahmen der Differenzierung nach Antriebsart nach (ausschliesslich mit Muskelkraft betriebenen) Velos, Pedelects und E-Bikes unterschieden.

Abbildung 2-7 zeigt für die einzelnen Kostenbereiche, nach welchen Faktoren (Emissionen, Fahrleistung, Nutzungsintensität) die Differenzierung nach Antriebsarten vorgenommen wird: In der Regel werden die jeweiligen Emissionen bzw. die differenzierten Emissionsfaktoren je Antriebskategorie zugrunde gelegt, bei den Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr ist zudem die Nutzungsintensität von Bedeutung (körperliche Leistung pro gefahrenen Kilometer ist bei einem E-Bike geringer als bei einem Velo ohne Tretunterstützung). Für die Kostenbereiche Natur und Landschaft sowie Unfälle erfolgt die Differenzierung nach Antriebsarten lediglich aufgrund der antriebs-spezifischen Fahrleistungen.

³² Die Kategorien wurden so gewählt, dass Benzin- und Diesel-Verbrennerfahrzeuge (inkl. Hybrid electric vehicles, HEV) sowie BEV jeweils separat in einer Kategorie sind. Die Bezeichnungen der Kategorien sind streng genommen nicht ganz präzise, aber im allgemeinen Sprachgebrauch üblich.

³³ Im HBEFA sind die normal-hybriden Fahrzeuge (HEV) Teil der Benzin- resp. Dieselfahrzeuge. Gründe hierfür sind einerseits der fließende Übergang zwischen gar nicht hybrid und voll-hybrid und andererseits die fehlende Datengrundlage aus dem CO₂-Monitoring der European Environment Agency, einer wichtigen Datenquelle für das HBEFA.

Abbildung 2-7: Differenzierung nach Antriebsarten

Kosten- / Nutzenbereiche	Differenzierung über
Gesundheitskosten Luftverschmutzung	Emissionen
Gebäudeschäden Luftverschmutzung	Emissionen
Ernteaufälle Luftverschmutzung	Emissionen
Waldschäden Luftverschmutzung	Emissionen
Biodiversitätsverluste Luftverschmutzung	Emissionen
Lärm	sonBASE
Klima	Emissionen
Vor- und nachgelagerte Prozesse	Emissionen
Natur und Landschaft	Fahrleistungen
Bodenschäden	Emissionen
Unfälle	Fahrleistungen
Gesundheitsnutzen Fuss und Velo	Fahrleistungen und Nutzungsintensität

Eine Differenzierung von elektrischem und Dieselantrieb ist im **Schienenverkehr** grundsätzlich möglich.³⁴ Wir berücksichtigen den unterschiedlichen Flottenmix in den Kostensätzen bzw. spezifischen Schadstoffbelastungen. Aufgrund der geringen Relevanz von dieselbetriebenen Schienenfahrzeugen in Bezug auf den Energieverbrauch sowie auch den verfügbaren Datengrundlagen verzichten wir jedoch auf Differenzierung der Ergebnisse.

Im **Luft- und Schiffsverkehr** wird auf die Differenzierung nach Antriebsart verzichtet, da Kerosin bzw. Diesel dort die dominanten Treibstoffe sind. Im Luftverkehr werden als erneuerbare Energiequellen sogenannte «Sustainable Aviation Fuels» (SAF) künftig an Bedeutung gewinnen. Die tieferen Emissionen durch SAF werden direkt in den vom BAZL gelieferten Datengrundlagen zu den Schadstoffemissionen des Luftverkehrs berücksichtigt. Wir gehen jedoch davon aus, dass bis 2030 kein relevantes Aufkommen mit ausschliesslich mit SAF betriebenen Flugzeugen (bzw. Helikoptern) transportiert werden wird. Analog zum Schienenverkehr wird die Beimischung von SAF über die Kostensätze bzw. spezifischen Schadstoffbelastungen berücksichtigt. SAF werden dem Kerosin in steigenden Anteilen beigemischt (gemäss BAZL im Jahr 2022 ca. 0.1%, 2025 sollen es 2% und 2030 sollen es ca. 6% sein). Alle Flugzeuge können folglich mit einem kleineren oder grösseren Anteil SAF betankt werden.³⁵ Eine Differenzierung nach Antriebsart ist im Luftverkehr damit nicht nötig.

³⁴ Der Anteil von Diesel beträgt rund 2% gemessen am Energieverbrauch und 24% gemessen am Bestand angetriebener Fahrzeuge nach Energieart (BFS, 2022).

³⁵ Eine Ausnahme bildet die General Aviation, die meist mit kleineren Flugzeugen geflogen wird, die oft mit Flugbenzin (statt Kerosin) betrieben werden. Für Flugbenzin gibt es gemäss BAZL noch keine SAF.

2.4 Raum

2.4.1 Territorialitätsprinzip und Halbstreckenprinzip

Die Berechnung der Kosten erfolgt in den Bereichen **Strassen- und Schienenverkehr** grundsätzlich nach dem **Territorialitätsprinzip**: Es werden diejenigen Kosten ermittelt, welche durch den Verkehr in der Schweiz verursacht werden. Die Abgrenzung bezieht sich also auf den Ort der Verursachung: Es wird untersucht, wie stark der Verkehr in der Schweiz die Lebensqualität beeinträchtigt, losgelöst davon, ob von dieser Beeinträchtigung Bewohner und Bewohnerinnen innerhalb oder ausserhalb der Schweiz betroffen sind. Als Beispiel seien die Klimakosten erwähnt: Hier werden die Treibhausgasemissionen durch den Verkehr in der Schweiz bestimmt. Die Klimafolgeschäden, die sich in den Kostensätzen widerspiegeln, umfassen jedoch nicht ausschliesslich Schäden, die in der Schweiz auftreten.³⁶

Im **Luft- und Schiffsverkehr** hingegen kommt das **Halbstreckenprinzip** zur Anwendung. Im Luftverkehr wäre eine Berechnung nach dem Territorialitätsprinzip zwar ebenfalls möglich, doch wird eine Berechnung nach dem Halbstreckenprinzip (auch Abflugprinzip genannt) den Eigenschaften des Luftverkehrs besser gerecht: Da die meisten Flüge ab der Schweiz internationale Flüge – oft mit einem Emissionsanteil über internationalen Gewässern – sind, würden damit zusammenhängende externe Kosten beim Territorialitätsprinzip keinem Land zugeordnet. Deshalb wird beim Luftverkehr vom Territorialitätsprinzip abgewichen. Es ist darauf hinzuweisen, dass rund 95% der Klimagasemissionen der Schweizer Luftfahrt im Ausland anfallen und die Abweichung vom Territorialitätsprinzip in diesem Kostenbereich grosse Auswirkungen auf die Ergebnisse für den Luftverkehr hat. Das Halbstreckenprinzip stellt das gesamte Luftverkehrsangebot ab der und in die Schweiz dar. Es erfasst verkehrsseitig alle Flüge ab der Schweiz bis in die Hälfte der Strecke zum ausländischen Zielflughafen und ab der Hälfte der Strecke vom ausländischen Ausgangsflughafen bis in die Schweiz sowie die gesamte Strecke aller Inlandflüge (vgl. Abbildung 2-8. Das Halbstreckenprinzip wird für Flugzeuge verwendet, nicht für Individuen: Fliegt ein Schweizer von Zürich nach Frankfurt und von dort nach Indien, wird die halbe Flugstrecke bis Frankfurt miteinbezogen, nicht jedoch ein Anteil des Weiterflugs nach Indien. Fliegt ein Italiener von Rom nach Zürich und dann nach Brasilien, so wird aufgrund des Zwischenhalts in Zürich jeweils von beiden Flugstrecken die Hälfte miteinbezogen.³⁷ Das bedeutet, dass neben Flugstrecken mit Auslandanteil alle Starts

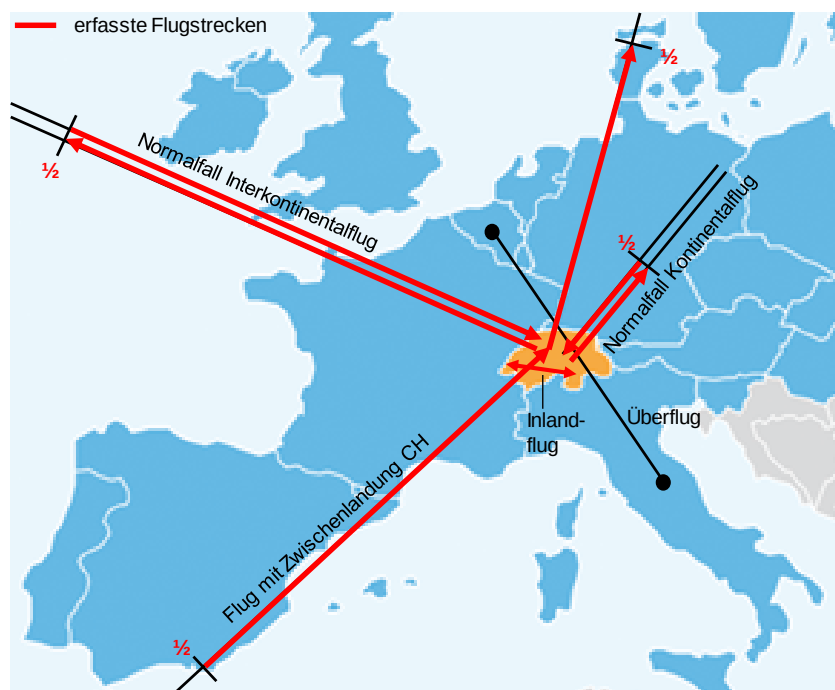
³⁶ Der Anstieg der Treibhausgas-Konzentration betrifft die gesamte Atmosphäre. Die damit verbundenen Klimaveränderungen sind unabhängig von der Ausstossquelle und in der Regel auch unabhängig vom Ort, da die Treibhausgase in der Atmosphäre lange verweilen und in dieser Zeit global bis in grosse Höhen gemischt werden. Die Emission von Treibhausgasen in der Schweiz führt demnach zu globalen Schäden. Umgekehrt führen die Emissionen anderer Länder zu Schäden in der Schweiz.

³⁷ Die Berechnung des Totals der CO₂- und Schadstoffemissionen führt mit dieser Methode in etwa zum gleichen Ergebnis wie die Zählung der gesamten Strecke aller Flüge von der Schweiz bis zur Destination im Ausland und aller Flüge innerhalb der Schweiz (Absatzprinzip).

Für das Emissionsinventar der Zivilluftfahrt, welches auch für die Erstellung des Treibhausgasinventars der Schweiz zuhanden des United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) dient, wird das „Absatzprinzip“ – in Englisch Sales Principle – verwendet. Als international anerkannter Standard wird es häufig auch für weitere Statistiken angewendet. Eine Berechnung des Treibstoffverbrauchs nach dem Absatzprinzip stimmt mit der gesamten in der Schweiz getankten Treibstoffmenge überein. Fast 100% der Emissionen werden durch Punkt zu Punkt Verbindungen generiert, für die es einen Hin- und einen Rückflug gibt, da die Schweiz mit vielen Direktflugverbindungen an die Welt

und Landungen in der Schweiz berücksichtigt werden. Auf Seite der Infrastruktur werden alle für diese Flugstrecken relevanten Infrastrukturen berücksichtigt. Das sind namentlich alle schweizerischen Flughäfen (der Landesflughafen Basel wird als Schweizer Flughafen betrachtet, obwohl er sich eigentlich auf französischem Boden befindet) sowie alle Flugsicherungsdienstleistungen, die für die erfassten Flugstrecken relevant sind. Würden alle Länder eine Berechnung für den Luftverkehr gemäss dem so definierten Halbstreckenprinzip erstellen, wären alle Flüge vollständig abgedeckt. Diese für den Luftverkehr sinnvolle Abgrenzung hat allerdings den Nachteil, dass absolute Angaben von externen Kosten nicht direkt mit anderen Sektoren verglichen werden können, welche nach dem Territorialitätsprinzip gerechnet werden.

Abbildung 2-8: Erfasste Flugstrecken nach Halbstreckenprinzip



Auch im Schiffsverkehr wird das Halbstreckenprinzip angewendet. Insbesondere erfolgt die Schifffahrt von Basel bis zur Mündung des Rheins praktisch ausschliesslich ausserhalb der Schweiz. Deshalb kommt gemäss derselben Logik wie für den Luftverkehr das Halbstreckenprinzip zur Anwendung. Für die übrige Schifffahrt innerhalb der Schweiz und auf den Grenzseen (Bodensee

angeschlossen ist. Eine Zählung der halben Flugstrecke von der Schweiz ins Ausland und der halben Strecke eines Rückflugs vom Ausland in die Schweiz (Halbstreckenprinzip) ist modelltechnisch für die Treibstoff- und Schadstoffberechnung identisch mit der Berechnung eines entsprechenden ganzen Flugs von der Schweiz bis zur Destination (Absatzprinzip). Kleine Unterschiede können z.B. durch strategisches Tanken entstehen oder durch private Flüge von meist kleinen Flugzeugen, deren Abflugort beim Flug in die Schweiz nicht mit der Destination des Weiterflugs übereinstimmen.

Das Halbstreckenprinzip hat jedoch den Vorteil, dass neben allen Starts auch alle Landungen in der Schweiz (und nicht im Ausland) berücksichtigt werden und damit auch die lokalen Umweltauswirkungen in der Schweiz wie mit dem Territorialitätsprinzip voll erfasst werden.

und Lac Léman) führen das Territorialitätsprinzip und das Halbstreckenprinzip zu demselben Ergebnis.

Diese Festlegung – Territorialitätsprinzip für Strassen und Schienenverkehr, Halbstreckenprinzip für Luft- und Schiffsverkehr – gilt als Grundsatz bei der Berechnung der externen Kosten des Verkehrs in der Schweiz. Davon wird in den folgenden drei **Ausnahmen** abgewichen:

- Für den **Fuss- und Veloverkehr** wird der Mikrozensus Mobilität und Verkehr als Datengrundlage für die erbrachte Verkehrsleistung im Fuss- und Veloverkehr verwendet. Dies bedeutet, dass nur Daten für in der Schweiz wohnhafte Personen zur Verfügung stehen. Der Fuss- und Veloverkehr von im Ausland wohnhaften Personen kann damit nicht erfasst werden.³⁸ Dafür ist der Fuss- und Veloverkehr der Schweizer im Ausland enthalten, der gemäss dem Territorialitätsprinzip eigentlich ausgeschlossen werden sollte. Die Verwendung des Mikrozensus Mobilität und Verkehr³⁹ als Grundlage zur Abschätzung der Verkehrsleistung entspricht der impliziten Annahme, dass der Fuss- und Veloverkehr der Ausländer im Inland gleich hoch ist wie derjenige der Inländer im Ausland (sozusagen Import = Export).
- Bei der Abgrenzung der **Unfälle im Strassenverkehr** wird aufgrund der vorhandenen Datengrundlagen bei Todesfällen das Territorialitätsprinzip, und bei den Verletzten das **Inländerprinzip** verwendet (vgl. Kapitel 14.1.3). Bei Unfällen im Fuss- und Veloverkehr auf öffentlichen Strassen wird sowohl für Todesfälle als auch für Verletzte das Inländerprinzip angewendet: Beim Inländerprinzip werden alle Unfälle von in der Schweiz wohnhaften Personen berücksichtigt, unabhängig davon, ob die Unfälle im In- oder Ausland stattfinden.
- Bei der **Luftverschmutzung** werden die Schäden quantifiziert, die sich aus der Luftbelastung (Emissionen aus dem In- und Ausland) bei der Schweizer Bevölkerung ergeben (Immissionen in der Schweiz).⁴⁰ Dabei wird unterstellt, dass für die Aufteilung der importierten Emissionen auf die Verursacher von der gleichen Verteilung ausgegangen werden kann, wie sie für die Aufteilung der exportierten Emissionen berechnet wird.⁴¹

Obwohl es also das Ziel ist, die Kosten und Erträge nach dem Territorial- bzw. Halbstreckenprinzip zu bestimmen, ist dies aufgrund der vorhandenen Datengrundlagen wie oben beschrieben nicht immer möglich. Die dadurch entstehenden Einschränkungen bei der Genauigkeit der Ergebnisse dürften jedoch gering sein.

³⁸ Wir gehen davon aus, dass diese Vernachlässigung aufgrund der Daten unvermeidbar ist. Sie dürfte aber auch unproblematisch sein: Die externen Kosten dürften gering sein und die externen Gesundheitsnutzen fallen im Ausland an und sind damit für die Schweiz nicht von Bedeutung.

³⁹ BFS Bundesamt für Statistik; ARE Bundesamt für Raumentwicklung (2023)

⁴⁰ Nur unter dieser Voraussetzung kann das Schweizer Schadstoffausbreitungsmodell verwendet werden. Anderenfalls müsste ein europaweites Modell zur Anwendung kommen. Zudem müssten die Gesundheitseffekte im Ausland bestimmt werden, die durch den Verkehr in der Schweiz verursacht werden. Hingegen müssten die Gesundheitsschäden in der Schweiz, die von ausländischen Emissionen verursacht werden, abgezogen werden. Dadurch würden die Datenanforderungen massiv zunehmen.

⁴¹ Andernfalls ergäben sich z.B. relativ hohe Schiffsemissionen aus Italien, die aber nicht dem geringen Schiffsverkehr in der Schweiz angerechnet werden können.

Schliesslich ist noch zu erwähnen, dass damit der Gütertransport auf den Weltmeeren ausgeschlossen ist, obwohl dieser teilweise natürlich auch für die Schweizer Bevölkerung erfolgt. Ausgeschlossen sind damit auch Schiffe, die unter Schweizer Flagge auf den Weltmeeren verkehren (Schweizer Reeder).

2.4.2 Übersicht räumliche Differenzierungen

Bei den räumlichen Differenzierungen wird neu eine Aufteilung nach **Raumtyp** für die Kosten der Luft- und Lärmbelastung vorgenommen. In den anderen Kostenbereichen ist die Differenzierung jedoch zu aufwändig und wenig relevant, so dass davon abgesehen wird (Abbildung 2-9).

Abbildung 2-9: Räumliche Differenzierungen

Kosten- / Nutzenbereiche	Raum	Kantone
Gesundheitskosten Luftverschmutzung	X	X
Gebäudeschäden Luftverschmutzung	X	X
Ernteaufschläge Luftverschmutzung	-	X
Waldschäden Luftverschmutzung	-	X
Biodiversitätsverluste Luftverschmutzung	-	X
Lärm	X	X
Klima	-	X
Vor- und nachgelagerte Prozesse	-	X
Natur und Landschaft	-	X
Bodenschäden	-	X
Unfälle	-	X
Gesundheitsnutzen Fuss und Velo	-	X

X = Differenzierung , - = Keine Differenzierung

Zudem erfolgt neu auch eine Differenzierung nach **Kantonen** (vgl. Abbildung 2-9). Dazu wird ein pragmatischer und einfach umsetzbarer Ansatz gewählt, der auf den Schadstoffemissionen oder auf den Fahrleistungen beruht.⁴² Im Lärmbereich werden die Auswertungen des Lärmmodells son-BASE direkt nach Kantonen erfolgen können. Da dieses Modell noch nicht verfügbar ist, konnten die Berechnungen im Rahmen dieser Studie noch nicht durchgeführt werden (vgl. Kapitel 9). Bei den Berechnungen wird insbesondere darauf geachtet, dass die Summe aller Kantone dem Gesamttotal der Schweiz entspricht.

⁴² Eine detaillierte Bottom-up-Berechnung beispielsweise mit kantonalen Emissionsfaktoren je nach Topografie oder mittels kantonspezifischer Kostensätze würde einen sehr grossen Bearbeitungsaufwand nach sich ziehen und kann im Rahmen dieses Mandats nicht geleistet werden.

Obige Ausführungen gelten für den Strassen- und Schienenverkehr. Im **Luftverkehr** erfolgt wie bisher eine Differenzierung nach Landesflughäfen (Zürich, Genf und Basel⁴³) und den Regionalflughäfen.

Im **Schiffsverkehr** wird wie bisher nach Schweizer Seen und Flüssen auf der einen Seite und der Schifffahrt auf dem Rhein (ab Basel rheinabwärts) auf der anderen Seite differenziert. Auf eine weitere Differenzierung nach Kantonen oder nach Raumtypen wird aufgrund fehlender Datengrundlagen⁴⁴ und aufgrund der geringen Bedeutung der Schifffahrt in der Schweiz verzichtet.

Es ist wichtig zu betonen, dass die Allokation der Kosten auf die Kantone bzw. auf den Raum nach dem **Territorialitätsprinzip** erfolgt. Das heisst, relevant ist der Ort, wo die Verkehrsaktivität stattfindet (Verursachung des Schadens) und nicht der Ort, wo der Schaden eintritt. Aus diesem Grund spielen die Fahrleistungen und die Emissionen für die Allokation eine zentrale Rolle.

2.4.3 Differenzierung nach Raumtyp

Die Ergebnisse für die Kostenbereiche Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung, Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung sowie Lärm (soziale und externe Kosten) werden neu nach Raumtyp differenziert. Diese Differenzierung soll dabei einen Erkenntnisgewinn hinsichtlich der Kostenwahrheit und der Bepreisung ermöglichen, also Hinweise auf räumlich unterschiedliche Durchschnittskosten geben.

Für die Differenzierung nach Raumtyp wird die Raumtypologie «Urbanisierungsgrad 2011» nach EUROSTAT (DEGURBA) verwendet. Diese Typologie differenziert die Gemeinden nach dicht, mitteldicht und gering besiedeltem Gebiet. Die drei Kategorien werden auch als «cities», «towns and suburbs» sowie «rural areas» bezeichnet.⁴⁵ Die Zuteilung erfolgt allein auf Basis der Dichte der Wohnbevölkerung. Die folgende Abbildung zeigt die Einteilung der Gemeinden zu den drei Raumtypen (mit Datenstand 2020).

Diese Festlegung basiert auf folgenden Überlegungen:

- Beim Urbanisierungsgrad erfolgt die Abgrenzung über die Dichte der Wohnbevölkerung. Gerade beim Lärm und bei den Luftschadstoffen fallen pro Fahrzeugkilometer die höchsten Kosten dort an, wo viele Personen an einem Ort anzutreffen sind.⁴⁶ Die am Ort der Emission wohnhafte Bevölkerung ist somit ein wichtiger Kostentreiber. Die Abgrenzung über die Dichte der

⁴³ Es wurde überlegt, ob die Ergebnisse für die drei Landflughäfen einzeln ausgewiesen werden könnten. Darauf wird verzichtet, weil es dem BAZL nicht möglich ist, die benötigten Inputdaten (z.B. Schadstoffemissionen) mit genügender Genauigkeit zu differenzieren.

⁴⁴ Die Daten dürften auf Unternehmensebene vorliegen, doch einige Unternehmen sind in mehreren Kantonen aktiv, so dass eine Aufteilung mit erheblichem Aufwand verbunden wäre.

⁴⁵ Die Zuteilung zu den drei Typen («cities», «towns and suburbs» und «rural areas») erfolgt auf Basis von Rasterzellen von 1km² Grösse, die in drei Typen unterschiedlicher Dichte («Urbane Zentren», «Urbane Cluster», «Ländliche Zellen») eingeteilt werden. Zu «cities» zählen alle räumlichen Einheiten, von denen mindestens 50% der Einwohner in urbanen Zentren wohnen. Leben mehr als 50% der Einwohner einer räumlichen Einheit innerhalb von ländlichen Zellen, so zählt die Einheit zu den «rural areas». In «towns and suburbs» leben weniger als 50% in ländlichen Zellen und weniger als 50% in Zellen Urbanen Zentren.

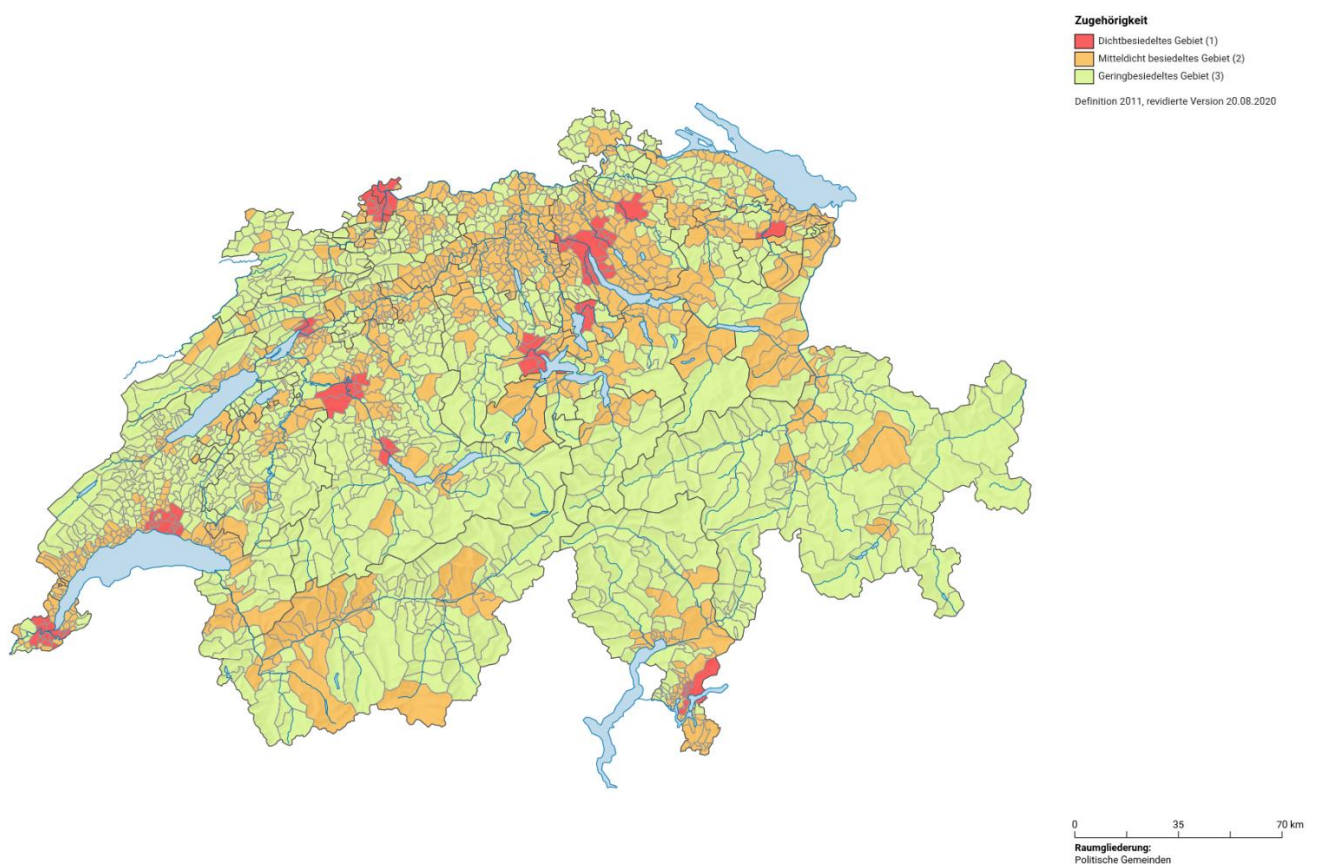
⁴⁶ Dabei werden die Immissionen am Wohnort gemessen. Die Bevölkerung am Arbeitsort (Beschäftigte) wird dabei in der bestehenden Methodik nicht betrachtet.

Wohnbevölkerung beschreibt daher diesen Kostentreiber bereits gut. Die gewählte Typologie bringt dabei einen Informationsgewinn bezüglich der Kostenwahrheit im Verkehr und zur Festlegung von Internalisierungsstrategien.

- Die Typologie ist im europäischen Raum gebräuchlich und akzeptiert, würde somit auch internationale Vergleiche ermöglichen. Die Zahl der Typen ist dabei überschaubar (3 Raumtypen). Die Abgrenzung lässt sich zudem regelmässig aktualisieren, weil sie unabhängig von funktionalen Aspekten und unabhängig von anderen Raumtypologien definiert ist.

Abbildung 2-10: Urbanisierungsgrad 2011 (Datenstand 2020)

Urbanisierungsgrad 2011 (DEGURBA – Eurostat) am 1.1.2020



Hinweis: Die Differenzierungen nach Kantonen, nach Raumtypen und nach Antriebstechnologien wird jeweils einzeln durchgeführt und nicht kumuliert. Es wird also nicht gleichzeitig zum Beispiel nach Antriebstechnologie und Kanton differenziert.

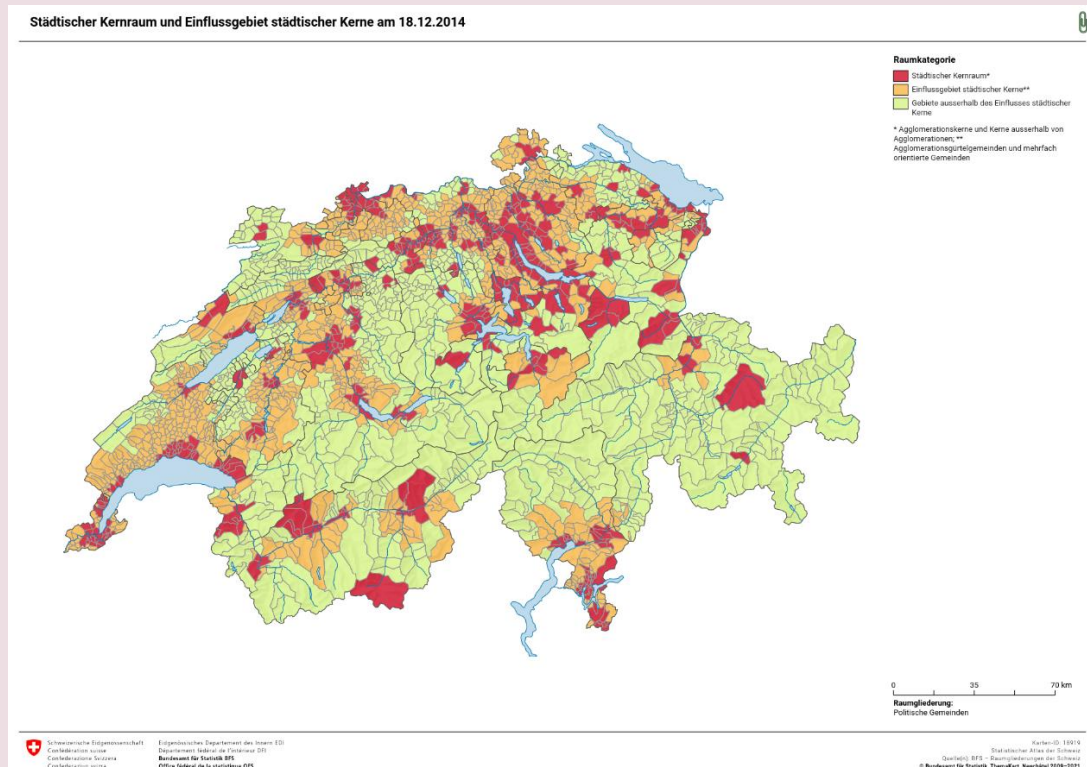
Box: Verwerfene alternative Raumtypologien

Neben der verwendeten Raumtypologie «Urbanisierungsgrad 2011» existieren in der Schweiz verschiedene andere Raumtypologien, die ebenfalls gebräuchlich sind. Nachstehend werden sie kurz vorgestellt:

Raum mit städtischem Charakter 2012 (RSC, vgl. Abbildung 2-11)

Diese Typologie wird aus den Hauptkategorien des städtisch geprägten Raums gebildet. Es wird nach «Städtischer Kernraum»⁴⁷, «Einflussgebiet städtischer Kerne»⁴⁸ und «Gebiete ausserhalb des Einflussgebiets städtischer Räume» unterschieden. Die Zuordnung erfolgt auf Grundlage der EBL (Einwohner, Beschäftigte und Äquivalente aus Logiernächten) und der Pendlerverflechtungen.

Abbildung 2-11: Raum mit städtischem Charakter 2012

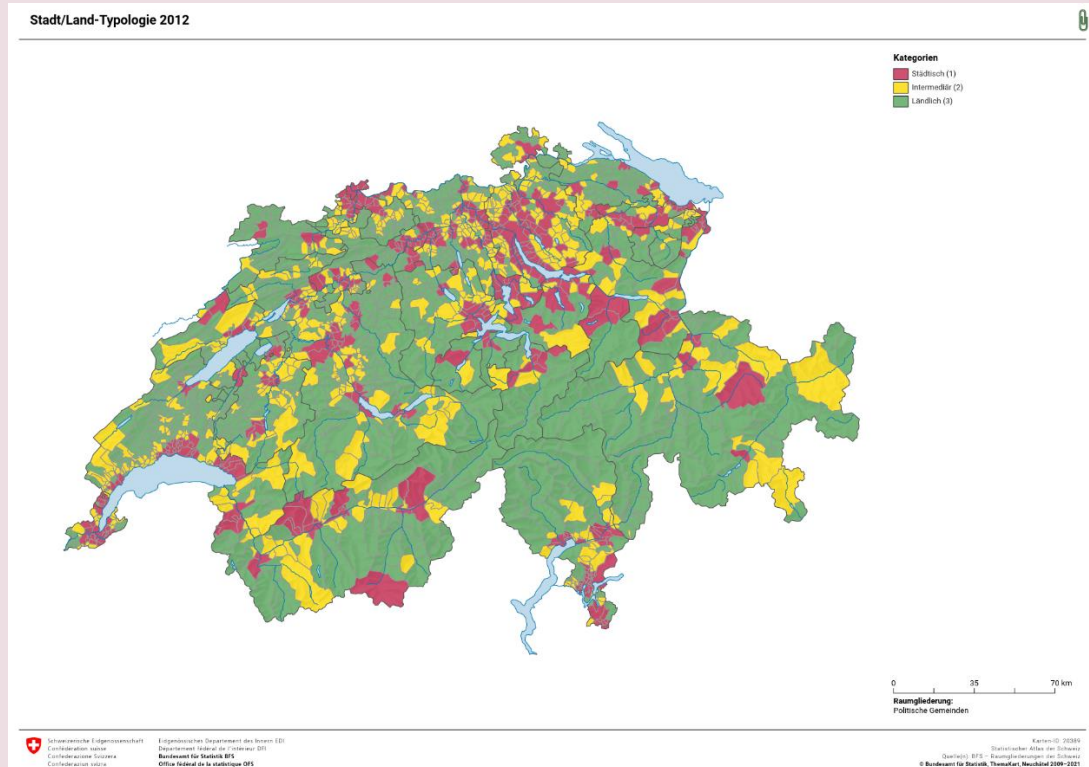


Stadt / Land-Typologie 2012 (vgl. Abbildung 2-12)

Diese Typologie nimmt eine Unterscheidung der drei Kategorien «städtisch», «intermediär» und «ländlich» vor. In einem ersten Schritt wird die Typologie gemäss «Raum mit städtischem Charakter» weiter differenziert, so dass 9 Kategorien entstehen. Die Zuordnung dieser 9 Kategorien zu den drei resultierenden Typen erfolgt jedoch mit zwei wesentlichen Unterschieden: Die «ländlichen Zentrumsgemeinden» liegen nicht «Ausserhalb des Einflussgebiets

städtischer Räume», sondern werden als «Intermediär» betrachtet. Die «periurbanen Gemeinden geringer Dichte» gelten nicht als «Einflussgebiet städtischer Kerne», sondern als «Ländlich».⁴⁹

Abbildung 2-12: Stadt/Land-Typologie 2012



Im Gegensatz zur verwendeten Typologie «Urbanisierungsgrad 2011» basieren diese beiden Alternativen auf Einwohnern, Beschäftigten und Logiernächten (EBL) sowie auf Pendlerbeziehungen und Erreichbarkeiten. Sie verzerren dadurch möglicherweise das Bild, welches sich durch den dominanten Kostentreiber der Bevölkerung am Wohnort bzw. deren Dichte bei der Berechnung der externen Kosten ergibt. Zudem werden in beiden alternativen Typologien auch funktionale und hierarchische Aspekte berücksichtigt (Kern-Umland-Hierarchie). Diese sind zwar relevant bei der Bestimmung wichtiger verkehrlicher Aspekte wie dem Verkehrsaufkommen oder dem Modalsplit. Diese Aspekte können direkter und besser über die nach Fahrzeugkategorien differenzierten Fahrzeug- und Personenkilometer erfasst werden, als indirekt über den Raumtyp.

⁴⁷ Umfasst Kernstädte, Kerngemeinden der Agglomerationen sowie Kerngemeinden ausserhalb der Agglomerationen.

⁴⁸ Umfasst Agglomerationsgürtelgemeinden und mehrfach orientierte Gemeinden.

⁴⁹ Die Stadt/Land-Typologie fasst die 9 Kategorien der Gemeindetypologie 2012 zu drei Kategorien zusammen. Die Gemeindetypologie 2012 basiert auf dem «Raum mit städtischem Charakter 2012» und differenziert diese weiter aus mit Hilfe von Grössen-, Dichte- und Erreichbarkeitsindikatoren. Die anschliessende Zuteilung der 9 Unterkategorien auf die drei neuen Hauptkategorien erfolgt jedoch anders.

3 Methodik

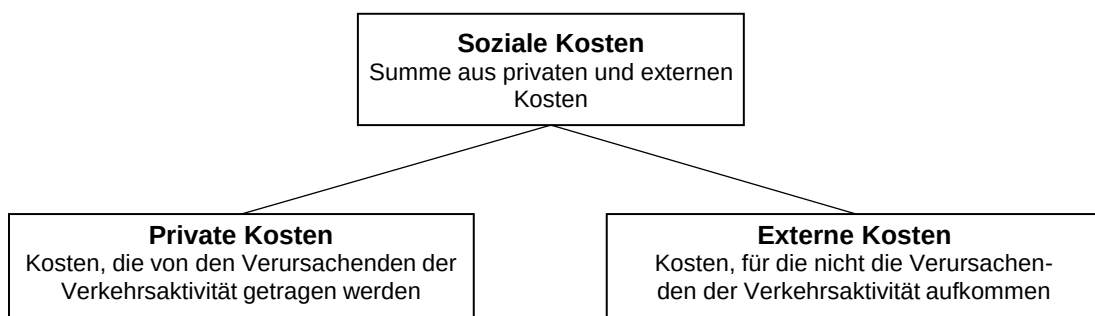
3.1 Soziale, private und externe Kosten

3.1.1 Begrifflichkeiten

Für die Analyse der externen Effekte des Verkehrs wird im Rahmen dieser Studie und in Übereinstimmung mit den bisherigen Arbeiten zur Statistik der Kosten und Finanzierung des Verkehrs (KFV) von folgendem generellem Verständnis ausgegangen:

- **Soziale Kosten:** Die sozialen (oder volkswirtschaftlichen) Kosten des Verkehrs umfassen sämtliche gesellschaftliche Kosten, die durch die Verkehrsaktivität entstehen. Sie setzen sich aus den privaten und externen Kosten zusammen (vgl. Abbildung 3-1).
- **Private Kosten:** Die privaten Kosten (auch interne Kosten genannt) sind jene Kosten, welche die Verkehrsteilnehmenden selbst für ihre Fahrten auf sich nehmen. Sie setzen sich aus materiellen Kosten (z.B. Treibstoffkosten, Autobahnvignette, Versicherungsbeiträge an die Motorfahrzeugversicherung usw.) und immateriellen Kosten (z.B. nervliche Belastung bei der Autofahrt, persönlich getragene Gesundheitsnutzen) zusammen.
- **Externe Kosten:** Als extern wird jener Teil der sozialen Kosten bezeichnet, für den nicht die Verursachenden der Verkehrsaktivität aufkommen. Typische Beispiele sind etwa der Lärm und die Luftverschmutzung, welche durch die Verkehrsaktivität verursacht werden, sich jedoch im Preis für die Fahrt nicht widerspiegeln. Diese Kosten fallen z.B. bei den Eigentümern von Mietwohnungen (als verminderte Mietzinseinnahmen) oder als gesamtgesellschaftlich zu tragende Klimakosten an. Für das Verständnis der vorliegenden Arbeiten bedeutsam ist, dass die Externalitäten von der *Verkehrsaktivität* ausgehen und nicht von *Personengruppen* (z.B. Autofahrer, Zugpassagiere). Der Einfachheit halber wird jedoch ab und zu auch von ‚Verursachern‘ von Externalitäten und ‚Dritten‘ (Opfer der Externalitäten) gesprochen. Dies bezweckt die bessere Verständlichkeit des Textes, soll jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass jede Person Verursacher (wenn sie z.B. mit dem Auto zum Einkaufen fährt) und Opfer (wenn sie etwa unter nächtlichem Verkehrslärm leidet) sein kann.

Abbildung 3-1: Soziale, private und externe Kosten



- Die Kosten für «Natur und Landschaft» sowie «vor- und nachgelagerte Prozesse, Teil Infrastruktur» sind zwei Ausnahmen vom Prinzip der Abhängigkeit von der *Verkehrsaktivität*, da diese Kosten in erster Linie von der Infrastruktur abhängen. Sie variieren nicht direkt und unmittelbar mit der Verkehrsmenge. Dennoch werden sie im Rahmen dieser Studie berechnet, da sie verkehrsbedingte Umweltkosten darstellen (die es ohne Verkehr nicht gäbe), die für die sozialen Kosten und somit für die KfV-Statistik relevant sind.

Box: Definition der externen Kosten, Verursacherprinzip und Eigentumsrechte⁵⁰

a) Definition der externen Kosten

Im Folgenden wollen wir auf diese ökonomische Herleitung der externen Kosten etwas ausführlicher eingehen. Der Begriff der externen Kosten stammt aus der ökonomischen Wohlfahrtstheorie. Sie werden folgendermassen definiert:

Externe Kosten liegen vor, wenn von Aktivitäten eines Wirtschaftssubjektes (Produktion oder Konsum) negative Einflüsse auf andere Wirtschaftssubjekte (Produzenten oder Konsumenten) ausgehen – und somit deren Wohlfahrt beeinflussen – ohne dass diese Nachteile sich in den Preisen für diese Aktivitäten niederschlagen und über einen Marktprozess weitergegeben werden.

Als typisches Beispiel kann auf die bereits erwähnten Lärmemissionen aus Verkehrsaktivitäten verwiesen werden. Sie führen bei den Anwohnern einer Strasse zu einer Beeinträchtigung ihrer Gesundheit und ihres Wohlbefindens und damit zu einem Wohlfahrts- bzw. Nutzenverlust (und somit zu Kosten), die sich – ohne lenkende Eingriffe des Staates – nicht im Preis für die Verkehrsaktivität reflektieren. Die fehlende Internalisierung dieser Kosten führt dazu, dass die Verkehrsaktivität in zu grossem Ausmass ausgeübt wird bzw. die Verkehrsteilnehmenden mehr Fahrten unternehmen, als aus Sicht der gesamtwirtschaftlichen Wohlfahrt optimal wäre.

b) Technologische versus pekuniäre Externalitäten

Wesentlich ist also beim Vorliegen von externen Kosten, dass von einer Aktivität eines Verursachers Wirkungen auf Dritte ausgelöst werden, ohne dass die Überwälzung dieser negativen Effekte über einen direkt mit der Aktivität verbundenen Marktprozess erfolgt. In der ökonomischen Theorie spricht man in diesem Zusammenhang auch von «technologischen» Externalitäten, um sie von normalen Anpassungen auf eine veränderte Marktlage (man spricht in diesem Fall von «pekuniären» Externalitäten) unterscheiden zu können.

Die Unterscheidung zwischen externen Kosten (technologischen Externalitäten) und normalen Markteffekten (pekuniäre Externalitäten) wird in der öffentlichen Diskussion häufig ver-

⁵⁰ Die Box richtet sich an Leserinnen und Leser, die an einer etwas ausführlicheren Erläuterung der ökonomischen Theorie zu den externen Kosten interessiert sind.

nachlässigt, obwohl sie in Bezug auf die unterschiedlichen wirtschaftspolitischen Implikationen zentral ist. Anhand eines Beispiels aus der landwirtschaftlichen Produktion lässt sich das gut illustrieren. Wir gehen hierzu von folgender Ausgangslage aus:⁵¹

- Ein Bauer produziert mit dem Einsatz von Saatgut, Boden, Kapital und Arbeit eine bestimmte Menge von Getreide.
- Auf dem Nachbarboden siedelt sich ein neues Unternehmen an, das mit dem Einsatz von Kapital, Arbeit und chemischen Vorprodukten ein bestimmtes chemisches Endprodukt herstellt.

Wir nehmen an, dass zwei Externalitäten zu beobachten sind:

- Bei der Herstellung des chemischen Endprodukts stösst das Unternehmen Schadstoffe in die Umwelt aus, die den Ernteertrag des Bauern schmälern.
- Durch die zusätzliche Nachfrage des Unternehmens nach Arbeitskräften steigen die Löhne.

Im ersten Fall (**Schadstoffausstoss**) handelt es sich um eine **technologische Externalität**. Der Schadstoffausstoss der Unternehmung **verändert die Produktionsfunktion** des Bauern. Mit dem gleichen Einsatz von Boden und Arbeit kann der Bauer wegen der Schadstoffe nicht mehr dieselbe Ernte einholen.⁵² Diese Externalität stellt ein volkswirtschaftliches Problem dar, da die privaten Kosten des chemischen Unternehmens in diesem Fall nicht den gesamten sozialen Kosten entsprechen. Das Unternehmen berücksichtigt den verursachten Ernteausfall beim Bauern in seinen Entscheidungen nicht und hat somit tiefere Produktionskosten. Durch das Auseinanderklaffen von privaten und sozialen Kosten werden aus gesamtgesellschaftlicher Sicht die Ressourcen nicht optimal alloziiert. Die Folge ist, dass das Unternehmen eine grössere Menge an chemischen Endprodukten herstellt, als es volkswirtschaftlich optimal wäre. Es besteht daher ein Internalisierungsbedarf.

Im zweiten Fall (**gestiegene Löhne**) handelt es sich um eine **pekuniäre Externalität**. Der Bauer wird zwar wegen der gestiegenen Löhne den Einsatz seiner Produktionsfaktoren anpassen, indem er z.B. den Kapitaleinsatz vergrössert und weniger Arbeitskräfte einsetzt. Diese Reaktion ist aber eine normale Anpassung auf eine veränderte Marktlage. Sie hat keinen Einfluss auf seine Produktionsfunktion. Würde die Unternehmung ohne Schadstoffausstoss produzieren, so könnte der Bauer trotz den gestiegenen Lohnkosten nach wie vor **mit derselben Produktionsfunktion** arbeiten. Bei gleichem Einsatz von Arbeitskräften, Boden und Saatgut wie vor der Ansiedlung der Unternehmung, wäre seine Ernte so gross wie zuvor. Die privaten Kosten des Unternehmens für den Einsatz der Arbeitskräfte entsprechen den sozialen Kosten (bzw. den Kosten, die sich auf dem Arbeitsmarkt ergeben und mit denen auch der Bauer konfrontiert ist). Ein Auseinanderklaffen von privaten und sozialen Kosten liegt somit nicht vor. Die Entscheide des Unternehmens und des Bauers führen in diesem

⁵¹ Das nachfolgende Beispiel ist übernommen aus Ecoplan; INFRAS (2006b).

⁵² Man kann sich vorstellen, dass die Produktionsfunktion des Bauern (Saatgut, Boden, Kapital, Arbeit) nun plötzlich ein zusätzliches, produktionsminderndes Element (Menge Schadstoffausstoss des Unternehmens) enthält, welches er einfach hinzunehmen hat, ohne dass die Menge des Schadstoffes über einen Preis reguliert wird.

Fall zu einer optimalen Allokation der Ressourcen. Es besteht kein Anlass, dass der Staat in irgendeiner Weise in die notwendigen Marktanpassungen eingreift.

Fazit

- Eine technologische Externalität hat zur Folge, dass die privaten Kosten des Externalitäten-Verursachers nicht den sozialen Kosten entsprechen. Dies führt zu einer gesamtgesellschaftlich nicht optimalen Allokation der Ressourcen. Es besteht damit grundsätzlich ein Handlungsbedarf: Das Verursacherprinzip ist umzusetzen, indem die durch die chemische Produktion ausgelösten Schäden in der Landwirtschaft dem Verursacher anzu-lasten sind. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von der Internalisierung der externen Kosten. **In der vorliegenden Studie und den nachfolgenden Berechnungen werden unter externen Kosten diese technologischen Externalitäten verstanden.**
- Die **pekuniäre Externalität** (Markteffekt) verursacht keine Differenz zwischen privaten und sozialen Kosten. Sind die Anpassungen an die veränderten Marktsituationen erfolgt, so ergibt sich wieder eine optimale Allokation der Ressourcen. Es besteht somit kein Anlass, in die Marktprozesse einzugreifen. **Diese Markteffekte sind nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.**

c) Externe Kosten versus Opportunitätskosten

Im Zusammenhang mit der Flächenbeanspruchung von Verkehrsinfrastrukturen (Strassen, Schienen, Flughäfen usw.) wird immer wieder die Frage aufgeworfen, wie mit den sogenannten Opportunitätskosten umzugehen ist und ob sie ebenfalls als externe Kosten des Verkehrs zu berücksichtigen sind. Unter Opportunitätskosten versteht man dabei entgangene Gewinne bzw. Nutzen, die entstehen, wenn eine beschränkte Ressource (im vorliegenden Fall der Boden) für eine bestimmte Möglichkeit (z.B. Bau einer Strasse) genutzt wird und dadurch die nächstbeste Möglichkeit (z.B. Verwendung der Fläche zur landwirtschaftlichen Produktion, zur Erstellung von Wohn- oder Gewerbebauten oder als Biodiversitätsfläche) nicht mehr verwendet werden kann. Es ist unbestritten, dass solche Opportunitätskosten für Verkehrsinfrastrukturen bestehen. Sie sind umso höher, je höher der Nettonutzen der nächstbesten Option ist, d.h. auch je höher die Nutzungskonkurrenz ist.

Die Opportunitätskosten können sich im Laufe der Zeit ändern. Wenn sich beispielsweise die Erschliessung dank eines gebauten Anschlusses verbessert und in der Folge der Landpreis mit den Jahren steigt, ist das eine normale Anpassung auf dem Landmarkt, also eine sogenannte «pekuniäre Externalität» (vgl. dazu die Definition in Abschnitt b). Dies hat aber nichts mit (technologischen) externen Kosten gemäss der Definition in Abschnitt a) zu tun. Wesentlich ist, dass im Zeitpunkt des Investitionsentscheids (z.B. zum Bau einer Strasse) der beanspruchte Boden korrekt mit dem volkswirtschaftlichen Wert bewertet wird.

d) Externe Kosten und Verursacherprinzip

Das «Verursacherprinzip» stellt in den Umweltwissenschaften einen wichtigen Grundsatz dar, indem verlangt wird, dass die gesamten sozialen Kosten einer ökonomischen Aktivität

von denjenigen Wirtschaftssubjekten zu tragen sind, die sie verursachen. Die ökonomische Begründung dieses Grundsatzes liegt wie vorangehend aufgezeigt in der Sicherstellung einer optimalen Allokation der Ressourcen (Arbeit, Boden, Kapital, Rohstoffe usw.), um aus ökonomischer Sicht mit den vorhandenen Ressourcen ein Maximum an Wohlfahrt zu erreichen. Der Konnex zwischen externen Kosten und Verursacherprinzip liegt auf der Hand: Die Umsetzung des Verursacherprinzips ist letztlich erst möglich, wenn die Höhe allfälliger externer Kosten bekannt ist. Erst dann lässt sich festlegen, in welchem Ausmass Internalisierungsmassnahmen (z.B. die Belastung einer Aktivität mit einer bestimmten Abgabe) zu ergreifen sind, um ein Auseinanderklaffen zwischen den vom Verursacher getragenen (privaten) Kosten und den gesamten sozialen Kosten vermeiden zu können.

Das Verursacherprinzip ist in der ökonomischen Theorie somit unbestritten und auch die Bundesverfassung weist in Bezug auf den Umweltschutz auf das Verursacherprinzip hin.⁵³ Eine konsequentere Umsetzung wird ebenfalls im Sachplan Verkehr – Teil Programm⁵⁴ gefordert:

«Die Verankerung des Verursacherprinzips bedeutet eine schrittweise Übernahme aller Kosten im Verkehrsbereich durch die Nutzenden, wo dies gesellschaftlich und wirtschaftlich sinnvoll ist. [...] Der Bund schafft Grundlagen wie auch Rahmenbedingungen und unterstützt Massnahmen, die zur Internalisierung der externen Kosten und Nutzen des Verkehrs beitragen.»

Ebenso wird in der Strategie für nachhaltige Entwicklung⁵⁵ das Verursacherprinzip und die Internalisierung externen Kosten mehrfach gefordert. Im vorliegenden Mandat werden mit der Berechnung der Höhe der externen Kosten die Grundlagen für deren Internalisierung geschaffen. Um die Internalisierung bzw. Bepreisung des Verkehrs möglichst nah entlang der verursachten Kosten vornehmen zu können, gilt es in diesem Projekt

- weitere Differenzierungen (nach Antriebsart, nach Raumtyp) vorzunehmen und
- neu die Sicht Verkehrsteilnehmende ins Zentrum zu stellen (vgl. Abschnitt 3.1.2).

e) Eigentumsrechte und externe Kosten

Die Ermittlung der externen Kosten ist eng verknüpft mit der Frage nach den Eigentumsrechten. Wem gehört die saubere Luft? Wer hat Anrecht auf ein sauberes Gewässer? Ist das Recht auf Ruhe den Anwohnern entlang einer Strasse zugewiesen oder sind die Ver-

⁵³ Bundesverfassung, Art. 74 Umweltschutz:

- 1 - Der Bund erlässt Vorschriften über den Schutz des Menschen und seiner natürlichen Umwelt vor schädlichen oder lästigen Einwirkungen.
- 2 - Er sorgt dafür, dass solche Einwirkungen vermieden werden. Die Kosten der Vermeidung und Beseitigung tragen die Verursacher.
- 3 - Für den Vollzug der Vorschriften sind die Kantone zuständig, soweit das Gesetz ihn nicht dem Bund vorbehält.

⁵⁴ UVEK Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation; ARE Bundesamt für Raumentwicklung; ASTRA Bundesamt für Strassen; u. a. (2021), Handlungsgrundsatz U4, S. 47.

⁵⁵ Bundesrat (2021).

kehrsteilnehmenden berechtigt, die Umgebung zu beschallen? Insbesondere bei öffentlichen Gütern wie sauberer Luft, Ruhe, fruchtbaren Böden, intaktem Landschaftsbild usw. stellt sich häufig das Problem, dass das Eigentum an diesen Gütern in der Vergangenheit nicht explizit geregelt wurde, bzw. dass die Inanspruchnahme dieser Güter (Verschmutzung der Luft, Beschallung durch Verkehr, Eintrag von Schadstoffen in die Böden usw.) nichts kostete und der Ausschluss von der Nutzung kaum möglich ist. Dies führte dazu, dass diese Güter zunehmend übernutzt wurden und die gesellschaftliche Wohlfahrt in immer grösserem Ausmass tangiert wurde.

Um dieser Übernutzung Einhalt zu gebieten, hat der Staat in vielen Bereichen eingegriffen und die Eigentumsrechte z.B. in Form von Grenzwerten (Lärm, Luftverschmutzung) bis zu einem gewissen Grad der Allgemeinheit zugewiesen. Wer in einem Ausmass die Luft verschmutzt oder die Umwelt beschallt, welches die gesetzlichen Grenzwerte übersteigt, hat grundsätzlich als Verursacher auch für die Kosten aufzukommen.⁵⁶ Damit sind jedoch noch nicht alle externen Kosten internalisiert, da bereits unterhalb der Grenzwerte Schädigungen oder Störungen auftreten können. So wird z.B. Lärm schon bei Belastungen unter dem gesetzlichen Grenzwert als Belästigung empfunden und führt somit zu Nutzeneinbussen und gesundheitlichen Kosten. Gesetzliche Grenzwerte sind auch immer ein Resultat von politischen Verhandlungsprozessen und widerspiegeln damit nicht unbedingt ökonomisch optimale Lösungen.

3.1.2 Die zwei Sichtweisen der externen Kosten

a) Die zwei Sichtweisen im Überblick

Wie hoch externe Kosten sind, ist immer auch abhängig von der Sichtweise, bzw. von der Definition, was als system-intern und was als system-extern angesehen wird. Für die externen Kosten des Verkehrs werden zwei verschiedenen Sichtweisen unterschieden – nämlich aus der Sicht Verkehrsteilnehmende und der Sicht Verkehrsart (die Sicht Verkehrsträger, die in früheren Statistiken und Berichten zu finden ist, wird hier nicht mehr berechnet, vgl. auch Abbildung 3-2 und Abschnitt b)):

- **Sicht Verkehrsteilnehmende:** Bei dieser Sicht wird für die Abgrenzung von privaten und externen Kosten vom einzelnen Verkehrsteilnehmenden ausgegangen. Alle Kosten, die der Teilnehmende an der Verkehrsaktivität nicht selbst trägt, werden als extern betrachtet. Es spielt

⁵⁶ Im Zusammenhang mit der Zuweisung der Eigentumsrechte gilt es darauf hinzuweisen, dass es aus rein ökonomischer Sicht zur Erreichung eines Wohlfahrtsoptimums nicht in jedem Fall erforderlich ist, die Eigentumsrechte den Geschädigten zuzuweisen. Sie könnten unter bestimmten Voraussetzungen auch den Verursachern einer Aktivität zugeordnet werden. Coase hat hierzu in seinem Arbeiten (vgl. Coase-Theorem) den Nachweis erbracht, dass bei klar zugewiesenen Eigentumsrechten und wenn die Verhandlungen bezüglich den Externalitäten kostenlos sind, alle Parteien durch Verhandlungen eine sozial effiziente Allokation erreichen können – unabhängig davon, ob die Eigentumsrechte bei den Verursachern oder den Geschädigten liegen.

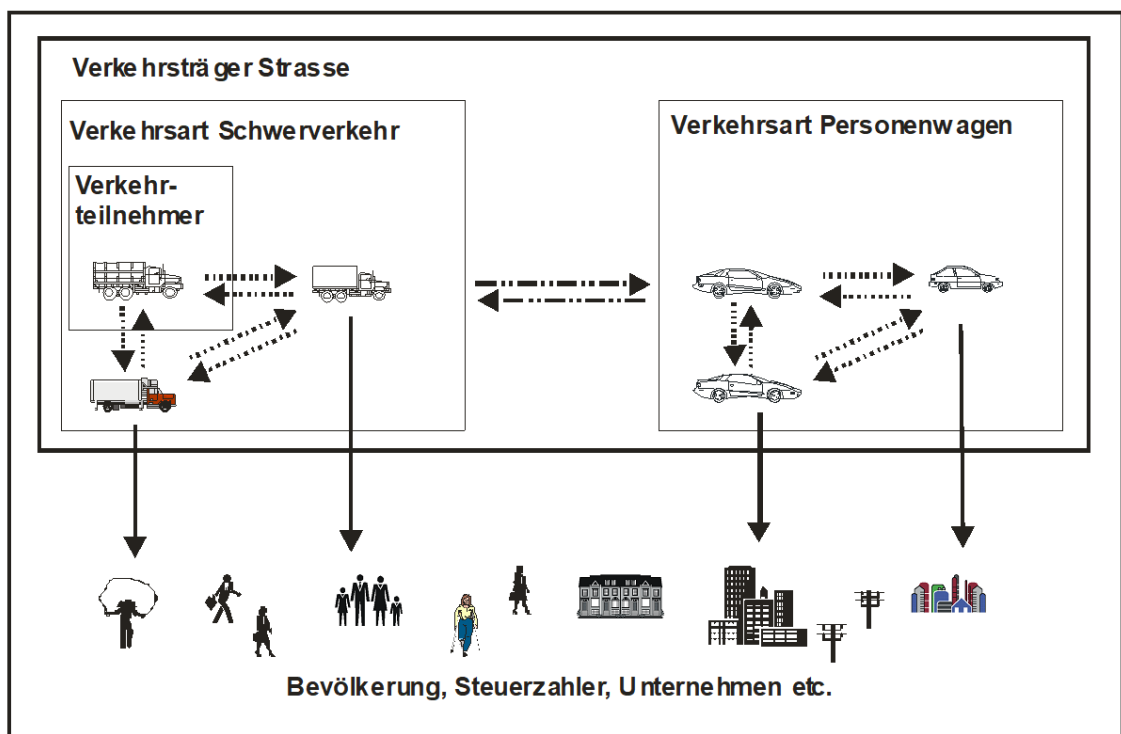
Im vorliegenden Kontext der verkehrsbedingten Umweltkosten würde jedoch eine Zuweisung der Eigentumsrechte auf die Verursachenden (Verkehrsteilnehmenden) nicht zu einem wohlfahrtsoptimalen Ergebnis führen. Die Verhandlungskosten wären viel zu hoch bzw. die Lösung wäre nicht praktikabel, wenn beispielsweise der einzelne Anwohner oder die einzelne Anwohnerin mit allen Verkehrsteilnehmenden über eine Entschädigung verhandeln müsste, dass sie weniger Fahrten unternehmen und er/sie damit mehr Ruhe geniessen könnte.

dabei keine Rolle, wo diese ungedeckten Kosten anfallen (z.B. bei anderen Verkehrsteilnehmenden, beim Steuerzahler oder bei einem Unternehmen). Diese Sicht entspricht der üblichen Definition der Externalität in der ökonomischen Literatur.

- **Sicht Verkehrsart:** Hier steht die Verkehrsart (z.B. Schwerverkehr) im Zentrum. Als extern gelten alle Kosten, die nicht bei der eigenen Verkehrsart anfallen. Im Unterschied zur Sicht Verkehrsteilnehmende werden Kosten, die ein Lastwagen einem Sattelschlepper verursacht, als system-intern betrachtet.

Grundsätzlich nehmen die externen Kosten zu, wenn der Kreis, der als extern angesehenen Kostenträger, vergrößert wird.⁵⁷ Dies gilt insbesondere für die Unfallkosten (unterschiedliche Behandlung der Unfälle zwischen einzelnen Verkehrsteilnehmenden oder Verkehrsarten). Für die Umweltkosten (z.B. Luftverschmutzung, Klima) sind die externen Kosten aus beiden Sichtweisen gleich hoch, weil keine Kosten zwischen den Verkehrsteilnehmenden auftreten (oder quantifiziert werden können).

Abbildung 3-2: Vergleich der Sichtweisen zur Erfassung der externen Kosten (am Beispiel der Verkehrsart Schwerverkehr und den Personenwagen)



Berücksichtigte Effekte in der Sicht Verkehrsart



Berücksichtigte Effekte in der Sicht Verkehrsteilnehmende



⁵⁷ Es gilt also: Externe Kosten aus Sicht Verkehrsart $\leq$ Externe Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende.

b) Einsatzgebiet der verschiedenen Sichtweisen der externen Kosten

Aus ökonomischer Sicht sind die zwei Sichtweisen wie folgt zu beurteilen:

- Bei der **Sicht Verkehrsteilnehmende** steht die volkswirtschaftlich **effiziente** Nutzung der Verkehrsinfrastruktur im Zentrum der Kostenermittlung. Dazu ist es erforderlich, dass alle Kosten, die der Verursacher nicht selbst trägt, als externe Kosten erfasst werden – und zwar unabhängig davon, ob sie bei anderen Verkehrsteilnehmenden anfallen oder ausserhalb des Verkehrsträgers.

Aus verkehrsökonomischer Sicht hat die Sicht Verkehrsteilnehmende folgende Vorteile: Bei entsprechender Internalisierung der so ermittelten externen Kosten (der Preis der einzelnen Verkehrsaktivität muss den gesamten sozialen Kosten dieser Verkehrsaktivität entsprechen) kann das Ziel einer effizienten Nutzung der Verkehrswege erreicht werden.⁵⁸ Ziel der Internalisierung ist eine Wiederherstellung der volkswirtschaftlichen Effizienz beim Vorliegen externer Effekte (Verursacherprinzip).

- Die **Sicht Verkehrsart** eignet sich für die Abschätzung der Kosten, die eine bestimmte Verkehrsart (z.B. der Schwerverkehr) auf alle anderen Verkehrsarten und Nicht-Verkehrsteilnehmende ausübt. Dabei soll insbesondere sichergestellt werden, dass z.B. der Leichtverkehr nicht für Kosten aufkommen muss, die vom Schwerverkehr verursacht werden. Die Sichtweise Verkehrsart ist aus Effizienz- und Wohlstandsüberlegungen der Sichtweise Verkehrsteilnehmende klar unterlegen. Das Bundesgericht hat jedoch die Verwendung der Sicht Verkehrsart für die Berechnung der LSVA explizit vorgeschrieben,⁵⁹ um die externen Kosten des Schwerverkehrs zu internalisieren. Die Berechnung des Kostendeckungsgrades des Schwerverkehrs – wie sie im Schwerverkehrsabgabegesetz gefordert wird – hat also aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr zu erfolgen.

Im Folgenden werden die externen Kosten jeweils aus **Sicht Verkehrsteilnehmende** ermittelt. **Im Strassenverkehr** wird **zusätzlich** noch die **Sicht «Verkehrsart Schwerverkehr»** ermittelt, da sie weiterhin als Grundlage für die Bemessung der LSVA benötigt wird. Auf die bisher im Zentrum stehende Sicht Verkehrsträger wird jedoch verzichtet.⁶⁰

⁵⁸ Der Anteil der externen Kosten an den gesamten sozialen Kosten ist beim Verkehr (aber auch bei der Produktion von anderen Gütern) nicht fest vorgegeben. Er hängt von den technischen Produktionsmöglichkeiten und von den ergriffenen Internalisierungs-Massnahmen ab. So kann z.B. die von Motorfahrzeugen verursachte Luftverschmutzung (externe Kosten) durch die Einführung von Katalysatoren erheblich vermindert werden. Ebenso sind gesetzliche Vorschriften denkbar, welche die Unfallverursachenden verpflichten, die Kosten der Nicht-Unfall-Verursachenden zu tragen.

⁵⁹ Bundesgericht, Urteil vom 17. Dezember 2011, LSVA, Abklassierung EURO-3.

⁶⁰ Siehe Ecoplan; INFRAS (2014) Kapitel 2.3.1. Die Sicht Verkehrsträger diene als Mindestdefinition von Externalität und hatte den Vorteil, einen einfachen Vergleich zwischen zwei Verkehrsträgern (z.B. «Strasse» und «Schiene») zu ermöglichen. Diese Sichtweise hat aber den Nachteil, dass sie alles, was innerhalb eines Verkehrsträgers – wie die heterogene Gruppe «Strasse» – geschieht, ausblendet. Neu soll die Internalisierung der externen Effekte und die volkswirtschaftlich effiziente Nutzung der bestehenden Infrastrukturen im Vordergrund stehen. Damit rückt neu die Sicht Verkehrsteilnehmende in den Fokus und auf die Sicht Verkehrsträger kann verzichtet werden. So beabsichtigt auch das BFS, die KfV-Statistik künftig aus Sichtweise Verkehrsteilnehmende zu publizieren.

3.2 Generelles Konzept zur Ermittlung der externen Kosten

3.2.1 Grundkonzept

Die Methodik zur Berechnung der externen Kosten des Verkehrs orientiert sich an den Vorgehensweisen, wie sie in den bisherigen Studien für das Jahr 2010 und 2015 verwendet wurden.⁶¹ Die allgemeine Systematik zur Berechnung der externen Kosten wird in der folgenden Abbildung dargestellt:

- Ausgangslage bildet die Verkehrsmenge bzw. die Fahrleistungen im Strassen-, Schienen- und Schiffsverkehr, Bewegungen und Distanzen im Luftverkehr, Personenkilometer (pkm) im Fuss- und Veloverkehr etc.
- Daraus wird die Belastungssituation abgeschätzt. Je nach Kostenbereich sind für diese Schätzungen Informationen zu Emissionsfunktionen, Windverhältnissen, Bevölkerungsdichte, Bebauung, Lärmschutzwänden, Aufteilungen nach Verletzungsschweren etc. nötig.
- In einem nächsten Schritt werden die daraus resultierenden Effekte bzw. Schäden ermittelt. Dabei handelt es sich je nach Kostenbereich z.B. um die Zahl der zusätzlichen kranken, verletzten oder getöteten Personen, um die Anzahl beschallter Wohnungen oder um das Ausmass geschädigter Gebäudeflächen. Um diese Effekte bestimmen zu können, werden Belastungs-Wirkungs-Beziehungen, Krankheitshäufigkeiten in der Bevölkerung, Dunkelziffern⁶², Überlebenswahrscheinlichkeiten und weitere Grundlagen verwendet.
- Dann werden die Schäden in Geldeinheiten quantifiziert. Dazu werden je nach Kostenbereich spezifische Kostensätze pro Unfall, Verletzten, Getöteten, Krankheitsfall, verlorenes Lebensjahr oder Abnahme der Wohnungspreise ermittelt und mit den ermittelten Schäden verknüpft. Die Wahl der Bewertungsmethode für die Herleitung der Kostensätze wird in der folgenden Box erläutert.

Zudem werden einige grundlegende Vorgaben, die für alle Kostenbereiche gelten, aus den bisherigen Studien für die Jahre 2010 und 2015 übernommen:

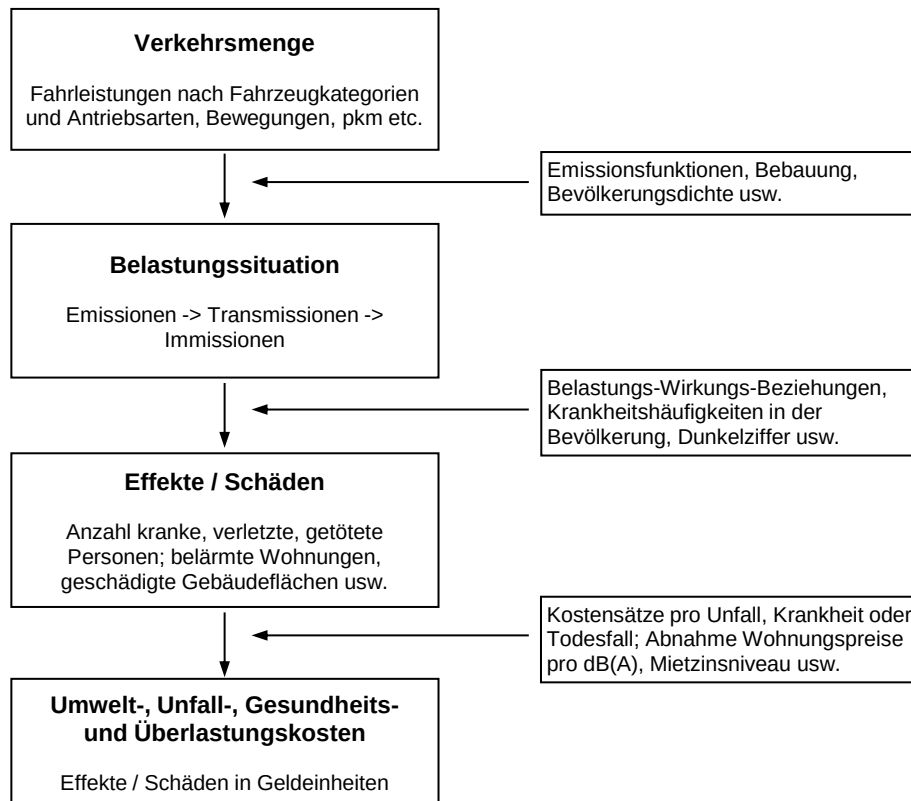
- Für die internationale Vergleichbarkeit der Ergebnisse werden sämtliche Kostenberechnungen auf der Basis von **Faktorpreisen** vorgenommen. Als Faktorpreise werden die Preise ohne indirekte Steuern (z.B. MWST) bezeichnet. Die Marktpreise liegen durchschnittlich 6.4%⁶³ über den Faktorpreisen.

⁶¹ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019).

⁶² Die Dunkelziffer ist bei den Strassenverkehrsunfällen relevant. Es handelt sich hierbei um jene Unfälle und Unfallopfer, die polizeilich nicht registriert sind und daher in der offiziellen Unfallstatistik nicht als Strassenverkehrsunfälle ausgewiesen werden.

⁶³ Dieser Prozentsatz berechnet sich als Nettosteuern (gesamte indirekte Steuern abzüglich Subventionen) geteilt durch die gesamten privaten Ausgaben (final consumer expenditure) aller Einwohnerinnen und Einwohner der Schweiz. Die Datenbasis ist die Input-Output-Tabelle 2017 des BFS (aktuellste verfügbare Daten – inkl. Revision Oktober 2022).

Abbildung 3-3: Allgemeine Systematik zur Berechnung von Unfall- und Umweltkosten sowie Überlastungskosten



- Die Ergebnisse werden jeweils zu den **Preisen des entsprechenden Jahres** (hier 2021) ausgewiesen. Dies ergibt sich automatisch, weil jeweils die Daten des entsprechenden Jahres verwendet werden. Das bedeutet, dass bei der Betrachtung einer Zeitreihe über mehrere Jahre die Inflation zu einer Zunahme der berechneten Werte über die Zeit führt.
- Bei den Berechnungen der Kosten des Jahres 2021 werden auch jene Kosten berücksichtigt, welche erst nach dem Jahr 2021 anfallen (z.B. medizinische Behandlungskosten, Produktionsausfall usw. nach Krankheiten oder Unfällen). Wenn im Folgenden also von Kosten gesprochen wird, dann sind damit immer alle **Folgekosten** (auch die zukünftigen) der Belastungen des Jahres 2021 gemeint bzw. alle Kosten, die im Jahr 2021 verursacht werden.⁶⁴

⁶⁴ Die Folgekosten werden zu Preisen des aktuellen Jahres (hier 2021) berücksichtigt und diskontiert.

Box: Wahl der Bewertungsmethode⁶⁵

Es gibt verschiedene Ansätze, um die Folgekosten einer Aktivität (hier die externen Kosten des Verkehrs) zu bewerten (vgl. Abbildung 3-4):

- **Schadenskosten-Ansatz (1):** Bei diesem Ansatz wird versucht, den entstehenden Schaden (z.B. durch Luftverschmutzung, Lärm oder Unfälle) abzuschätzen.
- **Vermeidungskosten-Ansatz (2):** Bei diesem Ansatz werden die Kosten von Massnahmen verwendet, welche die Entstehung von Schäden verhindern. Es werden also nicht wie beim Schadenskosten-Ansatz die Kosten des Schadens ermittelt, sondern es wird untersucht, wie teuer es ist, den Schaden zu vermeiden. Bei den Vermeidungskosten besteht kein direkter Zusammenhang zwischen den ermittelten Kosten und dem Schaden – es ist sowohl eine Überschätzung als auch eine Unterschätzung des Schadens möglich. Deshalb werden meist die Vermeidungskosten für ein politisch akzeptiertes Ziel berechnet (z.B. Netto-Null 2050 für Treibhausgase). Dieses Ziel ist implizit mit einer gesellschaftlichen Bewertung des Schadens verbunden.
- **Reparaturkosten- oder Ersatzkosten-Ansatz (3):** In einem dritten Ansatz werden die Kosten von Massnahmen ermittelt, die den entstandenen Schaden reparieren oder das beschädigte Gut ersetzen. So kann z.B. das durch eine neue Strasse verbrauchte Land (z.B. ein Moor) mit den Kosten bewertet werden, die entstehen, wenn das verlorene Moor andernorts ersetzt wird. Bei den Reparatur- oder Ersatzkosten besteht kein direkter Zusammenhang zwischen den ermittelten Kosten und dem Schaden. Zudem sind Reparatur bzw. Ersatz oft nicht perfekt. Es ist sowohl eine Unter- als auch eine Überschätzung des Schadens möglich.

Auch was die Bewertungsmethode anbelangt, gibt es drei Möglichkeiten (vgl. Abbildung 3-4):

- **Marktpreise (a in Abbildung 3-4):** In erster Priorität hat die Bewertung anhand von Marktpreisen zu erfolgen, da diese die Knappheit der verbrauchten Ressourcen bzw. die Wertschätzung der Gesellschaft für ein bestimmtes Gut (z.B. Ruhe, saubere Luft oder unverschmutztes Trinkwasser) am besten reflektieren.

Liegen keine direkt beobachtbaren Marktpreise vor – was insbesondere bei Umweltqualitäten oft der Fall ist – oder sind die Marktpreise nicht belastbar, da der Markt nicht gut funktioniert (z.B. CO₂-Zertifikate), sind folgende Bewertungsmethoden möglich:

- **Revealed Preferences (b):** Die Revealed-Preferences-Methode (RP) beruht im Grundsatz auch auf Marktpreisen. Aus den direkt beobachtbaren Marktpreisen eines Gutes (z.B. Wohnungspreis) und seinen verschiedenen Eigenschaften (z.B. Lage, Grösse, Lärmbelastung etc.) wird mittels statistischer Verfahren der Preis für die einzelnen Eigenschaften geschätzt (sogenannte Hedonic-Pricing-Methode). So wird z.B. der Wert der Ruhe (bzw. des Lärms) aus dem Vergleich der Wohnungspreise einer ruhigen und einer belärmten Wohnung ermittelt (ceteris paribus). Im Wohnungsmarkt offenbaren also die Konsumenten ihre Präferenzen für Ruhe (revealed preference).

⁶⁵ Diese Box beruht auf einer Weiterentwicklung von SN 641 820 (2018), Ziffer 49 bzw. Ecoplan; Metron (2005), S. 116–120.

- **Stated Preferences (c):** In Umfragen wird mittels Fragebogen die **Zahlungsbereitschaft** (willingness to pay, WTP) der Personen (z.B. für eine Reduktion des Unfallrisikos oder einen Zeitgewinn) erfragt (z.B. choice models, contingent valuation). Es handelt sich dabei um sogenannte stated preference (SP) Ergebnisse: Die Bewertung beruht auf Aussagen der Befragten, die ihre Präferenzen in einer hypothetischen Situation während einer Befragung angeben.

Der Kostenschätzung beruht also entweder auf Marktpreisen (direkt oder indirekt über RP) oder auf hypothetischen Fragestellungen (SP). Sofern verlässliche Daten vorliegen, ist die RP-Methode grundsätzlich gegenüber der SP-Methode zu bevorzugen, da die RP-Methode auf tatsächlichen Entscheidungen beruht.

Abbildung 3-4: Übersicht über verschiedene Bewertungsmethoden

Bewertungsansätze	Schadenskosten (1)	Vermeidungskosten (2)	Reparatur- und Ersatzkosten (3)
Bewertungsmethoden	Marktpreise (a)	Revealed Preferences (b)	States Preferences (c)

Die Zahl bzw. der Buchstabe zeigt auf, mit welcher Priorität der jeweilige Ansatz bzw. die Methode zu verwenden ist.

Basierend auf diesen Erläuterungen wird für die Bewertung der externen Kosten im Rahmen dieses Projektes von folgender Prioritätensetzung ausgegangen (vgl. Abbildung 3-4):

- Wenn ein Schadenskostenansatz machbar ist, ist dieser vorzuziehen. Liegen keine (zuverlässigen) Schadenskostenschätzungen vor, kann als Alternative der Vermeidungskostenansatz (oder gar der Reparatur- oder Ersatzkosten-Ansatz) zum Einsatz kommen. Die gänzliche Vernachlässigung von Effekten, für die kein (zuverlässiges) Resultat für die Schadenskosten vorliegt, ist kein empfehlenswertes Vorgehen, da es einer Bewertung mit Null gleichkommt. In diesem Fall ist es besser, die bestmögliche Schätzung (aus dem Vermeidungs-, Reparatur- oder Ersatzkosten-Ansatz) zu verwenden, als auf eine Bewertung vollständig zu verzichten.
- Liegen belastbare Marktpreise vor, sind diese zu verwenden. Ohne Marktpreise ist – wenn möglich – die RP-Methode zu verwenden, ansonsten kommt die SP-Methode zum Einsatz.

3.2.2 Umgang mit Internalisierungsbeiträgen

Wie bereits im Kapitel 3.1 angemerkt, sind die Internalisierungsbeiträge zur Berechnung der externen Kosten relevant. Für die vorliegende Aktualisierung sind **drei Ebenen** von Internalisierungsbeiträgen zu unterscheiden:

1. Technische Massnahmen zur Senkung der Belastungen, die als Vermeidungs- oder Ersatzmassnahmen gelten (z.B. Lärm- und Naturschutz): Direkte Berücksichtigung, weil die verbleibenden Schäden unter Einbezug der technischen Massnahmen berechnet werden – auch wenn diese nicht von den Verursachern bezahlt werden.

2. Monetäre Beiträge zur Internalisierung einzelner Kosten, um Anreize für die Senkung der Belastung zu setzen und die entstandenen Schäden zu kompensieren oder deren Reparatur zu finanzieren (z.B. Unfallversicherung, emissionsabhängige Lärmgebühren): Anrechnung im entsprechenden Kostenbereich.
3. Monetäre Abgaben pro Verkehrsart, die eindeutig als Beitrag zur Internalisierung externer Kosten zu identifizieren sind, in Abgrenzung zu den Abgaben zur Finanzierung der Infrastruktur (z.B. Teile der LSVA): Globale Anrechnung (d.h. keine Zuweisung zu Kostenbereich).

Damit sind Doppelzählungen von Internalisierungsmassnahmen ausgeschlossen. Die folgende Abbildung zeigt die möglichen Internalisierungsbeiträge und den Umgang damit pro Kostenart.

Abbildung 3-5: Internalisierungsbeiträge und wie mit ihnen umgegangen wird

Kostenart	Internalisierungsbeiträge	Umgang
Luftverschmutzung	Differenzierung MFZ-Steuer nach Emissionen	Keine Berücksichtigung, vollumfänglich in Infrastrukturrechnung angerechnet
	Emissionsabhängige Landegebuhr (Luftverkehr)	Anrechnung innerhalb der Kostenart (Ebene 2, vgl. oben)
Lärm	Lärmschutzwände, Schallschutzfenster	Direkte Berücksichtigung, weil nur Nettoschäden (unter Einbezug der Lärmschutzmassnahmen) erfasst (Ebene 1)
	Lärmabhängige Landegebühren (Luftverkehr)	Anrechnung innerhalb der Kostenart (Ebene 2)
Klima	Mineralölsteuer und -zuschlag	Keine Berücksichtigung, da bereits in Infrastrukturrechnung angerechnet
	Differenzierung verschiedener Gebühren nach Emissionen (v.a. MFZ-Steuer)	Keine Berücksichtigung, da bereits in Infrastrukturrechnung angerechnet
	Kompensationspflicht für Importeure fossiler Treibstoffe / Sanktionen CO ₂ -Emissionsvorschriften PW und leichte Nutzfahrzeuge ⁶⁶	Berücksichtigung als Internalisierungsbeitrag innerhalb der Kostenart (analog früherem Klimarappen, Ebene 2).

⁶⁶ Sowohl die Kompensationspflicht für Importeure fossiler Treibstoffe, als auch die Sanktionen bei Nichteinhaltung der CO₂-Zielvorgaben für Neuwagen sind als Internalisierungsbeiträge im Bereich Klimakosten anzurechnen. Letzteres wurde so entschieden, da die Sanktionen spezifisch den Mehrausstoss an CO₂ bepreisen, und damit einen Internalisierungsbeitrag darstellen.

Kostenart	Internalisierungsbeiträge	Umgang
Natur und Landschaft	Ersatzmassnahmen und ökologischer Ausgleich	Falls möglich direkte Berücksichtigung, indem nur Nettoschäden (unter Einbezug der Naturschutzmassnahmen) erfasst werden. (Ebene 1)
Boden	spezifische Schutzmassnahmen	Direkte Berücksichtigung, weil nur Nettoschäden (unter Einbezug der Bodenmassnahmen) erfasst (Ebene 1)
Unfallkosten	verursachergerechte Versicherungsleistungen	Anrechnung innerhalb der Kostenart Unfallkosten (Ebene 2)
Schwerverkehr allgemein	Schwerverkehrsabgabe	Anrechnung des nicht Infrastrukturbedingten Anteils der LSVA (abzgl. der Stauzeitkosten). ⁶⁷ Darstellung der Brutto-Unfall- und Umweltkosten sowie Überlastungskosten Schwerverkehr und Gegenüberstellung der LSVA-Beiträge (Ebene 3). ⁶⁸

Der Ausweis der Ergebnisse erfolgt somit nach folgendem Grundkonzept:

- Soziale Kosten: Das Ergebnis entspricht den gesamten volkswirtschaftlichen Kosten in den Bereichen Unfall, Umwelt, Gesundheit. Die Kosten werden unter Beachtung der technischen Massnahmen zur Senkung der Belastungen ermittelt.
- Externe Kosten: Zeigt auf, welcher Anteil der sozialen Kosten nicht vom Verursacher bezahlt wird. Spezifische Beiträge zur Internalisierung in einzelnen Kostenbereichen (z.B. bei Unfällen: Motorfahrzeughaftpflichtversicherung; bei Fluglärm: Lärmgebühren, usw.) werden von den sozialen Kosten in Abzug gebracht. Nicht in Abzug gebracht wird in einem ersten Schritt aber die LSVA. Die externen Kosten zeigen den politischen Handlungsbedarf auf, wenn das Ziel der Internalisierung verfolgt wird.
- Für den Schwerverkehr werden in einem zweiten Schritt die externen Kosten im Unfall- und Umweltbereich dem anrechenbaren Internalisierungsbeitrag aus der LSVA gegenübergestellt.

Bei der Interpretation der Internalisierungsbeiträge gilt es zu beachten, dass die Verwendung der Einnahmen für die Wirkung der Massnahme letztlich nicht von Belang ist. Es spielt also keine Rolle,

⁶⁷ Das heisst vom Gesamtertrag der LSVA werden die Infrastrukturkosten (d.h. der Infrastruktur-bedingte Teil) und die Stauzeitkosten des Schwerverkehrs abgezogen. Der verbleibende Ertrag gilt als Internalisierungsbeitrag für die Unfall- und Umweltkosten des Schwerverkehrs.

⁶⁸ Hierbei gehen wir davon aus, dass die Überlastungskosten nicht einbezogen werden und daher die Stauzeitkosten von den LSVA-Einnahmen abgezogen werden dürfen. Würden hingegen die Überlastungskosten (Stauzeitkosten, Komfortverlustkosten) einbezogen, dürften die Stauzeitkosten von LSVA-Einnahmen nicht abgezogen werden (vgl. hierzu Kap. 16).

ob die Gelder aus der Internalisierung für die Entschädigung der Betroffenen verwendet werden oder als Einnahmen in die Staatskasse fließen und z.B. zur Senkung der Steuerlast verwendet werden. Bedeutsam ist allein, dass die Internalisierung der Kosten dazu führt, dass die Verkehrsteilnehmenden Kosten, die sie bei Dritten oder der Allgemeinheit verursachen, bei ihrer Entscheidung miteinbeziehen.

Die berücksichtigten Internalisierungsbeiträge sind mit dem Zweck der Reduktion der externen Effekte eingeführt worden. Solche Beiträge sind von anderen verkehrsbezogenen Finanzierungsmitteln zu unterscheiden, insbesondere von Abgaben und Steuern, die zur Finanzierung der Infrastruktur dienen. Die KfV-Statistik (BFS, 2019a) gibt einen Überblick über alle Kosten des Verkehrs und deren Finanzierung an.

3.3 Umgang mit Unsicherheiten

3.3.1 Einleitung

Die Berechnung der externen Kosten kann nicht ohne Annahmen und Vereinfachungen vorgenommen werden. Damit ergeben sich bezüglich der Ergebnisse in jedem Fall gewisse Unsicherheiten. Im Wesentlichen können sie bei der Ermittlung der Ergebnisse auf drei «Ebenen» entstehen:

- Belastungssituation
- Effekte bzw. Schäden (Belastungs-Wirkungs-Beziehungen und Mengengerüst)
- Kostensätze für die Bewertung der Schäden (Wertgerüst)

Je nach Wissenstand stehen verschiedene Möglichkeiten zum Umgang mit Unsicherheiten zur Verfügung, welche in Abbildung im Überblick dargestellt sind und im Folgenden erläutert werden.

Abbildung 3-6: Wissenstand und Umgang mit Unsicherheiten

Wissenstand	Umsetzungsmöglichkeiten in Berechnungen
Gesichertes Wissen	Datenauswertung
Wissen mit Unsicherheiten	Punktschätzung im Sinne eines best-guess-Ansatzes Punktschätzung im Sinne eines at-least-Ansatzes Sensitivitätsanalysen Bandbreiten
Ungenügende oder keine Kenntnisse	Vernachlässigung der Ermittlung, nur qualitative Würdigung

Gesichertes Wissen

Der Begriff «Wissen» ist umfassend zu verstehen, es kann sich um Datengrundlagen (z.B. Unfallzahlen), um Funktionszusammenhänge oder auch um Kostenangaben (z.B. medizinische Behandlungskosten pro Spitalpflegetag) handeln.

Bei gesichertem Wissen handelt es sich in der Regel um Grundlagen, welche in offiziellen Statistiken publiziert werden. Die Zahlen bzw. Parameter aus dieser Wissenskategorie können für Berechnungen der externen Kosten als Datenauswertung übernommen werden, ohne dass zusätzliche Annahmen oder Massnahmen notwendig sind.⁶⁹

Wissen mit Unsicherheiten

Zu dieser Wissenskategorie lassen sich alle Daten, Funktionszusammenhänge, Belastungs-Wirkungs-Beziehungen, Hochrechnungen oder Kostensätze zählen, über die eine Vielzahl von Erkenntnissen aus wissenschaftlichen Arbeiten (z.B. empirische Erhebungen, Modellierungen usw.) vorliegen. Die Erkenntnisse sind aber mit Unsicherheiten (z.B. nur Angaben in Bandbreiten oder Konfidenzintervallen) verbunden oder führen nicht zu einem eindeutigen oder einzig geltenden Resultat (Zahlenwert).⁷⁰

In diesem Fall können für den Umgang mit den Unsicherheiten unterschiedliche Strategien angewendet werden. Für die Herleitung eines Punktschätzers gibt es zwei Möglichkeiten:

- **Best-guess-Ansatz (bestmögliche Schätzung):** Bei diesem Ansatz wird für die weiteren Berechnungsschritte ein Punktwert verwendet, welcher auf einem «best guess»-Vorgehen beruht. Für die Ermittlung des «best guess» können unterschiedliche Methoden verwendet werden, so z.B. eine qualitative Einschätzung der vorliegenden Arbeiten, eine mit statistischen Verfahren durchgeführte Meta-Analyse oder eine Abstützung auf bestimmte Autoren oder Studien, die als wissenschaftlich besonders gut angesehen werden und / oder sich genau auf den untersuchten Kontext beziehen.
- **At-least-Ansatz (mindestens zu erwarten):** Alternativ kann ein Wert gewählt werden, der im unteren Bandbereich der bekannten Ergebnisse liegt. Mit diesem Vorgehen soll sichergestellt werden, dass die tatsächlichen Kosten nicht überschätzt werden, sondern die ausgewiesenen Ergebnisse vielmehr als «mindestens zu erwartende» Kosten interpretiert werden können (at least Ansatz).

Zudem können die Unsicherheiten wie folgt verdeutlicht werden:

- **Sensitivitätsanalysen:** Der best-guess und der at-least-Ansatz können ergänzt werden, indem für wichtige Annahmen eine **Sensitivitätsanalyse** durchgeführt wird, d.h. dass wichtige Annahmen angepasst werden, um zu untersuchen, wie sich dadurch das Ergebnis verändert.
- **Bandbreiten (oder Konfidenzintervalle):** Bei diesem Ansatz werden die bestehenden Unsicherheiten in den Berechnungen ausgewiesen. Konkret bedeutet dies, dass die Berechnungen nicht (nur) für einen einzelnen Wert, sondern (auch) für eine Unter- und Obergrenze durchgeführt werden. Die Wahl der Unter- und Obergrenze erfolgt entweder abgestützt auf statistischen

⁶⁹ Auch bei Datenauswertungen gibt es natürlich (statistische) Unsicherheiten. Diese sind im Vergleich zu den übrigen Unsicherheiten jedoch meist sehr gering und damit vernachlässigbar. Zudem besteht bei der Datenauswertung keine Wahl, welcher Wert zu verwenden ist, beim best guess hingegen stehen unterschiedliche Werte zur Verfügung.

⁷⁰ Ferner können im Vergleich zur gesuchten Wahrheit unbekannte systematische Fehler vorliegen, welche in der Beurteilung zu einer Verschiebung der Ergebnisse im Vergleich zu den tatsächlichen Wirkungszusammenhängen führen können. Diese können nicht berücksichtigt werden, da sie unbekannt sind.

Angaben (z.B. auf dem 95%-Konfidenzintervall) oder, wenn diese nicht vorhanden sind bzw. deren Herleitung schwierig ist, ad hoc aufgrund der vorliegenden Studienergebnisse.

Ungenügende oder keine Kenntnisse

Bei der Ermittlung der externen Kosten gibt es Teilbereiche bzw. Fragestellungen, über die nur geringe oder noch gar keine Erkenntnisse aus entsprechenden Untersuchungen vorliegen (z.B. Unfall-Dunkelziffer im Schienenverkehr, Auswirkungen des Nachtfluglärms).

In diesen Fällen muss auf eine Quantifizierung der Effekte verzichtet werden, es kann nur eine qualitative Würdigung vorgenommen werden. Besteht eine berechtigte Vermutung, dass die Effekte bzw. Schäden nicht null sind, entspricht dieses Vorgehen einem at-least-Ansatz.

3.3.2 Vorgehenskonzept zum Ausweis der Unsicherheiten pro Kostenbereich

Basisrechnung

Ziel ist es, robuste Grundlagen für die Verkehrspolitik und für Kosten-Nutzen-Analysen zur Verfügung zu stellen. Deshalb wird eine Basisrechnung erstellt, die einen plausiblen Wert für die externen Kosten ermittelt: Falls ein plausibler **«best guess»** vorliegt, wird dieser Wert verwendet. Ansonsten beruht der Wert auf einer **vorsichtigen Schätzung (at least Ansatz)**, d.h. überall wo Annahmen und Vereinfachungen vorgenommen werden, werden diese **«so realistisch wie möglich, im Zweifelsfall jedoch konservativ»** getroffen. Konkret bedeutet dies, dass bei Unsicherheiten vorsichtige Annahmen getroffen werden, die eher zu einer Unter- als einer Überschätzung der tatsächlichen Kosten führen.

Berechnung der Sensitivitätsanalysen

Für die in den Basisberechnungen enthaltenen wesentlichen Unsicherheiten wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

Für jeden Kostenbereich werden alle wesentlichen **Inputdaten** für die Basisrechnung aufgeführt und es wird deren **Wissenstand** (gesichertes Wissen oder Wissen mit Unsicherheiten) untersucht und tabellarisch dargestellt (vgl. z.B. für die Gesundheitskosten der Luftbelastung die Abbildung 4-24 auf Seite 129). Anhand dieser Übersicht werden die wesentlichen Unsicherheiten im jeweiligen Kostenbereich ermittelt.

- Basierend darauf wird für jeden Kostenbereich und für jede relevante Unsicherheit eine **Sensitivitätsanalyse** durchgeführt. Dabei wird untersucht, wie sich das Ergebnis verändert, wenn die Annahme höher oder tiefer wäre als in der Basisrechnung. Für Annahmen ohne relevante Auswirkungen auf das Endergebnis wird auf die Sensitivitätsanalyse verzichtet. Konkret umgesetzt bedeutet dies:
 - Verzicht auf Sensitivitätsanalysen in Kostenbereichen, die in den bisherigen Berechnungen weniger als ca. 10% Anteil an Gesamtkosten (über alle Verkehrsträger) erreichten.

- In Kostenbereichen mit mehr als ca. 10% Anteil: Verzicht auf Sensitivitäten, die in den bisherigen Berechnungen weniger als ca. 10% Veränderung der Gesamtkosten im Bereich (über alle Verkehrsträger) bewirkten.

Damit werden die für das Endergebnis wesentlichen Unsicherheiten identifiziert.⁷¹

Ausweis möglicher Über- und Unterschätzungen

Ergänzend zur quantitativen Abschätzung der Sensitivitätsanalysen wird pro Kostenbereich auch auf zusätzliche, mögliche Unter- und Überschätzungen eingegangen. Es handelt sich dabei um Aspekte, welche ausserhalb der Berechnungssystematik liegen und daher nicht in die quantitative Analyse einfließen können.

3.4 Durchschnittskosten, Grenzkosten und Wohlfahrtsverluste

3.4.1 Übersicht über den Kostenausweis

Wie die folgende Abbildung zeigt, werden die Berechnungen sowohl für die sozialen (also volkswirtschaftlichen) Kosten als auch für die externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende durchgeführt (zu den Begriffen vgl. Abschnitt 3.1). Im Strassenverkehr wird zudem die Sicht Verkehrsart Schwerverkehr ermittelt (im Hinblick auf die Bestimmung der LSVA). Auf die bisher ausgewiesene Sicht Verkehrsträger wird verzichtet. Es werden jeweils die Gesamtkosten sowie die Durchschnittskosten ausgewiesen. Zum Verlauf der Grenzkosten werden qualitative Einschätzungen vorgenommen, auf quantitative Berechnungen wird jedoch verzichtet. Zudem werden die Ergebnisse nach Antriebsart, Raumtyp bzw. Kantonen differenziert (vgl. Kapitel 2.3.3, 2.4.2 und 2.4.3).

⁷¹ Bandbreiten wurden nur für das Jahr 2005 für den Strassen- und Schienenverkehr berechnet (siehe Ecoplan; INFRAS (2008)). Damals wurde eine Monte-Carlo-Simulation für die Ergebnisse durchgeführt. Mit einer Monte-Carlo-Analyse würden alle Annahmen gleichzeitig verändert und mit Hilfe statistischer Methoden würde das 95%-Konfidenzintervall des Gesamtergebnisses bestimmt. Das Ergebnis aus der Basisberechnung würde sich aber auch mit einer Monte-Carlo-Analyse nicht verändern.

Abbildung 3-7: Überblick über Kostenausweis

Kostenausweis
Externe Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende (Strasse: zusätzlich Sicht Schwerverkehr) - Gesamtkosten - Durchschnittskosten pro Fahr- und Verkehrsleistung - Grenzkosten (qualitativ)
Soziale Kosten - Gesamtkosten (private + externe) - Durchschnittskosten pro Fahr- und Verkehrsleistung
differenziert nach - Antriebsart - Raumtyp (dicht, mitteldicht und gering besiedelt) ¹ - Kantonen

¹ Die Differenzierung nach Raumtyp erfolgt nicht in allen Kostenbereichen (vgl. Abbildung 2-8).

3.4.2 Durchschnitts- und Grenzkosten

In der Schweiz standen bisher die gesamten Kosten und die Durchschnittskosten⁷² im Zentrum des Interesses. Sowohl bei der Ermittlung der externen Effekte in den Vorgängerstudien der vorliegenden Arbeiten⁷³ als auch in der Statistik der Kosten und Finanzierung des Verkehrs (KFV) des BFS wurden Durchschnittskosten ausgewiesen, aber keine Grenzkosten. Auch in der deutschen Methodenkonvention werden Durchschnittskosten (nach Antriebsart) ausgewiesen.⁷⁴

Demgegenüber waren und sind die Grundlagen auf EU-Ebene (und auch in anderen Ländern, z.B. UK, NL) auf **Grenzkosten** ausgerichtet. Unter Grenzkosten werden jene Zusatzkosten verstanden, die durch eine zusätzliche Fahr- bzw. Verkehrsleistung entstehen.⁷⁵ Der Grenzkostenansatz basiert auf der ökonomischen Wohlfahrtstheorie für optimale Preise. Entsprechend empfehlen diese

⁷² Die Durchschnittskosten pro Fahrleistung (Fzkm) oder pro Verkehrsleistung (pkm, tkm) ergeben sich aus der Summe der Totalkosten dividiert durch die gesamte Fahr- oder Verkehrsleistung in der Schweiz.

⁷³ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

⁷⁴ UBA (2019)

⁷⁵ In vielen Kostenbereichen – immer dort wo ein linearer Zusammenhang zwischen Verkehrsmenge und entsprechenden Effekten auf Mensch oder Umwelt bestehen – entsprechen die Grenzkosten eines zusätzlichen Fzkm weitgehend den Durchschnittskosten. In einzelnen Kostenbereichen besteht demgegenüber kein linearer Zusammenhang (z.B. beim

Grundlagen (z.B. im EU-Handbuch für externe Kosten im Verkehr⁷⁶) Kostensätze für Grenzkosten in ausgewählten Verkehrssituationen (z.B. Grenzkosten für PW bei hohem Verkehrsaufkommen tagsüber in städtischen Gebieten oder bei tiefem Verkehrsaufkommen nachts in ländlichen Gebieten). Die Berechnung erfolgt oft bottom-up, in der Regel basierend auf spezifischen Modellen. Unterschiedliche Resultate zwischen Bottom-up-Berechnung mit Ausrichtung auf Grenzkosten und Top-down-Berechnungen mit Ausrichtung auf Durchschnittskosten ergeben sich erfahrungsgemäss bei der Berechnung der Unfall- und Lärmkosten, im Bereich Natur und Landschaft sowie bei den Überlastungskosten.

In der Schweizer Verkehrsplanung und -politik soll künftig das Verursacherprinzip und die Internalisierung externer Effekte und damit die effiziente Nutzung der Infrastrukturen eine noch wichtigere Rolle spielen. Es sollen somit neue Grundlagen geschaffen werden, die z.B. im Rahmen eines Mobility Pricing eingeführt werden könnten. Dafür sind erstens die Berechnungen zu den Effekten des Verkehrs weiter zu differenzieren (nach Antriebsart, nach Raumtyp). Zweitens steht neu wie erläutert (vgl. Kapitel 3.1.2) die Sicht Verkehrsteilnehmende (statt Verkehrsträger) im Zentrum der Berechnungen. Drittens wird jedes Kapitel durch Überlegungen zu den Grenzkosten ergänzt.

Im vorliegenden Bericht werden weiterhin Durchschnittskosten berechnet, weil sie eine wichtige Datengrundlage und auch einen wichtigen Input für die KfV-Statistik darstellen, weil sie zu Vergleichszwecken (z.B. zu früheren Berechnungen) gut geeignet sind und weil sie einfach ermittelt werden können. Ergänzend sind aber auch Grenzkosten relevant, wenn die volkswirtschaftlich effiziente Nutzung der Ressourcen im Vordergrund steht. Die Grenzkosten werden für jeden Kostenbereich qualitativ erläutert, auf eine Quantifizierung wird jedoch verzichtet.

3.4.3 Kurzfristige versus langfristige Kosten

Für die Ermittlung der Kosten (Gesamt-, Durchschnitts- oder Grenzkosten) gilt es zudem zwischen den kurz- und langfristigen Effekten zu unterscheiden. Diese Unterscheidung ist zum Beispiel relevant, wenn es bei der Nutzung eines Gutes zu Rivalität im Konsum kommt (Konsum eines Nutzens mindert den Konsum eines anderen Nutzenden) ohne dass ein Ausschluss von der Nutzung möglich ist. Man spricht in diesem Fall von unreinen öffentlichen Gütern, ein typisches Beispiel hierfür ist die öffentliche Strasseninfrastruktur (einerseits herrscht ab einer gewissen Auslastung Rivalität im Konsum und andererseits kann niemand von der Benutzung ausgeschlossen werden). Je nach zugrundgelegtem Zeithorizont können bei unreinen öffentlichen Gütern die kurz- und langfristigen Kosten voneinander abweichen:

- Unter kurzfristigen Kosten werden jene Kosten einer Fahrt verstanden, ohne dass eine allfällige Kapazitätserweiterung berücksichtigt wird.
- Bei den langfristigen Kosten werden demgegenüber auch die Kosten zur Erweiterung der Kapazität berücksichtigt, d.h. die Verkehrsinfrastrukturkapazität in diesem Fall als variabel betrachtet.

Lärm oder bei den Unfällen), so dass die Höhe der Kosten einer zusätzlichen Fahrt von den spezifischen Verhältnissen (Zeit, Raum, Verkehrsmenge) abhängt und damit die Grenzkosten stark von den Durchschnittskosten abweichen können.

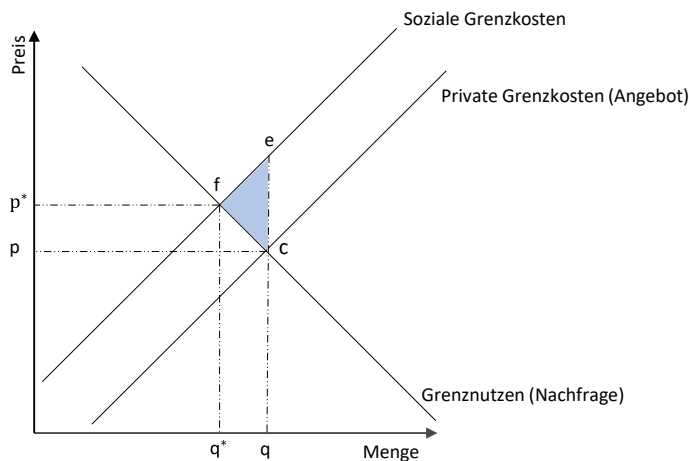
⁷⁶ European Commission (2020)

Im vorliegenden Bericht werden ausschliesslich die kurzfristigen Kosten behandelt. Wird im Folgenden von «Gesamt-, Durchschnitts- oder Grenzkosten» gesprochen, so sind damit immer die kurzfristigen Kosten gemeint. Sie sind relevant für eine optimale Preisbildung.

3.4.4 Wohlfahrtsverluste

Ein Wohlfahrtsverlust (Dead Weight Loss, DWL) ergibt sich aufgrund von Marktversagen bzw. einer Marktineffizienz (Dreieck e,f,c in Abbildung 3-8). Ohne Internalisierung werden die negativen externen Effekte in den Preisen nicht berücksichtigt, weswegen eine höhere Menge q nachgefragt wird, als unter Berücksichtigung der sozialen Grenzkosten effizient wäre (q^*). Es kann ein soziales Optimum ermittelt werden. Die Internalisierung von externen Grenzkosten ist somit eine wichtige Effizienzfrage.

Abbildung 3-8: Wohlfahrtsverlust aufgrund negativer externer Effekte



Der DWL stellt dar, was die Gesellschaft an Wohlfahrt zurückerhalten würde, wenn eine Abgabe oder Steuer in Höhe der externen Grenzkosten, d.h. der Differenz zwischen sozialen und privaten Grenzkosten, eingeführt würde. In der Praxis würden aber die Transaktionskosten, die mit der Einführung einer Abgabe/eines Emissionssystems verbunden sind (z.B. Berechnung, Verwaltung, Kontrolle), einen Teil dieses Wohlfahrtsgewinns wiederum absorbieren.

Eine Berechnung des Wohlfahrtsverlustes könnte z.B. folgende Aussagen ermöglichen: Wenn x% der Fahrten auf einer bestimmten Strecke vermieden werden, verbessert sich die Nutzen-Kosten-Bilanz der Mobilität für die ganze Gesellschaft um z CHF. Um eine solche Ergebnis zu erzielen, müsste man noch die Steigung der Nachfrage kennen (oder eine Annahme dazu treffen).

Auf die Ermittlung von sozialen Grenzkosten (bzw. -nutzen) wird verzichtet (vgl. oben). Zudem müssten auch entsprechende Transaktionskosten für die Einführung einer Abgabe bzw. Steuer berücksichtigt werden. Vor diesem Hintergrund wird auf den Ausweis des Wohlfahrtsverlusts verzichtet.

4 Gesundheitskosten der Luftverschmutzung

4.1 Berechnungsgegenstand

Verkehr führt zu Emissionen von Luftschadstoffen. Die Schadstoffbelastung bewirkt bei der betroffenen Bevölkerung gemäss einer Vielzahl epidemiologischer Untersuchungen eine Beeinträchtigung des Gesundheitszustandes.

Bei der Bewertung der Gesundheitskosten werden zuerst die Emissionen des Verkehrs (bzw. der anderen Emittenten) mittels eines Schadstoffausbreitungsmodells in Immissionen am Wohnort umgerechnet, wobei Transformation und Verfrachtung berücksichtigt werden. Die Bevölkerungsexposition ergibt sich aus der Überlagerung der lokalisierten Schadstoffkonzentrationen (Immissionskataster) mit der Bevölkerungsdichte vor Ort (Bevölkerungskataster).

Diese Schadstoffbelastung kann sich in zusätzlichen Krankheitsfällen äussern und / oder die Lebenserwartung der betroffenen Personen schmälern. Mit dem Zusammenhang zwischen Schadstoffbelastung und der Auftretenshäufigkeit von Morbidität und Mortalität (sogenannte Belastungs-Wirkungs-Beziehung oder dose-response-function) lässt sich die Zahl der luftverschmutzungsbedingten Krankheits- und Todesfälle bestimmen.

Dieses Mengengerüst dient als Basis zur Ermittlung der Gesundheitskosten. Dabei werden die folgenden Kostenbestandteile berücksichtigt: Medizinische Behandlungskosten, Produktionsausfälle, Wiederbesetzungskosten und immaterielle Kosten. Alle Kosten, die durch die Luftverschmutzung des Jahres 2021 entstehen, fliessen in die Berechnungen ein. Es werden also auch jene Kosten berücksichtigt, die als Folge der Luftbelastung im Jahr 2021 in späteren Jahren anfallen (z.B. Produktionsausfall bei Todesfällen, medizinische Nachbehandlungen usw.).⁷⁷

4.2 Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen

4.2.1 Verkehrsbedingte Schadstoffbelastung der Bevölkerung

Die Berechnung der verkehrsbedingten Schadstoffbelastung der Bevölkerung basiert auf dem Immissionsmodell PolluMap des BAFU. Mit den aktuellsten verfügbaren PolluMap-Modelldaten des Jahres 2020 wird die bevölkerungsgewichtete PM₁₀-Immission für das Jahr 2021 berechnet. Alle Auswertungen erfolgen wie in den früheren Berichten differenziert nach drei Altersklassen, d.h. für die gesamte Bevölkerung, für die 0–14-Jährigen und die über 30-Jährigen.

Aus dem PolluMap-Modell ist die Schadstoffbelastung der Bevölkerung durch verschiedene Emissionsquellen (Strassenverkehr, Flugverkehr etc.) sowie der Anteil der Hintergrundimmissionen und der sekundären Feinstaubpartikel an der Gesamtbelastung bekannt. Um auch die Hinter-

⁷⁷ Es werden nicht nur die Gesundheitskosten des Verkehrs bestimmt, sondern auch die Kosten durch die gesamte Luftbelastung (inkl. Industrie, Haushalte, Landwirtschaft etc.).

grundimmissionen und den sekundären Feinstaub auf entsprechende Emissionsquellen aufzuschlüsseln, werden diese Immissionen emissionsproportional auf die verschiedenen Emissionsquellen verteilt. Diese Aufschlüsselung auf die verschiedenen Emissionsquellen erfolgt für die Hintergrundimmissionen anhand des Anteils an den gesamtschweizerischen PM₁₀-Emissionen und für die sekundären Feinstaubpartikel anhand der Emissionsanteile der jeweiligen Vorläufersubstanzen.

Die bevölkerungsgewichteten PM₁₀-Immissionen werden mit den aktuellen verfügbaren PolluMap-Modelldaten für das Jahr 2020 berechnet. Dabei ist zu beachten, dass das PolluMap-Modell für das Jahr 2020 auf einer Prognose aus dem Luftschadstoffinventar der Schweiz von 2019 basiert.⁷⁸ In den Modellgrundlagen sind somit die Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die Luftschadstoffimmission nicht berücksichtigt. Zur Berechnung der externen Kosten ist deshalb eine Umrechnung auf die Emissionen im Jahr 2021 notwendig. Dazu wird die für das Jahr 2020 modellierte PM₁₀-Immission auf das Jahr 2021 skaliert. Die Skalierung erfolgt anhand der PM₁₀-Emissionen im Jahr 2021 aus dem Luftschadstoffinventar der Schweiz⁷⁹.

Aus den oben beschriebenen Berechnungen ist die Schadstoffbelastung der Bevölkerung durch die vier Verkehrsträger bekannt, nicht jedoch nach Fahrzeugkategorien. Für die Berechnung der externen Kosten nach Fahrzeugkategorien wird deshalb die Berechnung der Schadstoffbelastung der Bevölkerung entsprechend den Emissionen weiter verfeinert.

Gegenüber den bisherigen Berechnungen wurden am PolluMap-Modell einige Neuerungen vorgenommen. Wichtige Neuerungen sind unter anderem eine höhere räumliche Auflösung der Feinstaubimmissionen (neu 100m x 100m statt 200m x 200m), eine höhere räumliche Auflösung der berücksichtigten Emissionsdaten (z.B. beim Strassenverkehr 20m), eine verbesserte Berücksichtigung der Topografie in der Ausbreitungsdynamik und der Importe von Schadstoffen aus dem Ausland sowie aktualisierte Emissionsdaten⁸⁰.

4.2.2 Epidemiologie

a) Leitschadstoff

In der vorliegenden Studie wird wie bisher⁸¹ PM₁₀ als Leitschadstoff verwendet. PM₁₀ und PM_{2.5} zeigen eine breitere Evidenz für langfristige Gesundheitseffekte im Vergleich zu alternativen Schadstoffen wie z.B. NO₂. PM₁₀ ist weniger restriktiv (aerodynamischer Durchmesser unter 10 µg/m³ anstatt 2.5) und bildet im Vergleich zu PM_{2.5} die verkehrsbedingte Luftverschmutzung besser ab.

⁷⁸ Bundesamt für Umwelt, BAFU (2019)

⁷⁹ Bundesamt für Umwelt, BAFU (2023a)

⁸⁰ INFRAS; Meteotest (2020b)

⁸¹ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

b) Auswahl der berücksichtigten Krankheitsbilder

Auf Basis einer eingehenden Literaturanalyse werden die folgenden Gesundheitsauswirkungen quantifiziert:

- Langfristige Gesamtmortalität (bei Erwachsenen ab 20 Jahre)
- Säuglingssterblichkeit (0-1 Jahr)
- Inzidenz von COPD (Chronic Obstructive Pulmonary Disease – bei Erwachsenen ab 20 Jahren⁸²)
- Inzidenz von und Spitaleintritte wegen Lungenkrebs (alle Altersklassen)
- Inzidenz von und Spitaleintritte wegen Diabetes (bei Erwachsenen ab 20 Jahren)
- Inzidenz von und Spitaleintritte wegen Demenz (bei Erwachsenen ab 40 Jahren)
- Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen (alle Altersklassen)
- Spitaleintritte wegen Herz-/Kreislaufkrankungen (alle Altersklassen)
- Tage mit eingeschränkter Aktivität (≥ 15 -Jährige – dabei wird der Produktionsausfall durch Tage mit eingeschränkter Aktivität genauer abgeschätzt als bisher, indem eine eigene Belastungs-Wirkungs-Beziehung für die Ausfalltage (Abwesenheit vom Arbeitsplatz) geschätzt wird).

Im Vergleich zu bisher⁸³ wird damit Bronchitis (bei Erwachsenen und Kindern) durch COPD ersetzt, wobei Bronchitis ein Teil von COPD ist, aber COPD breiter ist. Zudem werden drei Krankheitsbilder neu miteinbezogen, nämlich Lungenkrebs, Diabetes und Demenz. Hingegen wird auf Asthma (bei Erwachsenen und Kindern) neu verzichtet. Für eine Begründung dieser Anpassungen siehe Kapitel 4.3.2.

c) Belastungs-Wirkungs-Beziehungen und Gesundheitsdaten

Die Exposition-Wirkungs-Beziehungen zu diesen Gesundheitseffekten wurden mit der aktuellen epidemiologischen Datenlage aktualisiert bzw. neu erhoben (siehe Kapitel 4.3.2). Neue Gesundheitsdaten (u.a. Inzidenzdaten) wurden von verschiedenen Quellen (Statistiken und Schätzungen) gesammelt.

4.2.3 Wertgerüst

Beim Wertgerüst wird die bisherige Methodik im Wesentlichen weiterverwendet, es werden jedoch teilweise bessere Datengrundlagen benutzt. So können die Spitalkosten aufgrund neuer Datengrundlagen genauer ermittelt werden. Zudem werden Kostensätze für die neu miteinbezogenen vier Krankheitsbilder (COPD, Lungenkrebs, Diabetes, Demenz) gesucht und verwendet. Ansonsten werden die Kostensätze mit den aktuellen Datengrundlagen für 2021 aufdatiert.

⁸² Für die Berechnung der Inzidenzen wird die Grenze bei 20 Jahren gezogen. Bei den Spitalaufenthalten liegen die möglichen Altersgrenzen (Datenverfügbarkeit) bei 15 und 40 Jahren, entsprechen wird hier von 15 Jahren ausgegangen.

⁸³ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

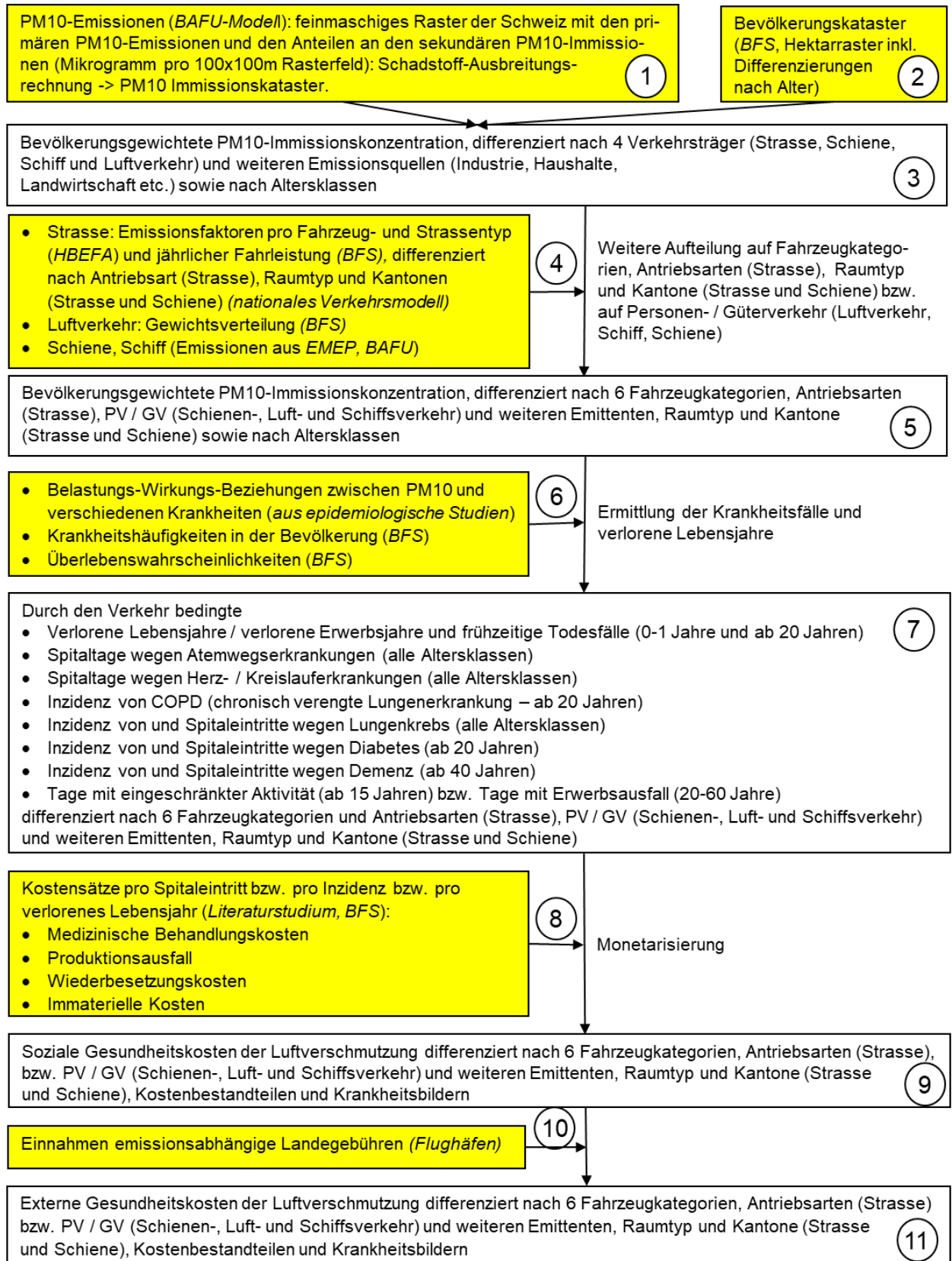
4.2.4 Verwendete Berechnungsmethodik

In der folgenden Abbildung wird die verwendete Bewertungsmethode dargestellt: Mit Hilfe eines Schadstoff-Ausbreitungsmodells werden aus den Emissionen die Immissionen berechnet (Schritt 1) und mit der Bevölkerung überlagert (2), um die durchschnittliche Schadstoffbelastung der Bevölkerung zu ermitteln (3). Um eine vollständige Aufteilung der Schadstoffbelastung nach Fahrzeugkategorien im Strassenverkehr, sowie nach Personen- und Güterverkehr im Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr zu erhalten und um die Ergebnisse nach Antriebsart (Strasse) sowie Raumtyp und Kantone (Strasse und Schiene) aufzuteilen, werden weitere Inputdaten verwendet (4 und 5).

Aus der Epidemiologie werden Belastung-Wirkungs-Beziehungen übernommen, die zeigen, wie stark gewisse Krankheiten mit der Schadstoffbelastung zunehmen (6). Daraus werden die luftverschmutzungsbedingten Krankheitsfälle und verlorenen Lebensjahre ermittelt (7). Schliesslich werden Kostensätze für die verschiedenen Krankheitsbilder hergeleitet (8) und damit die sozialen Gesundheitskosten der Luftbelastung ermittelt. Zum Schluss muss noch die Internalisierungsabgabe im Luftverkehr (emissionsabhängige Landegebühren) abgezogen werden,⁸⁴ um die externen Kosten zu ermitteln (10 und 11) Die ausführliche Beschreibung der Methodik folgt in den Kapiteln 4.3 und 4.4.

⁸⁴ Die LSVA wird – wie in Kapitel 3.2.2 erläutert – erst am Schluss abgezogen (in Kapitel 19).

Abbildung 4-1: Bewertungsmethodik für Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung



Legende: Inputdaten Zwischen- / Endergebnisse Erläuterung der Berechnung (*Datenquellen kursiv*)

4.3 Mengengerüst

4.3.1 Verkehrsbedingte Schadstoffbelastung der Bevölkerung

a) Schadstoff-Ausbreitungsmodell

Ein wichtiger Input in die Berechnung der externen Kosten ist die Modellierung der Luftbelastung (Schritt 1 in Abbildung 4-1), d.h. das Erfassen der Emissionen, die Ausbreitung der Schadstoffe und schliesslich die Berechnung der Immission am Wohnort der Bevölkerung. Daten zu den Luftschadstoffimmissionen in der Schweiz stehen aus dem Immissionsmodell PolluMap⁸⁵ des BAFU zur Verfügung. Die Luftschadstoffkonzentrationen (Immissionen) von PM₁₀ werden seit 1998 in der Schweiz kontinuierlich gemessen und wurden 1999 erstmals durch das BAFU modelliert. Seither ist das Immissionsmodell schrittweise erweitert worden (2013 und 2020). Das Immissionsmodell berechnet die Ausbreitung der territorialen Emissionen und berücksichtigt zusätzlich die Importe von Luftschadstoffen sowie weitere Beiträge an der Luftschadstoffbelastung. Die letzte Version des PolluMap-Modells wurde im Dezember 2020⁸⁶ veröffentlicht und weist folgende Neuerungen und Weiterentwicklungen auf:

- Höhere räumliche Auflösung für PM₁₀-Immissionen (von 200 m x 200 m auf 100 m x 100 m)
- Feinere Differenzierung der räumlichen Auflösung der Emissionen (Kataster), die als Eingabegrößen für die Modellierung der Immissionen dienen (z.B. Verkehrsemissionen sind im Emissionskataster neu mit einer Auflösung von 20 m x 20m enthalten)
- Verbesserte Berücksichtigung der Topografie der Schweiz, sowohl in der Ausbreitungsdynamik als auch bezüglich Importen von Schadstoffen aus dem Ausland
- Nutzung von europäischen EMEP-Modelldaten für sekundäre Feinstaubpartikel

Neben diesen methodischen Neuerungen wurden auch aktualisierte Emissionsdaten für die Jahre 2015, 2020 (und 2030) aus der Emissionsdatenbank (EMIS) des BAFU in das Modell integriert (Strassenverkehr Stand 2020, Luftverkehr eigene Prognose der Flughafenbetriebe, weitere Emissionsquellen Stand Mitte 2019⁸⁷). Eine ausführliche Beschreibung des Modells, der Datengrundlagen und der letzten Aktualisierung ist im Technischen Bericht⁸⁸ zu finden.

b) PM₁₀-Immissionskarten

Im PolluMap-Modell liegt die räumliche Verteilung der PM₁₀-Immission verschiedener Emissionsquellen (=Sektoren) für das Jahr 2020 vor (siehe Summe der PM₁₀-Immissionen in Abbildung 4-2). Dabei sind die PolluMap-Immissionskarten nach den folgenden Sektoren differenziert:

⁸⁵ Vgl. Bundesamt für Umwelt: Luftbelastung: Modelle und Szenarien: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten/luftbelastung--modelle-und-szenarien.html>

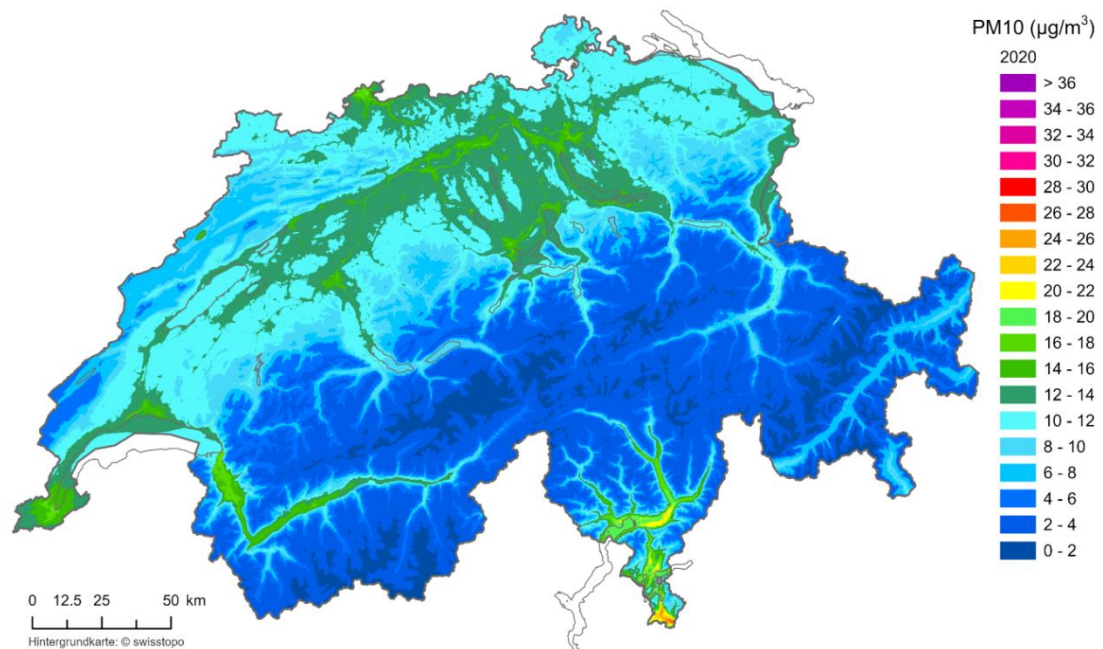
⁸⁶ INFRAS; Meteotest (2020b)

⁸⁷ Bundesamt für Umwelt, BAFU (2019)

⁸⁸ INFRAS; Meteotest (2020b)

- Strassenverkehr
- Schienenverkehr
- Schiffsverkehr
- Luftverkehr
- Haushalte
- Industrie
- Land-/Forstwirtschaft
- natürliche Immissionen (biogene und geogene Beiträge)

Abbildung 4-2: PM₁₀-Immissionen in der Schweiz und Liechtenstein 2020



Quelle: INFRAS; Meteotest (2020a)

Neben den Feinstaubemissionen, die direkt in der Schweiz und im Fürstentum Liechtenstein emittiert werden, berücksichtigt das Modell auch Hintergrundimmissionen und sekundäre Feinstaubpartikel, welche nicht direkt einem Sektor zugeordnet werden können.

- Die Hintergrundimmissionen umfassen alle Beiträge von Emissionen, die ausserhalb der Schweiz und des Fürstentums Liechtenstein entstehen und durch weiträumige Verfrachtungen in die Schweiz gelangen, sowie Beiträge von Emissionen, die im Schweizer Emissionskataster fehlen oder explizit nicht berücksichtigt werden. Des Weiteren werden unter den Hintergrundimmissionen auch Beiträge erfasst, die durch das Modell unterschätzt werden (z.B. Akkumulierungen in länger anhaltenden Inversionslagen).

- Sekundäre Feinstaubpartikel (Nitrat, Sulfat, Ammonium, organisches Material) entstehen aus gasförmigen Luftschadstoffen in der Atmosphäre. Aus den anorganischen Vorläufergasen NO_x , SO_2 , NH_3 entstehen dabei die festen Stoffe Nitrat, Sulfat und Ammonium. Aus den organischen Vorläufergasen NMVOC⁸⁹ entsteht festes organisches Material.

Die Verteilung der Hintergrundimmissionen und der sekundären Feinstaubpartikel auf die verschiedenen Sektoren wird in Abschnitt d) beschreiben. Die Aufteilung der Immissionen des Strassenverkehrs auf die verschiedenen Fahrzeugkategorien (PW, LW etc.) sowie des Schienenverkehrs auf Güter- und Personenverkehr ist in Abschnitt f) beschrieben.

c) Hektarraster der Bevölkerung

Aus den Immissionskarten für die verschiedenen Sektoren sowie für Hintergrund und sekundäre Partikel werden die bevölkerungsgewichteten PM_{10} -Immissionen berechnet, indem sie mit dem Hektarraster der Einwohner (Wohnorte) überlagert werden. Für jede Hektare kann auf diese Weise der bevölkerungsgewichtete Mittelwert der PM_{10} -Immission berechnet werden. Für die vorliegende Untersuchung wurde der Hektarraster auf der Basis der Einwohnerzahl im Jahr 2020⁹⁰ verwendet. Alle Auswertungen erfolgen wie bisher differenziert nach drei Altersklassen, d.h. für die gesamte Bevölkerung, für die 0–14-Jährigen und die über 30-Jährigen.

d) Aufteilung der Hintergrundimmissionen und der sekundären Feinstaubimmissionen auf die Sektoren

Die Anteile der verschiedenen Sektoren an den bevölkerungsgewichteten PM_{10} -Hintergrundimmissionen und sekundären Partikeln (Nitrat, Sulfat etc.) wurden nicht direkt mit dem PolluMap-Modell berechnet. Die Hintergrundimmissionen werden daher anhand der Anteile der verschiedenen Sektoren an den gesamtschweizerischen PM_{10} -Emissionen auf die jeweiligen Sektoren verteilt.⁹¹ Bei den sekundären Feinstaubimmissionen (Nitrat, Sulfat, Ammonium, organisches Material) erfolgt die Aufteilung nach den gesamtschweizerischen Emissionsanteilen der Vorläufersubstanzen (NO_x , SO_x , NH_3 , VOC).

Die PM_{10} -Immissionen für das Jahr 2020 wurden mit dem PolluMap-Modell basierend auf Emissionsdaten aus dem Jahr 2019⁹² modelliert. Aus diesem Grund werden die Anteile der verschiedenen Sektoren an den PM_{10} -Emissionen bzw. an den Emissionen der Vorläufersubstanzen von sekundärem PM_{10} ebenfalls mit dieser Datenquelle berechnet. Die resultierenden Anteile sind in Abbildung 4-3 ersichtlich.

⁸⁹ Flüchtige Organische Verbindungen ohne Methan

⁹⁰ Aus Bundesamt für Statistik: Bevölkerung und Haushalte ab 2010 (System der neuen Volkszählung). <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/dienstleistungen/geostat/geodaten-bundesstatistik/gebaeude-wohnungen-haushalte-personen/bevoelkerung-haushalte-ab-2010.html>

⁹¹ Im PolluMap-Modell sind bei den sekundären Partikeln die importierten sekundären Partikel bereits enthalten (diese Daten stammen von dem chemischen Transport-Modell „EMEP MSC-W“). Bei den Hintergrundimmissionen ist daher davon auszugehen, dass hauptsächlich primäre Partikel enthalten sind. Daher erfolgte die Aufschlüsselung proportional zu den PM_{10} -Emissionen.

⁹² Bundesamt für Umwelt, BAFU (2019)

Auf eine Differenzierung der Emissionen nach exhaust (Auspuff) und non-exhaust (Abrieb) Emissionen (ca. 9% bzw. 91% der Emissionen des Verkehrs)⁹³ wird verzichtet, da keine unterschiedliche Toxizität unterstellt wird (allfällige Unterschiede können (noch) nicht quantifiziert werden, vgl. Kapitel 4.3.2a).

Abbildung 4-3: Anteile der Sektoren an den PM₁₀-Emissionen bzw. an den Emissionen der Vorläufersubstanzen (NO_x, SO_x, VOC, NH₃) von sekundärem PM₁₀ in der Schweiz

Sektor	PM10 (Hintergrund)	NOx (Nitrat)	SOx (Sulfat)	VOC (org. Material)	NH3 (Ammonium)
Strassenverkehr	21.3%	49.6%	1.8%	8.6%	2.2%
Schienenverkehr	8.5%	0.7%	0.0%	0.1%	0.0%
Schiffsverkehr	0.2%	1.8%	0.0%	0.6%	0.0%
Flugverkehr	0.0%	0.8%	0.8%	0.1%	0.0%
Haushalte	18.4%	8.8%	15.0%	12.1%	1.7%
Industrie	38.1%	27.9%	82.4%	53.3%	2.4%
Land-/Forstwirtschaft	13.5%	10.4%	0.1%	25.2%	93.7%
Summe	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Anteile der Sektoren an den PM₁₀-, NO_x-, SO_x-, NH₃- und VOC-Emissionen im Jahr 2020 (basierend auf Daten 2019) gemäss Daten des BAFU⁹². Anhand der Anteile der Sektoren an den PM₁₀-Emissionen in der Schweiz werden die Hintergrundimmissionen auf die jeweiligen Sektoren verteilt. Für die sekundären Partikel (Nitrat, Sulfat, organisches Material, Ammonium) erfolgt die Aufteilung nach den Emissionsanteilen der Vorläufersubstanzen (NO_x, SO_x, NH₃, VOC) in der Schweiz.

Bei der Luftverschmutzung werden die Schäden quantifiziert, die sich aus der Luftbelastung (Emissionen aus dem In- und Ausland) bei der Schweizer Bevölkerung ergeben (Immissionen in der Schweiz) (siehe Kapitel 2.4.1). Dabei wird unterstellt, dass sich bei den Schadstoffemissionen der Export ins Ausland und der Import aus dem Ausland die Waage halten. Zudem wird beim Import gemäss Abbildung 4-3 unterstellt, dass sich die Emissionen gleich auf die Emittenten verteilen wie die Emissionen in der Schweiz.

e) Skalierung der PM₁₀-Immissionen auf das Jahr 2021

Die bevölkerungsgewichteten PM₁₀-Immissionen wurden auf Basis des PolluMap-Modells für das Jahr 2020 berechnet. Dabei ist zu beachten, dass das PolluMap-Modell auf dem Datenstand von 2019 basiert.⁹⁴ Somit wurden allfällige Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die Luftschadstoffimmissionen in dieser Modellierung nicht berücksichtigt.

In der vorliegenden Studie werden die externen Kosten für das Jahr 2021 berechnet, welches stark von der Corona-Pandemie beeinflusst war. Diese beeinflusste ebenfalls die Emissionen in der Schweiz (z.B. durch ein reduziertes Verkehrsaufkommen). Darum werden die PM₁₀-Immissionen basierend auf den modellierten Daten für das Jahr 2020 auf das Jahr 2021 skaliert.

⁹³ Bundesamt für Umwelt, BAFU (2023a)

⁹⁴ Bundesamt für Umwelt, BAFU (2019)

Die Skalierung erfolgt anhand von erhobenen PM₁₀-Emissionen für das Jahr 2021 in der Schweiz.⁹⁵ Für jeden Sektor wird das Verhältnis der erhobenen PM₁₀-Emissionen im Jahr 2021 und den modellierten PM₁₀-Emissionen im Jahr 2020 (Datengrundlage PolluMap-Modell) berechnet. Mit diesem Verhältnis wird die bevölkerungsgewichtete PM₁₀-Immission pro Sektor auf das Jahr 2021 skaliert.⁹⁶ Die natürlichen Immissionen werden nicht skaliert. Es wird angenommen, dass diese im Jahr 2021 dem modellierten Wert für 2020 entsprechen.

Die resultierende mittlere, bevölkerungsgewichtete PM₁₀-Immission im Jahr 2021 ist in Abbildung 4-4 ersichtlich.

f) Bestimmung der bevölkerungsgewichteten PM₁₀-Immissionen nach Fahrzeugkategorien (Strasse) und nach Güter- / Personenverkehr (Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr)

Die PM₁₀-Immissionen des Strassenverkehrs werden anhand der PM₁₀-Emissionen des Jahres 2021 der einzelnen Fahrzeugkategorien nach Fahrzeugkategorie und Antriebsart für den Strassenverkehr differenziert. Die im Rahmen der EMIS-Berichterstattung erhobenen PM₁₀ Emissionen für das Jahr 2021 enthalten jedoch keine Pedelects, Trams und Trolleybusse. Damit diese in den folgenden Berechnungen dennoch berücksichtigt werden können, werden die PM₁₀-Emissionen anhand einer vergleichbaren Fahrzeugkategorie und der für das Jahr 2021 vorliegenden Fahrleistung geschätzt. Für Pedelects wurde dafür der Emissionsfaktor (g / Fzkm) für E-Bikes und für Trolleys der Faktor für elektrisch angetriebene Busse verwendet. Die PM₁₀-Emissionen der Trams für das Jahr 2021 werden anhand des Emissionsfaktors (g/ Fzkm)⁹⁷ und mittels der Fahrleistung berechnet, da keine vergleichbare Fahrzeugkategorie bei den rapportierten PM₁₀-Emissionen vorliegen. Die PM₁₀-Immissionen des Schienenverkehrs werden anhand der ausgewiesenen Emissionen für Personen- und Güterverkehr aufgeteilt. Die Emissionen der Diesellokomotiven und Schienentraktoren werden dafür anteilmässig mittels der im Personen- und Güterverkehr verwendeten Rangierloks und Schienentraktoren auf die Verkehrsarten aufgeteilt. Die Immissionen im Luft- und Schiffsverkehr werden anhand der für diesen Bericht berechneten Emissionen für das Jahr 2021 skaliert und entsprechen damit dem Halbstreckenprinzip.

g) Ergebnis: Bevölkerungsgewichtete PM₁₀-Immission 2021

Wie die folgende Abbildung zeigt, beträgt die bevölkerungsgewichtete PM₁₀-Immission im Jahr 2021 12.65 µg/m³ (alle Einwohner), für die Gruppe der 0–14-Jährigen ist sie mit 12.66 µg/m³ geringfügig höher und für die Gruppe der Einwohner ab 30 Jahren mit 12.62 µg/m³ leicht tiefer.

Der Anteil des Strassenverkehrs an der Gesamtbelastung beträgt 20.8% (alle Einwohner), der Anteil des Schienenverkehrs beläuft sich auf 4.7%, auf den Schiffsverkehr entfallen 0.4% und auf den

⁹⁵ Bundesamt für Umwelt, BAFU (2023a)

⁹⁶ Die Skalierung wurde anhand von Immissionsmessungen an Nabelmessstationen plausibilisiert. Die gemessenen PM₁₀-Immissionen im Jahr 2021 an Nabelmessstationen, die sich unterhalb einer Höhe von 1000m ü. M befinden, betrugen zwischen 86% und 97% des Mittelwerts der PM-Immissionen in den 2017-2019 (vor der Corona-Pandemie). Daher wird ein Skalierungsfaktor von 92% für die Gesamtbelastung (ohne natürliche Immissionen) als plausibel erachtet.

⁹⁷ Sacchi; Bauer (2023) bzw. Mobitool

Flugverkehr 0.2%. Die übrige Belastung von 73.9 % wird durch die Quellen Haushalte, Industrie, Land- und Forstwirtschaft verursacht oder sind natürlichen Ursprungs.

In der bisherigen Studie⁹⁸ lag die modellierte Luftschadstoffbelastung (alle Einwohner) für das Jahr 2015 um 20% höher als die Werte, der vorliegenden Studie für das Jahr 2021. Diese Änderung ist plausibel. In der Schweiz ist eine Abnahme der PM₁₀-Immissionen zu beobachten.⁹⁹ Im Jahr 2021 hatte zudem die Corona-Pandemie Einfluss auf die Luftschadstoffimmissionen, wodurch insbesondere die verkehrsbedingte Belastung geringer war.

Abbildung 4-4: Mittlere, bevölkerungsgewichtete PM₁₀-Immission pro Sektor im Jahr 2021

Sektor	Spezifikation		Mittlere, bevölkerungsgewichtete PM ₁₀ -Konzentration 2021		
			Alle Einwohner ug/m ³	0-14 Jahre ug/m ³	Jahre und älter ug/m ³
Strassenverkehr	total		2.63	2.62	2.62
Strassenverkehr	PW	elektrisch	0.02	0.02	0.02
Strassenverkehr	PW	fossil	1.68	1.68	1.68
Strassenverkehr	PW	rest	0.02	0.02	0.02
Strassenverkehr	GW	elektrisch	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	GW	fossil	0.03	0.03	0.03
Strassenverkehr	Li	elektrisch	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	Li	fossil	0.19	0.19	0.19
Strassenverkehr	Li	rest	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	SS	elektrisch	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	SS	fossil	0.33	0.33	0.33
Strassenverkehr	SS	rest	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	LW	elektrisch	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	LW	fossil	0.15	0.15	0.15
Strassenverkehr	LW	rest	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	Bus	elektrisch	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	Bus	fossil	0.12	0.12	0.12
Strassenverkehr	Bus	rest	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	Trolley	elektrisch	0.01	0.01	0.01
Strassenverkehr	Tram	elektrisch	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	MR	elektrisch	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	MR	fossil	0.03	0.03	0.03
Strassenverkehr	Mofa	fossil	0.02	0.02	0.02
Strassenverkehr	E-Bike	elektrisch	0.00	0.00	0.00
Strassenverkehr	Pedelec	elektrisch	0.00	0.00	0.00
Schienenverkehr	Personenzug	Schiene	0.40	0.40	0.40
Schienenverkehr	Güterzug	Schiene	0.19	0.19	0.19
Schiffsverkehr	Personenverkehr	Schiff	0.06	0.06	0.06
Schiffsverkehr	Güterverkehr	Schiff	0.06	0.06	0.06
Luftverkehr	Luftverkehr	Luft	0.04	0.04	0.04
Haushalte	total		1.42	1.42	1.42
Industrie	total		4.60	4.61	4.59
Land-/Forstwirtschaft	total		2.25	2.26	2.24
natürliche Immissionen	total		1.00	1.00	1.00
Summe			12.65	12.66	12.62

⁹⁸ INFRAS; Ecoplan (2019)

⁹⁹ Vgl. Entwicklung der Luftqualität in der Schweiz, Bundesamt für Umwelt: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/daten/luftbelastung--historische-daten/jahreswerte-aller-stationen-der-schweiz/entwicklung-der-luft-qualitaet-in-der-schweiz.html>

4.3.2 Luftverschmutzungsbedingte Krankheits- und Todesfälle

Wie in den bisherigen Studien wird die Anzahl der Krankheits- und Todesfälle wegen Luft- und Lärmbelastung nach der Methode der attributablen Fälle berechnet: Grundlage der Berechnung ist eine Belastungs-Wirkungs-Beziehung, die ausdrückt, wie stark das Risiko für eine bestimmte Krankheit (oder für Todesfälle) zunimmt, wenn die Schadstoffexposition um einen bestimmten Wert ansteigt (siehe Schritt 6 in Abbildung 4-1). Diese Belastungs-Wirkungs-Beziehung wird aus den Ergebnissen von epidemiologischen Studien abgeleitet, in denen der Zusammenhang zwischen der Schadstoffbelastung und dem jeweiligen Gesundheitsendpunkt untersucht wurde. Um die attributablen Fälle zu berechnen, muss neben der bestehenden Schadstoffexposition auch die beobachtete Häufigkeit der jeweiligen Erkrankung bzw. die Höhe der Sterberate in der Bevölkerung bekannt sein. Die adäquate Verknüpfung dieser Grössen ergibt dann die attributablen Fälle, das heisst die Anzahl Erkrankungen, die auf eine bestimmte Schadstoffexposition zurückzuführen ist.

a) Leitschadstoff

Bisherige nationale und internationale Gesundheitsrisikoabschätzungen durch Luftverschmutzung für die Schweiz basierten auf Feinstaub, entweder $PM_{2.5}$ oder PM_{10} (Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2.5 bzw. 10 Mikrometer), und allein oder in Kombination mit Stickstoffdioxid (NO_2) und / oder Ozon¹⁰⁰. In der vorliegenden Studie wird **PM_{10}** weiterhin als Leitschadstoff verwendet. Diese Entscheidung beruht auf einer breiteren Evidenz für langfristige Gesundheitseffekte im Vergleich zu alternativen Schadstoffen (u.a. NO_2 und Ozon) und auf einer besseren Abbildung der verkehrsbedingten Luftverschmutzung im Vergleich zu $PM_{2.5}$, wie unten erläutert.

In der aktuellen epidemiologischen Literatur werden für $PM_{2.5}$ mehr Effektschätzer publiziert als für PM_{10} . Damit stellt sich die Frage, ob $PM_{2.5}$ – statt wie bisher PM_{10} – als neuer Leitschadstoff für die Luftbelastung in der Schweiz verwendet werden soll. Für die Abschätzung der Effekte der Gesamtluftbelastung hat die Wahl der Feinstaubfraktion $PM_{2.5}$ als Leitschadstoff im Vergleich zu PM_{10} keine grossen Konsequenzen, da $PM_{2.5}$ und PM_{10} hoch korreliert sind und in der Schweiz $PM_{2.5}$ im Durchschnitt 69% der PM_{10} -Konzentration ausmacht.¹⁰¹ Daher können die Effektschätzer mit einem Faktor für $PM_{2.5} / PM_{10}$ konvertiert werden. Unterschiede in der Toxizität der Feinstaubpartikel nach Grösse konnten noch nicht nachgewiesen werden. Daher ist es schwer zu sagen, ob die Verwendung von Effektschätzern für eine PM-Fraktion oder eine andere PM-Fraktion zu einer Über- oder Unterschätzung der gesundheitlichen Auswirkungen führt (und in welchem Umfang). Die Effektschätzer variieren je nach epidemiologischer Studie, und der Einfluss der PM-Fraktion ist oft nicht einfach zu bestimmen. Wenige Studien haben die beiden Partikelindikatoren vergleichbar analysiert.¹⁰² Die Wahl der Feinstaubfraktion $PM_{2.5}$ anstatt PM_{10} ist für die Abschätzung nach Verkehrsträger von gewisser Relevanz, weil die primären Partikel aus Verbrennungsmotoren und sekundär generierte Nitratpartikel zur Ultrafeinstaubfraktion gehören. Emittiert ein Verkehrsträger hingegen vorwiegend im Bereich zwischen $PM_{2.5}$ und PM_{10} , wird diese gesundheitliche Wirkung

¹⁰⁰ Castro; Rösli; de Hoogh; u. a. (2022)

¹⁰¹ INFRAS; Meteotest (2020b)

¹⁰² Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) (2013)

mit PM_{2.5} als Leitschadstoff unterschätzt. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die räumliche Korrelation von PM₁₀ mit Strassenverkehrsindikatoren häufig höher ist als für PM_{2.5}, weil Abrieb und Aufwirbelungen relativ grobe Partikel im Grössenbereich von 2.5 - 10 Mikrometer produzieren, die mit PM₁₀, aber nicht mit PM_{2.5} gemessen werden.¹⁰³ Aus diesen Gründen und unter Berücksichtigung der oben erwähnten Unsicherheiten bei quellenspezifischen Betrachtungen wird im Rahmen einer quellenspezifischen Risikoabschätzung PM₁₀ nach wie vor als der geeignete Leitschadstoff erachtet und Effektschätzer bei Bedarf aus PM_{2.5} konvertiert.

Im Luftverkehr liegen für PM₁₀ Schätzungen der Emissionen durch das BAZL vor. Also wird auch im Luftverkehr PM₁₀ als Leitschadstoff verwendet, weil dieses Vorgehen konsistent ist zu den anderen Verkehrsträgern und insbesondere, weil die epidemiologische Datenlage für PM₁₀ deutlich besser ist als für andere Schadstoffe wie z.B. NO₂.¹⁰⁴

Es wird darauf verzichtet, neben PM₁₀ noch einzelne Feinstaubkomponenten in die Abschätzung miteinzubeziehen. Daher wird angenommen, dass alle Feinstaubkomponenten die gleiche Toxizität haben. PM₁₀ umfasst unterschiedlichste Stoffe, von relativ grossen biogenen Partikeln, mechanisch generiertem Pneuabrieb und Aufwirbelungen bis zu ultrafeinen Russ- und Metallpartikeln. Die PM₁₀-Massenkonzentration wird vor allem von den grossen Partikeln (> 100 nm) bestimmt. Die ultrafeinen Partikel, welche beispielsweise im Abgas von Verbrennungsmotoren anzahlmässig dominieren oder durch Kondensation aus Gasen gebildet werden, tragen relativ wenig zur Massenkonzentration bei. Im Jahr 2013 bestand allgemein der Konsens, dass „mehrere Komponenten zu den Gesundheitseffekten von PM_{2.5} und PM₁₀ beitragen und es nicht genügend Evidenz gibt, um in Bezug auf spezifische Gesundheitseffekte zwischen verschiedenen Bestandteilen (oder Quellen) zu differenzieren.“¹⁰⁵ Es wurde auch explizit gewarnt, dass man „in Gesundheitsrisikoabschätzungen extrem vorsichtig sein sollte, bestimmte Gesundheitseffekte spezifischen Feinstaubkomponenten zuzuschreiben.“¹⁰⁶ Seitdem hat die Forschung in diesem Bereich gewisse Fortschritt gemacht, aber mit ähnlichen Schlussfolgerungen. Eine europäische Studie des Projekts ELAPSE¹⁰⁷ hat gefunden, dass die Effektschätzer von Feinstaubkomponenten nach der Adjustierung für Feinstaub abnehmen. Daher ist zurzeit immer noch davon abzuraten, zusätzlich zu PM_{2.5} eine Differenzierung der Gesundheitsauswirkungen für die verschiedenen Feinstaubquellen vorzunehmen. Damit werden alle Arten von Feinstaub-Emissionen (z.B. Auspuff, Pneuabrieb, Bremsabrieb Schiene) mit der gleichen Toxizität berücksichtigt, obwohl es durchaus auch Hinweise auf Unterschiede gibt.

NO₂ und elementarer Kohlenstoff (EC), Hauptbestandteil von Russ, sind Schadstoffe, die vorwiegend vom Verkehr emittiert werden und daher eine bessere Korrelation mit Verkehrsnähe als PM₁₀ weisen. Neue Zwei-Schadstoffmodellen (d.h. gegenseitig adjustiert) aus europäischen Kohorten

¹⁰³ Beelen; Raaschou-Nielsen; Stafoggia; u. a. (2014)

¹⁰⁴ Von der Messung der Emissionen her würde sich NO_x als mögliche Alternative anbieten. Aber die epidemiologische Datenbasis für NO₂ ist weniger umfassend.

¹⁰⁵ World Health Organization. Regional Office for Europe (2013), S. 19.

¹⁰⁶ World Health Organization. Regional Office for Europe (2013), S. 29.

¹⁰⁷ Chen; Rodopoulou; de; u. a. (2021)

des Projekts ELAPSE zeigen, dass $PM_{2.5}$ mit NO_2 und EC korreliert ist.¹⁰⁸ Nach der Adjustierung ($PM_{2.5}$ vs. NO_2 und $PM_{2.5}$ vs. EC) reduzieren sich die $PM_{2.5}$ -Schätzer häufig, während der NO_2 - und EC-Effektschätzer eher konstant bleiben. Das deutet, dass NO_2 und EC nicht unabhängig von $PM_{2.5}$ sind und daher bei der Anwendung von mehreren Leitschadstoffen in Gesundheitsrisikoabschätzungen Doppelzählungen nur vermieden werden können, wenn die entsprechenden Effektschätzer von Zwei-Schadstoffmodellen abgeleitet werden. Solche Zwei-Schadstoffmodelle können jedoch aufgrund der Zufallsstreuung in den Daten zu paradoxen Resultaten führen. Das Projekt QHIAS (Quantification of Health Impact of Air Pollution in Switzerland), das europäische Effektschätzer aus dem Projekt ELAPSE genutzt hat, hat gefunden, dass die attributable Sterblichkeit mit Zwei-Schadstoffeffektschätzern für $PM_{2.5}$ und NO_2 kleiner sein kann als die Effekte ausschliesslich mit $PM_{2.5}$ als Effektschätzer ohne Adjustierung für andere Schadstoffe.¹⁰⁹ Aus diesen Gründen wird zurzeit in Gesundheitsrisikoabschätzungen meistens nur Effektschätzer für einen Schadstoff verwendet und die Summe von Effekten aus korrelierten Schadstoffen vermieden, da sonst Doppelzählungen bei Schadstoffen drohen. Dementsprechend wird in diesem Projekt auf einen zusätzlichen Verkehrsindikatorschadstoff (z.B. NO_2 oder EC) verzichtet.

Auch Ozon wird wie bisher nicht berücksichtigt. Ozon ist ein Schadstoff, dessen zeitliche und räumliche Verteilung in der Schweiz (und Europa) nicht mit Feinstaub korreliert und dessen gesundheitliche Auswirkungen mit dem Leitschadstoff PM_{10} folglich nicht überschneiden. Neue Ozon-Effektschätzer sind – z.B. aus europäischen Kohorten des Projekts ELAPSE – vorhanden. Eine besondere Schwierigkeit bei der Quantifizierung der Ozon-bedingten Mortalität ist die Abschätzung der Beiträge der einzelnen Verkehrsträger. Ozon ist ein sekundärer Schadstoff und Verbrennungsemissionen können lokal zu einer Reduktion führen. Zudem ist die Ozonkonzentration zu einem grossen Teil durch Langstreckentransporte der Schadstoffe und natürliche Quellen beeinflusst. Die Datengrundlage für die Expositionsmodellierung ist in der Schweiz dürrig, da nur die Verteilung des 98%-Perzentsils des maximalen Stundenwertes modelliert wird, nicht aber der maximale tägliche 8-Stunden-Mittelwert, welcher im Allgemeinen die Grundlage für epidemiologische Studien bildet. Aus diesen Gründen wird auf die Abschätzung der Ozon-bedingten Mortalität verzichtet.

Für den Einfluss von anderen Umweltfaktoren wie z.B. meteorologische Ereignisse und Klimawandel wird in unseren Berechnungen nicht kontrolliert.

b) Schwellenwert

Bei der Berechnung der Auswirkungen der gesamten Luftbelastung (durch Verkehr, aber auch durch Haushalte, Industrie und Landwirtschaft etc.) wurde bisher eine Schwellenwertkonzentration von $7.5 \mu g/m^3$ PM_{10} verwendet, d.h. Belastungen unterhalb diesem Schwellenwert wurden nicht quantifiziert. Für die Wahl der Schwellenwertes gibt es unterschiedliche Quellen:

- Beim Projekt QHIAS (Quantification of Health Impact of Air Pollution in Switzerland), das vom BAFU finanziert wird, wurde $5 \mu g/m^3$ $PM_{2.5}$ verwendet¹¹⁰ Dies entspricht $7.26 \mu g/m^3$ PM_{10} mit

¹⁰⁸ Chen; Rodopoulou; de; u. a. (2021)

¹⁰⁹ Castro; Röösli; Kutlar Joss (2023)

¹¹⁰ Castro; Röösli; Kutlar Joss (2023)

einem Schweizer Umrechnungsfaktor zwischen $PM_{2.5}$ und PM_{10} von 0.689.¹¹¹ Die letzte Schätzung der europäischen Umweltagentur (EEA) hat auch diesen Wert verwendet.¹¹² Das ist der Richtwert für $PM_{2.5}$ bei den neuen WHO Air Quality Guidelines 2021 und zeigt die tiefste Konzentration, ab der eine minimale relevante Menge einer gesundheitlichen Auswirkung bei langfristiger Exposition auftritt.¹¹³

- In der «Global Burden of Disease»-Studie wurde für $PM_{2.5}$ ein Schwellenwert ab $2.4 \mu\text{g} / \text{m}^3$ gewählt (Gleichverteilung zwischen 2.4 und $5.94 \mu\text{g} / \text{m}^3$).¹¹⁴ Dies entspricht der tiefsten Konzentration, für die Studien einen Zusammenhang belegen konnten.¹¹⁵ Rechnet man diesen Schwellenwert für $PM_{2.5}$ mit dem Schweizer Verhältnis von $PM_{2.5} / PM_{10}$ um, ergibt sich ein Schwellenwert für PM_{10} von $3.48 \mu\text{g} / \text{m}^3$.¹¹⁶
- Die EEA¹¹⁷ verwendete bei ihren früheren Abschätzungen keine Schwellenwertkonzentration (d.h. $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) mit der Annahme, dass jede Menge Luftverschmutzung (auch bei tiefen Immissionswerten) Gesundheitseffekte verursachen kann.

Ein **Schwellenwert von $7.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10}** wird für die Kosten der gesamten Luftbelastung gewählt. Die Wahl dieses WHO-Richtwerts als Schwellenwert / Referenzszenario stimmt mit der Wahl des Schweizer Projekts QHIAS und der neuen EEA-Abschätzung überein. Es scheint jedoch plausibel zu sein, dass auch unterhalb dieser Schwelle ein Zusammenhang zwischen Schadstoffbelastung und Gesundheitsschäden besteht.¹¹⁸ Denn es gibt keine Studien, die zeigen, dass unterhalb eines Schwellenwertes keine Schäden auftreten, da sehr tiefe Konzentrationen aufgrund natürlicher $PM_{2.5}$ -Quellen nicht auftreten. Es ist unwahrscheinlich, dass ab einer gewissen Konzentration die Gesundheitskosten linear zunehmen und unter dem Schwellenwert der Zusammenhang nicht existiert. Der obige Schwellenwert von $7.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} ist vielmehr eine vorsichtige at least Annahme bei der Ermittlung der externen Kosten.

Dieser Schwellenwert hat nur Auswirkungen auf die Kosten der gesamten Luftbelastung (inkl. Industrie, Haushalte etc.), aber nicht auf die Kosten durch den Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr. **Beim Verkehr wird kein Schwellenwert verwendet**, weil wie bisher angenommen wird, dass sich die verkehrsbedingte Veränderung der Luftbelastung oberhalb des Schwellenwertes befindet.

¹¹¹ Das Verhältnis wurde anhand der bevölkerungsgewichteten PM_{10} - und $PM_{2.5}$ -Immissionen in der Schweiz aus dem technischen Bericht zum Schadstoffausbreitungsmodell (INFRAS; Meteotest (2020b)) berechnet (=0.689).

¹¹² Soares; Ortiz; Gsell; u. a. (2022)

¹¹³ WHO (2021)

¹¹⁴ Burnett; Chen; Szyszkowicz; u. a. (2018)

¹¹⁵ Liu; Chen; Sera; u. a. (2019), Beelen; Raaschou-Nielsen; Stafoggia; u. a. (2014)

¹¹⁶ Mit diesem Schwellenwert wird in einer Studie für die Schweiz von Castro; Götschi; Achermann; u. a. (2020) gerechnet, wobei auch der bisherige Schwellenwert von $7.5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ erwähnt wird und bewusst davon abgewichen wird.

¹¹⁷ Leeuw; Horálek (2016)

¹¹⁸ Burnett; Chen; Szyszkowicz; u. a. (2018)

Die Ergebnisse mit und ohne Schwellenwert sind nicht vergleichbar. Die Auswirkungen für jede einzelne Emissionsquelle ohne Schwellenwert (Verkehr, Haushalte, Industrie etc.) führen zusammengerechnet zu einer höheren Wirkung als die Berechnungen basierend auf der gesamten Luftbelastung im Vergleich zum Referenzszenario (also mit Schwellenwert).

c) Auswahl der Gesundheitsendpunkte

Bei der Auswahl der berücksichtigten Krankheitsbilder stützten wir uns auf die bisherigen Arbeiten¹¹⁹ und auf das Projekt «Quantifizierung des Gesundheitsnutzens der neuen Luftqualitätsleitlinien der Weltgesundheitsorganisation in der Schweiz»¹²⁰. Die Evidenz von Gesundheitseffekten sowie die Verfügbarkeit von Belastung-Wirkungs-Beziehungen, Gesundheitsdaten und Kostendaten wurden als Auswahlkriterien berücksichtigt. Daraus ergibt sich eine Liste von neun Krankheitsbildern (vgl. Kapitel 4.2.2b). Die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen zu diesen Gesundheitseffekten werden umfassend an die neue epidemiologische Datenlage angepasst bzw. neu erhoben.

Die Liste der betrachteten Krankheitsbilder in Kapitel 4.2.2b) beinhaltet gegenüber bisher¹²¹ diverse Anpassungen, die wie folgt begründet werden können:

- Drei Krankheitsbilder, die in den bisherigen Berechnungen (für die Jahre 2015-2019) lediglich je 0.1% der Kosten ausmachten, werden nicht mehr weiter untersucht. Die Gesundheitsauswirkungen (Anzahl Fälle) sind zwar beträchtlich, aber die Kosten sind nach den bisherigen Berechnungen im Vergleich mit den anderen Gesundheitsendpunkten vernachlässigbar. Damit werden die drei Krankheitsbilder
 - Prävalenz von akuter Bronchitis bei Kindern
 - Asthmaanfälle bei Erwachsenen
 - Tage mit Asthmasymptomen bei Kindernnicht mehr miteinbezogen. Darüber hinaus ist die Evidenz auf die Inzidenz von Asthma (vor allem bei Erwachsenen) stärker für NO₂ als für Feinstaub.¹²² Daher wäre die Aufnahme der oben aufgeführten Endpunkte mit dem zusätzlichen Aufwand der Modellierung von NO₂ verbunden, die sich für einen sehr kleinen Beitrag in der Gesamtkosten nicht lohnt. Zu Asthma vgl. auch folgende Box.
- Aufgrund der neueren Literatur wird das bisherige Krankheitsbild Inzidenz von chronischer Bronchitis bei Erwachsenen (machte bisher 4.3% der Kosten 2019 aus) ersetzt durch **Inzidenz von COPD** («Chronic Obstructive Pulmonary Disease» bzw. chronisch obstruktive (verengte) Lungenerkrankung). COPD ist umfassender und enthält neben Bronchitis auch das Lungenemphysem (Überblähung der Lunge). Landläufig spricht man von Raucherlunge und Raucherhusten. Die Erkrankten fühlen sich stark in der Ausatmung behindert.

¹¹⁹ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

¹²⁰ Castro; Rösli; Kutlar Joss (2023)

¹²¹ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

¹²² Castro; Rösli; Kutlar Joss (2023)

- Im Projekt «Quantifizierung des Gesundheitsnutzens der neuen Luftqualitätsleitlinien der Weltgesundheitsorganisation in der Schweiz» wurden neu auch Inzidenz von Lungenkrebs, ischämischen Herzkrankheiten und Schlaganfällen miteinbezogen. Die durch diese drei Krankheitsbilder bedingten Todesfälle werden im vorliegenden Projekt über die Gesamt mortalität bereits abgedeckt. In Bezug auf die nicht tödlichen Krankheitsverläufe werden ischämische Herzkrankheiten und Schlaganfälle durch die Spitaltage wegen Herz- / Kreislaufkrankungen berücksichtigt, nicht miteinbezogen werden aber Spitaltage durch Lungenkrebs. Zusätzlich wären Medikamentenkosten dieser drei Krankheitsbilder miteinzubeziehen. Bei ischämischen Herzkrankheiten und Schlaganfällen gehen wir davon aus, dass diese eher gering sein dürften, bei Lungenkrebs könnten aber die Kosten für Chemotherapien nicht vernachlässigbar sein. Entsprechend wird **Lungenkrebs** (Inzidenz und Spitaleintritte) neu miteinbezogen.

Box: Asthma

Asthma wird wie beschrieben nicht in die vorliegende Studie integriert. Im Folgenden sollen jedoch die Grössenordnung der Kosten von Asthma grob abgeschätzt werden, um aufzuzeigen, dass dieser Ausschluss das Ergebnis nicht massgeblich beeinflusst, denn in der Literatur wurden – nach dem Entscheid Asthma auszuschliessen – neue Kostensätze für Asthma publiziert, die von den bisher verwendeten deutlich abweichen.

Aus der Studie Castro et al. (2023¹²³) geht hervor, dass im Jahr 2019 durch die gesamte Luftbelastung (nicht nur verkehrsbedingte Luftbelastung) insgesamt ca. 1'150 Erwachsene neu an Asthma erkranken und ca. 320 Kinder (berechnet über NO₂, nicht PM₁₀).

In einer aktuellen OECD-Studie¹²⁴ liegen neue Kostensätze für die immateriellen Kosten von Asthma vor, die höher sind als die Kostensätze, die bisher zur Berechnung der externen Kosten des Verkehrs in der Schweiz verwendet wurden. Diese Kostensätze beruhen auf dem Neuauftreten von Asthma (Inzidenz – und nicht mehr wie in den bisherigen Studien auf Asthmaanfällen). Es ergeben sich Mittelwerte von 280'000 US\$₂₀₂₂ für Erwachsene bzw. 430'000 US\$₂₀₂₂ für Kinder.

Werden die OECD-Kostensätze verwendet, ergeben sich durch Asthma somit immaterielle Kosten von ca. 470 Mio. CHF im Jahr 2019. Gemäss den unten folgenden Berechnungen verursachte die gesamte Luftbelastung im Jahr 2021 Kosten von 9.4 Mrd. CHF, so dass die Kosten von Asthma sich auf lediglich 5% dieser Kosten belaufen.¹²⁵

- Neu berücksichtigt werden (wie beim Projekt «Quantifizierung des Gesundheitsnutzens der neuen Luftqualitätsleitlinien der Weltgesundheitsorganisation in der Schweiz») auch **Diabetes** (Typ 2 – Altersdiabetes) und **Demenz** (beides Inzidenz und Spitaleintritte). Dass Luftbelastung

¹²³ Castro; Rösli; Kutlar Joss (2023)

¹²⁴ OECD (2023), S. 3

¹²⁵ Ein kleiner Teil dieser 470 Mio. CHF ist in den im Folgenden berechneten Kosten enthalten: Asthma (ICD-10-Code J45 – ICD steht für «International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems» und die Ziffer 10 weist auf die zehnte Revision der Codes hin.) ist Teil der Atemwegserkrankungen (J00-J99). Spitalaufenthalte aufgrund von Asthma werden also bereits berücksichtigt (immaterielle Kosten von grob geschätzt ca. 0.2 Mio. CHF).

auch Demenz beeinflusst, ist wie folgt zu erklären: Luftverschmutzung, insbesondere die Verschmutzung durch kleine Partikel, kann über die Lunge und das Herz- / Kreislaufsystem in das Gehirn gelangen. Dies wird mit einer Form der Demenz (vaskuläre Demenz) in Verbindung gebracht, die durch Schäden an den Blutgefässen im Gehirn verursacht wird.¹²⁶

Inzidenz von niedrigem Geburtsgewicht bei Termingeburten wurde beim Projekt «Quantifizierung des Gesundheitsnutzens der neuen Luftqualitätsleitlinien der Weltgesundheitsorganisation in der Schweiz» mitberücksichtigt. Dazu liegen aber keine Kostensätze vor (z.B. für allfällige zusätzliche medizinische Kosten oder Brutkasten) oder allfällige längere nachgeburtliche Spitalaufenthalte von Mutter und Kind. Denkbar sind auch langfristige negative gesundheitliche Folgen von niedrigem Geburtsgewicht. Die Analyse dieser Fragestellung dürfte ein eigenes Forschungsprojekt darstellen. Auf den Einbezug des niedrigen Geburtsgewichts muss deshalb verzichtet werden.

Wie oben geschrieben, berücksichtigen wir bei der langfristigen Mortalität Personen ab 20 Jahren – sowie die 0-1-Jährigen, welche über die Säuglingssterblichkeit abgedeckt werden. Tatsächlich beruhen die Studien aber auf Erwachsenen ab 30 Jahren. Da die natürliche Sterblichkeit bei den unter 30-Jährigen nur gering ist, wäre eine sehr grosse Stichprobe erforderlich, um auch signifikante Effektschätzer für die 1-29-Jährigen herleiten zu können. Darauf wird aus Kostengründen in den epidemiologischen Studien verzichtet. Gemäss dem at least-Ansatz wurde deshalb bisher auf die 1-29-Jährigen verzichtet. So empfiehlt auch die WHO vorsichtig, die Effektschätzer für Erwachsene nur für Erwachsene anzuwenden¹²⁷. Es ist jedoch nicht plausibel, dass der Effektschätzer für 30-Jährige gilt, aber für 29-Jährige nicht. Vielmehr ist davon auszugehen (best guess), dass der Effektschätzer auch für jüngere Personen anwendbar ist. Natürlich könnte der Effektschätzer für jüngere Personen höher oder tiefer liegen als für über 30-Jährige. Da aber keine Differenzierung zwischen Erwachsenen und Senioren stattfindet, ist nicht einsehbar, warum ein anderer Wert gelten soll für die unter 30-Jährigen. Die bestmögliche Schätzung des Effektschätzers für die 20-29-Jährigen ist derselbe Effektschätzer wie für die über 30-Jährigen. Der Einbezug der jungen Erwachsenen hat nur geringe Auswirkungen auf das Ergebnis. So haben die bisherigen Ergebnisse¹²⁸ gezeigt, dass die verlorenen Lebensjahre um lediglich 2% zunehmen, wenn die 1-29-Jährigen miteinbezogen werden. Die Auswirkungen für die 1-19-Jährigen werden hingegen nicht quantifiziert. Damit werden die WHO-Empfehlungen bezüglich Altersgruppe (d.h. nur Erwachsene) eingehalten.

Dieselben Argumente gelten auch bei den Krankheitsbildern. Die Inzidenzen von COPD und Diabetes werden bei Erwachsenen ab 20 Jahre quantifiziert. Die Inzidenz von Demenz wird bei Erwachsenen über 40 quantifiziert,¹²⁹ weil Demenz als Alterserkrankung betrachtet wird und Lungenkrebs bei allen Altersklassen, weil die Grundlagedaten nicht spezifisch für Erwachsene verfügbar waren.

¹²⁶ Committee on the Medical Effects of Air Pollutants (2022), S. V

¹²⁷ WHO (2013)

¹²⁸ Ecoplan; INFRAS (2014), S. 162

¹²⁹ Eigentlich gilt der Effektschätzer für Erwachsene, aber Demenz ist eine Alterskrankheit und daher häufiger bei Senioren. Inzidenzen treten ab 40 Jahren auf und auch bei den Spitaldaten kann die Altersgrenze 40 Jahre ausgewertet werden, so dass die Altersgrenze 40 verwendet wird.

Für die Berechnung verwenden wir für alle Krankheitsbilder die Immissionen der Bevölkerung ab 30 Jahren (mit folgenden Ausnahmen: Säuglingssterblichkeit: Immissionen der 0-14-Jährigen; Lungenkrebs, Herz-/Kreislauf- und Atemwegserkrankungen: Immissionen der Gesamtbevölkerung).

d) Belastungs-Wirkungs-Beziehungen

Die mittlere Belastungs-Wirkungs-Beziehung wird aus den neuesten verfügbaren Studien hergeleitet. Abbildung 4-5 gibt einen Überblick über die verwendeten Grundlagendaten für die Abschätzung der luftbedingten gesundheitlichen Auswirkungen. Konfidenzintervalle, die unter 1 fallen, werden in den Berechnungen bei 1 abgeschnitten, da Werte unter 1 (positive Gesundheitseffekte durch Luftbelastung) nicht plausibel sind.

Abbildung 4-5: Belastungs-Wirkungs-Beziehungen, die für die Abschätzung der luftbedingten gesundheitlichen Auswirkungen verwendet werden

Exposition	Endpunkt	Mittelwert [Konfidenzintervall]	Effektschätzer Mittelwert [Konfidenzintervall]	Quelle
		wie in der Quelle	pro 10µg/m ³ PM ₁₀	
<i>Langfristig</i>	Krankheitsbedingte Sterblichkeit bei Erwachsenen	1.118 [1.060; 1.179] pro 10 µg/m ³ PM _{2.5}	1.08 [1.041; 1.12]	Metaanalyse von 8 europäischen ELAPSE Kohortenstudien (Brunekreef et al. 2022)
	Säuglingssterblichkeit	1.04 [0.98; 1.11] pro 7 µg/m ³ PM _{2.5}	1.039 [0.98; 1.108]	Studie basiert auf 3.5 Millionen Kindern in den USA (Woodruff et al. 2008)
	Inzidenz von chronischen obstruktiven Lungenerkrankungen (COPD) bei Erwachsenen	1.17 [1.06; 1.29] pro 5 µg/m ³ PM _{2.5}	1.242 [1.084; 1.42]	Gepoolte Analyse aus 3 europäische Kohorten des Projekts ELAPSE (Liu et al. 2021a)
	Inzidenz von Lungenkrebs	1.13 [1.05; 1.23] pro 5 µg/m ³ PM _{2.5}	1.183 [1.07; 1.33]	Gepoolte Analyse aus 7 europäische Kohorten des Projekts ELAPSE (Hvidtfeldt et al. 2021)
	Inzidenz von Diabetes (Type 2)	1.05 [0.96; 1.15] pro 5 µg/m ³ PM _{2.5}	1.07 [0.945; 1.212]	Metaanalyse von 11 Studien, 3 davon aus Europa (Yang et al. 2020)
	Inzidenz von Demenz	1.21 [1.09; 1.63] pro 2 µg/m ³ PM _{2.5}	1.928 [1.346; 5.383]	Metaanalyse von 6 Studien aus Europa (Wilker et al. 2023)
<i>Kurzfristig</i>	Spitaleintritte (bzw. –Tage) wegen Herz-/ Kreislauferkrankungen	1.009 [1.001; 1.017] pro 10 µg/m ³ PM _{2.5}	1.006 [1.001; 1.012]	APED Metaanalyse von vier Einzelstädtestudien und einer Multicenterstudie (WHO 2013)
	Spitaleintritte (bzw. –Tage) wegen Atemwegserkrankungen	1.019 [0.998; 1.040] pro 10 µg/m ³ PM _{2.5}	1.013 [0.999; 1.027]	APED Metaanalyse von drei Einzelstädtestudien (WHO 2013)
	Tage mit eingeschränkter Aktivität bei Erwachsenen	1.0493 [1.042; 1.053] pro 10 µg/m ³ PM _{2.5}	1.034 [1.029; 1.036]	Metaanalyse einer Querschnittstudie (Orellano et al. 2023) mit 6 Effektgrößen (Jahre 1976-1981) aus USA (Ostro 1987)
	Tage mit Erwerbsausfall bei Arbeitenden	1.0699 [1.039; 1.053] pro 10 µg/m ³ PM _{2.5}	1.048 [1.027; 1.036]	Metaanalyse einer Querschnittstudie (Orellano et al. 2023) mit 6 Effektgrößen (Jahre 1976-1981) aus USA (Ostro 1987)

Die bisher verwendete Effektschätzer aus dem WHO-Projekt HRAPIE¹³⁰ werden nur bei Spitaleintritten durch Herz- / Kreislauf- und Atemwegserkrankungen weiterverwendet, da keine bessere Alternative in der Literatur zur Verfügung steht. Sonst werden neue Effektschätzer ausgewählt. Für die Hospitalisierungen wegen allen anderen Krankheiten der Abbildung 4-5 wird die Effektschätzer für Inzidenz verwendet (keine spezifische Effektschätzer für Hospitalisierungen vorhanden). Es wird somit angenommen, dass die Inzidenz und die Spitaleintritte gleichmässig zunehmen (vgl. Kapitel 20.5.1c).

Für die Auswirkungen der Feinstaubbelastung auf die krankheitsbedingte Sterblichkeit, d.h. für alle Todesursachen ausser Unfällen und Gewalteinwirkungen, schlägt die European Respiratory Society (ERS) und die International Society for Environmental Epidemiology (ISEE) eine Belastungs-Wirkungs-Beziehung von 1.08 pro 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} vor.¹³¹ Der Effektschätzer basiert auf einer Meta-Analyse von europäischen Kohorten aus dem Projekt ELAPSE und wurde bei dem Projekt QHIAS verwendet und mit Alternativen aus der Literatur verglichen¹³². Eine Studie aus den USA wird für die Säuglingssterblichkeit verwendet.¹³³ Gepoolte Effektschätzer von europäischen Kohorten aus dem Projekt ELAPSE werden für COPD¹³⁴ und Lungenkrebs¹³⁵ sowie globale Metaanalysen (manche davon aus Europa) für Diabetes¹³⁶ und Demenz¹³⁷ eingesetzt. Der Effektschätzer von Demenz ist mit 1.928 mit Abstand am höchsten: Eine Erhöhung der Luftbelastung um 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} führt also beinahe zu einer Verdoppelung der Demenzfälle.

Die Effektschätzer für eingeschränkte Aktivität und Erwerbsausfälle werden aus Metaanalysen von Studien aus den USA erhoben¹³⁸. Bei den Tagen mit eingeschränkter Aktivität wird in Übereinstimmung mit der WHO folgende Definition verwendet: Es handelt sich um alle nicht-unfallbedingten Tage mit eingeschränkter Aktivität durch Luftverschmutzung. Um Doppelzählungen mit allen anderen spezifischen Krankheitsbildern (aber ohne verlorene Lebensjahre) zu vermeiden, werden deshalb die immateriellen Kosten und die Produktionsausfälle bei diesen spezifischen Krankheitsbildern vom vorliegenden Ergebnis zu den Tagen mit eingeschränkter Aktivität bzw. zu den Tagen mit Erwerbsausfall abgezogen. Damit werden bei den Tagen mit eingeschränkter Aktivität und den Tagen mit Erwerbsausfall nur noch Effekte ausgewiesen, die nicht auf die anderen spezifischen Krankheitsbilder zurückzuführen sind.

Die Effektschätzer basieren auf $\text{PM}_{2.5}$, weil heutzutage in der Regel mehr epidemiologische Studien für $\text{PM}_{2.5}$ als für PM_{10} vorhanden sind und daher für $\text{PM}_{2.5}$ robustere Werte hergeleitet werden können. Sie werden unter Berücksichtigung des mittleren $\text{PM}_{2.5}$ / PM_{10} -Verhältnisses von 0.689 in

¹³⁰ WHO (2013)

¹³¹ Brunekreef; Andersen; Forastiere; u. a. (2022)

¹³² Castro; Künzli; de Hoogh; u. a. (2023)

¹³³ Woodruff; Darrow; Parker (2008), S. 1999–2002

¹³⁴ Liu; Jørgensen; Ljungman; u. a. (2021)

¹³⁵ Hvidtfeldt; Chen; Andersen; u. a. (2021)

¹³⁶ Yang; Fan; Thiering; u. a. (2020)

¹³⁷ Wilker; Osman; Weisskopf (2023)

¹³⁸ Orellano; Reynoso; Quaranta (2023)

der Schweiz auf PM₁₀ konvertiert (vgl. Kapitel 4.3.2 b). Damit ist gewährleistet, dass international anerkannte Effektschätzer verwendet werden, aber die Vergleichbarkeit mit früheren Abschätzungen bleibt gegeben.

e) Gesundheitsdaten

Abbildung 4-6 zeigt die für die Berechnung verwendeten Grundhäufigkeiten der verschiedenen Gesundheitsendpunkte. Wenn verfügbar werden diese Zahlen von Schweizer Statistiken abgeleitet. Dies ist für die Anzahl und Dauer von Hospitalisierungen möglich¹³⁹. Für alle anderen Gesundheitsendpunkte gibt es keine entsprechenden Statistiken und die Daten stammen aus alternativen Quellen. Statistiken einer schweizerischen Organisation werden für Lungenkrebs¹⁴⁰ verwendet, spezifische Schätzungen für die Schweiz aus der Global Burden of Disease-Studie für COPD,

Abbildung 4-6: Gesundheitsdaten, die für die Abschätzung der luftbedingten gesundheitlichen Auswirkungen verwendet wurden

Endpunkt	Anzahl beobachtete Fälle wie in der Quelle	Quelle	Anzahl beobachtete Fälle 2021
Krankheitsbedingte Sterblichkeit (≥20 Jahre)	Sterbetafel	Spezialauswertung BFS nach 1-Jahresaltersklassen und Geschlecht, Durchschnitt 2015-2019	Sterbetafel
Säuglingssterblichkeit (<1 Jahr)	Sterbetafel	Spezialauswertung BFS nach 1-Jahresaltersklassen und Geschlecht, Durchschnitt 2015-2019	Sterbetafel
Inzidenz von chronischen obstruktiven Lungenerkrankungen (COPD, ≥20 Jahre)	30'747	Fälle 2019. Global Burden of Disease Results (IHME 2020)[1]	31'637
Inzidenz von Lungenkrebs (Alle Altersklassen)	4'795	Fälle pro Jahr (Alle Altersklassen, Durchschnitt 2015-2019) (NKRS 2022)[1]	4'945
Spitaleintritte wegen Lungenkrebs (Alle Altersklassen)	8'876	Diagnosen bei Hospitalisierungen 2021 (BFS 2023)	8'876
Inzidenz von Diabetes Type 2 (≥20 Jahre)	28'542	Fälle 2019. Global Burden of Disease Results (IHME 2020)[1]	29'037
Spitaleintritte wegen Diabetes Type 2 (≥14 Jahre)	5'362	Diagnosen bei Hospitalisierungen 2021 (BFS 2023)	5'362
Inzidenz von Demenz (≥40 Jahre)	18'361	Fälle 2019. Global Burden of Disease Results (IHME 2020)[1]	19'357
Spitaleintritte wegen Demenz (≥40 Jahre)	4'748	Diagnosen bei Hospitalisierungen 2021 (BFS 2023)	4'748
Spitaleintritte wegen Herz-/Kreislaufkrankungen (Alle Altersklassen)	154'155	Diagnosen bei Hospitalisierungen 2021 (BFS 2023)	154'155
Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen (Alle Altersklassen)	93'950	Diagnosen bei Hospitalisierungen 2021 (BFS 2023)	93'950
Tage mit eingeschränkter Aktivität bei Erwachsenen (≥15 Jahre)	19 Tage pro Erwachsener	Gemäss Originalpublikation 19 Tage pro Erwachsener und Jahr. Studie in USA (Ostro and Rothchild 1989).	140'440'191
Tage mit Erwerbsausfall bei Arbeitenden	7.2 Absenztage pro Arbeitenden	Gemäss HEIMTSA Studie 7.2 Absenztage pro Arbeitenden (20-60 Jahre). Studie aus USA (Ostro and Rothchild 1989).	28'432'570

[1] Fälle vom Jahr 2019 oder 2015-2019 und hochgerechnet auf 2021 mit Bevölkerungsdaten

¹³⁹ BFS (2023a)

¹⁴⁰ NKRS (2022)

Diabetes und Demenz¹⁴¹ und Empfehlungen des WHO-Projektes HRAPIE¹⁴² auf der Grundlage einer US-Studie¹⁴³ für eingeschränkte Aktivität und Erwerbsausfälle.

f) Ergebnisse

Verlorene Lebensjahre bzw. frühzeitige Todesfälle

Die folgende Abbildung zeigt die sich ergebenden Auswirkungen der Luftbelastung mit Todesfolge. Durch die Luftbelastung des Gesamtverkehrs im Jahr 2021 gingen insgesamt gut 19'000 Lebensjahre verloren. Davon entfallen 78% (knapp 15'000 Lebensjahre) auf den Strassenverkehr, 17% (3'300 Lebensjahre) auf den Schienenverkehr, 1.2% (225 Lebensjahre) auf den Luftverkehr und knapp 4% (690 Lebensjahre) auf den Schiffsverkehr.¹⁴⁴ Für die Bewertung relevant sind aber die abdiskontierten verlorenen Lebensjahre, die ca. 12% tiefer ausfallen (insgesamt knapp 17'000 Lebensjahre), weil künftige Lebensjahre mit einem Diskontsatz von 1.2% diskontiert werden (vgl. Kapitel 20.3).

Die meisten dieser verlorenen Lebensjahre betreffen das Rentenalter, doch gingen durch die Luftbelastung auch insgesamt 1'900 Erwerbsjahre verloren (abdiskontiert).

Abbildung 4-7: Verlorene Lebensjahre bzw. frühzeitige Todesfälle*

	Strassen- verkehr	Schienen- verkehr	Luft- verkehr	Schiffs- verkehr	Total Verkehr
Anzahl verlorene Lebensjahre	14'930	3'347	225	690	19'192
- abdiskontiert	13'190	2'957	199	610	16'955
Anzahl verlorene Erwerbsjahre	1'707	383	26	79	2'194
- abdiskontiert	1'502	337	23	69	1'931
Anzahl frühzeitige Todesfälle	1'403	315	21	65	1'804
- davon von Erwebstätigen	174	39	3	8	223
Verlorene Lebensjahre pro Todesfall	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6

* Die in dieser Tabelle dargestellten Fallzahlen ohne Schwellenwert sind nicht mit Zahlen vergleichbar, die für die gesamte Luftbelastung inklusive eines Schwellenwerts berechnet werden. Der Schwellenwert ist nicht relevant für die hier dargestellten zusätzlichen Fälle, die durch den Verkehr verursacht werden. Bei der gesamten Luftbelastung ist es üblich, die Ergebnisse ab einem Schwellenwert (d.h. im Vergleich zu einem Referenzszenario) anzugeben, da nur wenige empirische Resultate zum Wirkungszusammenhang unterhalb des Schwellenwertes vorliegen (siehe Kapitel 4.2.3b oben).

¹⁴¹ IHME (2020)

¹⁴² WHO (2013)

¹⁴³ Ostro; Rothschild (1989)

¹⁴⁴ Die Berechnungen erfolgen weiter differenziert nach den Verkehrsmitteln und im Strassenverkehr nach den Antriebs-technologien. Auf eine ausführliche Darstellung wird beim vorliegenden Zwischenergebnis jedoch verzichtet. Dies gilt auch für die im Folgenden dargestellten Krankheitsfälle.

Diese verlorenen Lebens- und Erwerbsjahre sind auf insgesamt 1'800 frühzeitige Todesfälle zurückzuführen. Davon entfallen 1'400 Todesfälle auf den Strassenverkehr, 315 auf den Schienenverkehr, und weitere 21 bzw. 65 auf den Luft- bzw. Schiffsverkehr. Durchschnittlich können pro verhinderten Todesfall knapp 11 Lebensjahre gewonnen werden.

Krankheitsfälle

Durch den gesamten Verkehr wurden im Jahr 2021 knapp 2'400 Hospitalisationen verursacht. Davon entfallen gut 1'000 auf Spitaleintritte aufgrund von Demenz, weniger als die Hälfte davon entstehen durch Lungenkrebs (500 Hospitalisationen), Atemwegserkrankungen (410 Hospitalisationen) und Herz-/Kreislaufkrankungen (320 Hospitalisationen). Lediglich 120 Spitaleintritte sind auf Diabetes zurückzuführen.

Dazu kommen knapp 4'200 neue Fälle von Demenz, knapp 2'300 neue Fälle von COPD, knapp 660 Inzidenzen von Diabetes und 280 Inzidenzen von Lungenkrebs. Durch die Luftbelastung entstehen zudem über 1.5 Mio. Tage mit eingeschränkter Aktivität und etwa 0.45 Mio. Tage mit Erwerbsausfall, wobei diese beiden Tage teilweise auf die anderen Inzidenzen bzw. Hospitalisationen zurückzuführen sind.

Von allen diesen Spitaleintritten und Inzidenzen sind jeweils 78% auf den Strassenverkehr zurückzuführen, 18% auf den Schienenverkehr, 3.6% auf den Schiffsverkehr und 1.1% auf den Luftverkehr.

Abbildung 4-8: Durch Luftbelastung verursachte Krankheitsfälle

	Strassen- verkehr	Schienen- verkehr	Luft- verkehr	Schiffs- verkehr	Total Verkehr
Hospitalisationen					
Herz-/Kreislaufkrankungen	250	56	4	12	321
Atemwegserkrankungen	320	72	5	15	411
Lungenkrebs	389	88	6	18	501
Diabetes	94	21	1	4	121
Demenz	794	183	12	38	1'026
Inzidenzen					
COPD	1'777	402	26	83	2'287
Lungenkrebs	217	49	3	10	279
Diabetes	511	115	7	24	657
Demenz	3'220	741	47	154	4'162
Tage mit eingeschränkter Aktivität	1'221'757	274'119	17'408	56'485	1'569'769
Tage mit Erwerbsausfall	347'011	77'899	4'948	16'055	445'914

Bei der Demenz ist anzumerken, dass häufig die Spitaleinweisung aufgrund einer anderen Krankheit oder eines Unfalls erfolgt, aber der Spitalaufenthalt aufgrund der Demenz verlängert wird.¹⁴⁵ Hier werden jedoch nur die Kosten durch Hospitalisationen mit Hauptdiagnose Demenz erfasst, was zu einer Unterschätzung der Kosten der Demenz führt. Auch bei den anderen Krankheitsbildern gilt, dass nur Hospitalisationen mit der entsprechenden Hauptdiagnose berücksichtigt werden.

Während es bei Diabetes und Demenz deutlich mehr Inzidenzen als Hospitalisationen gibt, ist es beim Lungenkrebs umgekehrt, weil Lungenkrebs zu deutlich mehr Spitalerträgen führt als Demenz oder Diabetes. Diese Unterschiede sind bereits bei den Daten zu Hospitalisationen und Inzidenzen in Abbildung 4-6 zu erkennen.

4.4 Wertgerüst

4.4.1 Verwendete Kostensätze

Die im Anhang A (Kapitel 20.4) hergeleiteten Kostensätze für die Bewertung der Krankheits- und Todesfälle durch die verkehrsbedingte Luftverschmutzung sind in der folgenden Abbildung zusammengestellt.¹⁴⁶ Auffallend sind die hohen Kostensätze aufgrund von verlorenen Lebensjahren (249'000 CHF) und Erwerbsjahren (105'000 CHF), die hohen medizinischen Kosten der Demenz (169'000 CHF durch Pflege in Heimen und durch Angehörige) sowie die hohen immateriellen Kosten durch COPD (118'000 CHF) und Demenz (80'000 CHF).

Abbildung 4-9: Übersicht über die verwendeten Kostensätze 2021 (in CHF)

Krankheitsbild	ICD-10-Code	Spitalkosten pro Hospitalisation	Sonst. med. Kosten pro Inzidenz	Produktionsausfall pro Hospitalisation	Produktionsausfall sonst pro Inzidenz	Wiederbesetzungskosten (Mann / Frau) pro Hospitalisation	Immaterielle Kosten pro Hospitalisation	Immaterielle Kosten sonst pro Inzidenz
Pro verlorenes Lebensjahr	-	-	-	-	-	-	-	249'018
Pro verlorenes Erwerbsjahr bzw. pro Todesfall	-	-	-	-	104'874	40451 / 34391	-	-
Tage mit eingeschränkter Aktivität (pro Tag)	-	-	n.a.	-	287	-	-	230
Herz-/Kreislauferkrankungen	I00 - I99	20'047	n.a.	5'646	n.a.	-	7'185	n.a.
Atemwegserkrankungen	J00 - J99	16'494	-	3'680	-	-	6'673	-
COPD	J40 - J44	-	11'874	-	1'160	-	-	117'766
Lungenkrebs	C34	20'887	7'542	6'307	26'507	-	8'722	49'713
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	E11	18'751	18'194	1'768	8'180	-	9'189	35'318
Demenz	F00 - F03 und G30 - G31	23'664	168'800	60'945	n.a.	4'837	-	79'831

n.a. = not available (nicht verfügbar)

- = nicht relevant bzw. keine Kosten

¹⁴⁵ EcoPlan (2010) Kapitel 4.3

¹⁴⁶ Felder mit der Kennzeichnung „n.a.“ bedeuten, dass wir bei der entsprechenden Krankheitsfolge zwar Kosten erwarten, aber keine Kostensätze verfügbar sind (entweder weil im Rahmen der Literaturrecherche keine gefunden werden konnten oder gemäss Auftrag für diese Kostenfolge keine Suche durchgeführt wurde). Felder mit der Kennzeichnung „-“ bedeuten, dass bei dieser Krankheitsfolge keine Kosten anfallen (bzw. diese bereits in einem anderen Kostensatz eingeschlossen sind – vgl. Anhang A).

4.4.2 Internalisierungsbeiträge

a) LSVA im Strassenverkehr

Wie in Kapitel 3.2.2 erläutert, kann die LSVA nicht auf die verschiedenen externen Effekte (Luftverschmutzung, Lärm, Unfälle etc.) aufgeteilt werden. Deshalb wird die LSVA erst im Rahmen von Kapitel 19 berücksichtigt. Im Folgenden werden also die Ergebnisse vor Abzug der LSVA ausgewiesen.

b) Landegebühren im Luftverkehr

Im Luftverkehr wird ein Teil der Kosten der Luftverschmutzung durch emissionsabhängige Landegebühren internalisiert. Es ist allerdings anzumerken, dass sich diese Internalisierung eigentlich nicht nur auf die Gesundheitskosten der Luftverschmutzung bezieht, sondern auf die gesamten Kosten der Luftverschmutzung (inkl. Gebäudeschäden, Ernteaufschläge, Waldschäden und Biodiversitätsverluste). Eine Aufteilung der Internalisierungsmassnahme auf diese fünf Kostenbereiche ist nicht direkt möglich. Vereinfachend wird die Internalisierungsmassnahme deshalb beim bedeutendsten Kostenbestandteil – den Gesundheitskosten – abgezogen. Die Einnahmen aus den emissionsabhängigen Landegebühren belaufen sich auf 2.38 Mio. CHF.¹⁴⁷

4.5 Vorgehen bei Differenzierungen

4.5.1 Differenzierung nach Antriebsart

Die Differenzierung nach Antriebsarten im Strassenverkehr erfolgt über das HBEFA, in dem die verschiedenen Antriebsarten einzeln ausgewiesen werden. Basis bilden die Emissionsfaktoren für PM₁₀, differenziert nach Antriebsart (vgl. Anhang A, Kapitel 20.1.6). Dabei ist zu beachten, dass die Emissionen durch Abrieb und Aufwirbelung (pro Fahrzeugkategorie) für alle Antriebsarten gleich sind (bzw. im HBEFA nicht differenziert werden können).

4.5.2 Differenzierung nach Raumtypen

Die Differenzierung der Ergebnisse im Strassen- und Schienenverkehr nach den Raumtypen dicht-, mitteldicht- und geringbesiedelt erfolgt über die PM₁₀-Emissionen. Basis zur Ermittlung der Emissionen nach Raumtyp bilden eine Auswertung der Fahrleistungen nach Fahrzeugkategorie (bzw. im Schienenverkehr nach Personen- und Güterverkehr) und Raumtyp aus dem nationalen Verkehrsmodell (vgl. Anhang A, Kapitel 20.1.4) sowie die antriebspezifischen Emissionsfaktoren (HBEFA). Die sich daraus ergebenden prozentualen Anteile für die drei Raumtypen werden dann auf das Endergebnis angewendet. Bei dieser Auswertung werden folgende zusätzliche Effekte berücksichtigt:

¹⁴⁷ Angaben der Flughäfen Zürich und Genf (vom ARE beschafft) sowie Basel und Regionalflughäfen Lugano und Bern (über BAZL beschafft).

- Die Emissionsfaktoren im Strassenverkehr werden nach innerorts, ausserorts und Autobahn differenziert. Entsprechend werden auch die Auswertungen im Verkehrsmodell differenziert, wobei innerorts als Strecken mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit von maximal 60 km/h betrachtet werden und als ausserorts gelten Strecken mit mehr als 60 km/h.
- Zudem wird berücksichtigt, dass Emissionen im bebauten Gebiet höhere Schäden verursachen als Emissionen im unbebauten Gebiet: In der VSS 41 828¹⁴⁸ bzw. im erläuternden Bericht dazu¹⁴⁹ wird aufgezeigt, dass ein Teil der Schäden in unmittelbarer Nähe zum Emissionsort auftreten (lokal), während andere Schadstoffe über (grosse) Strecken transportiert werden, bevor sie den Schaden verursachen (regional). Gemäss VSS 41 828 (Ziffer 20) verursacht PM₁₀ regionale Gesundheitsschäden von 488'000 CHF pro Tonne (Preisstand 2015) und zusätzlich im bebauten Gebiet lokale Schäden von 798'000 CHF. Die Schäden im bebauten Gebiet sind damit um den Faktor 2.64 höher ($= (798'000 + 488'000) / 488'000$).¹⁵⁰ Für die Aufteilung der Schäden werden also die Emissionen im bebauten Gebiet mit dem Faktor 2.64 multipliziert. Dieser Faktor wird mangels besserer spezifischer Datengrundlagen auch im Schienenverkehr verwendet.

4.5.3 Differenzierung nach Kantonen

Die Differenzierung der Ergebnisse im Strassen- und Schienenverkehr nach den Kantonen erfolgt gleich wie die Differenzierung nach Raumtyp: Die Emissionen pro Fahrzeugkategorie und Raumtyp werden über die Fahrleistungen aus dem nationalen Verkehrsmodell und den nach Fahrzeugkategorie und Strassentyp differenzierten Emissionsfaktoren ermittelt. Dabei wird ebenfalls der Gewichtungsfaktor 2.64 für Emissionen im bebauten Gebiet angewendet.

4.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

Wir gehen davon aus, dass zwischen den Immissionen und den daraus resultierenden Krankheitschäden ein (annähernd) linearer Zusammenhang besteht. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen linear verlaufen. Damit sind Grenz- und Durchschnittskosten bei den Gesundheitsschäden der Luftbelastung identisch.

¹⁴⁸ VSS 41 828 (2022)

¹⁴⁹ Ecoplan (2020), S. 57–60

¹⁵⁰ In der VSS 41 828 gibt es auch zusätzliche Daten für einen tiefen bzw. hohen VOSL (value of statistical life). Der Faktor 2.64 ist jedoch immer gleich und damit unabhängig vom VOSL.

4.7 Ergebnisse

4.7.1 Externe Kosten

a) Überblick Gesamtverkehr

Gesamthaft fallen durch die Luftbelastung des Verkehrs externe Gesundheitskosten von 5'938 Mio. CHF an (vgl. die folgenden beiden Abbildungen). Der Strassenverkehr verursacht 78% dieser Kosten (4'616 Mio. CHF), im Schienenverkehr fallen 18% (oder 1'040 Mio. CHF) der Kosten an,

Abbildung 4-10: Überblick über die externen Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung 2021

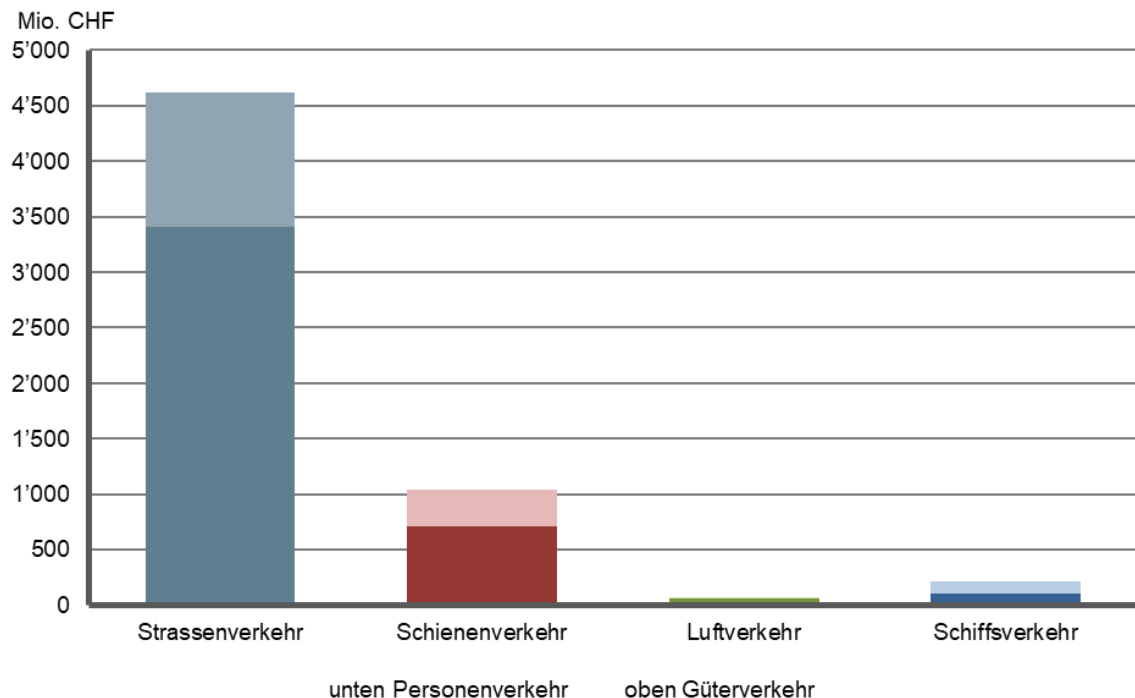


Abbildung 4-11: Überblick über die externen Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung 2021

in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr	3'412.1	1'204.0	4'616.1	77.7%
Schienenverkehr	706.5	333.7	1'040.2	17.5%
Luftverkehr	60.6	6.1	66.6	1.1%
Schiffsverkehr	103.6	111.2	214.8	3.6%
Total	4'282.8	1'654.9	5'937.7	100.0%
in % des Totals	72.1%	27.9%	100.0%	

während im Luft- und Schiffsverkehr vergleichsweise geringe Kosten auftreten (ca. 1% oder 67 Mio. CHF, bzw. 4% oder 215 Mio. CHF). Etwa 72% der Kosten entstehen durch den Personenverkehr. Dieser Anteil stimmt im Strassenverkehr beinahe überein (74%), im Luftverkehr ist der Anteil des Personenverkehrs mit 91% deutlich höher, im Schienen- und Schiffsverkehr mit 68% bzw. 48% hingegen tiefer.

b) Strassenverkehr

In den folgenden Abbildungen werden die Kosten des Strassenverkehrs von 4'616 Mio. CHF weiter aufgeteilt auf die Fahrzeugkategorien und die Kostenbestandteile. Ein Grossteil der Kosten (65%) wird durch Personenwagen verursacht. Von Bedeutung sind auch die drei Güterverkehrskategorien mit 13% für Sattelschlepper, 7% für Lieferwagen und 6% für Lastwagen. Daneben sind auch die ÖV-Busse mit 5% zu erwähnen. Die übrigen Kategorien tragen zusammen nur noch 4% bei.

Abbildung 4-12: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Strassenverkehr 2021 nach Fahrzeugkategorien

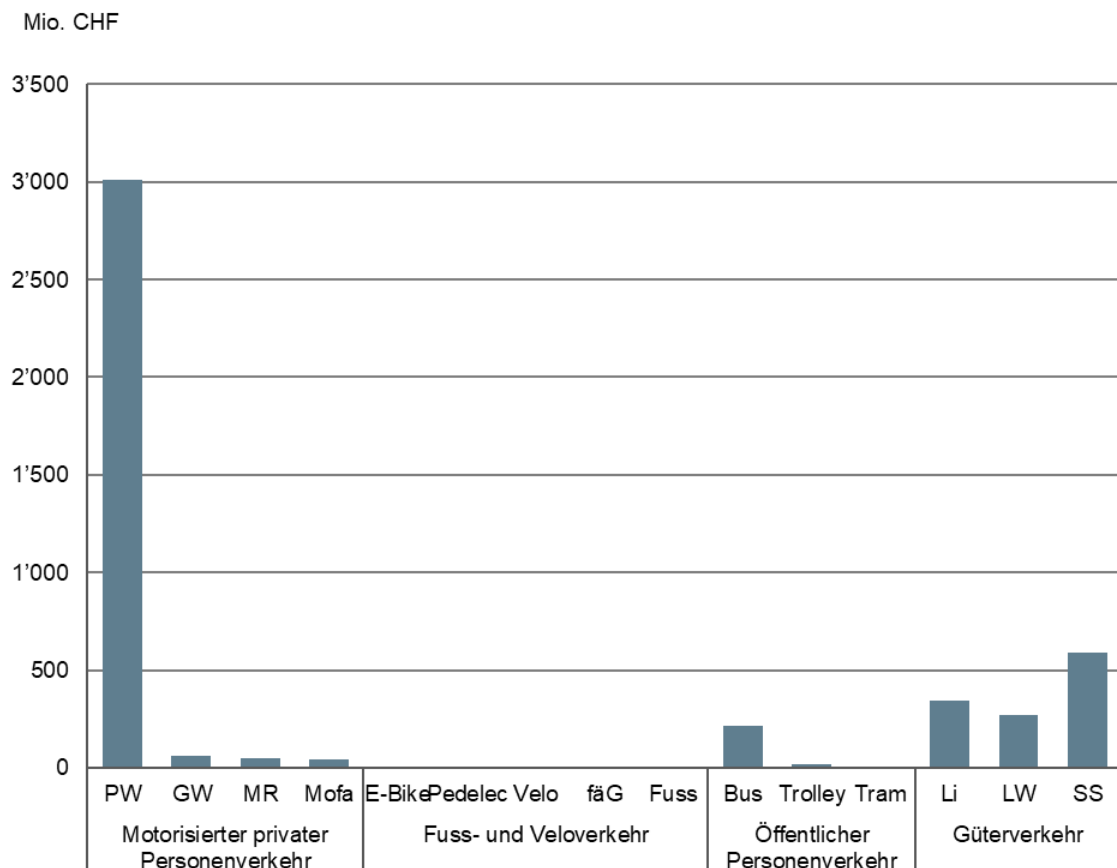


Abbildung 4-13: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Strassenverkehr 2021 nach Krankheitsbildern und Fahrzeugkategorien

in Mio. CHF	Personenverkehr												Güterverkehr			Gesamt- total
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Verlorene Lebensjahre	2'254.4	44.5	37.7	32.0	1.6	6.4	-	-	-	157.3	14.7	6.0	253.0	201.3	439.9	3'448.8
Herz-/Kreislaufkrankungen	5.4	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.4	0.0	0.0	0.6	0.5	1.0	8.2
Atemwegserkrankungen	5.6	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.4	0.0	0.0	0.6	0.5	1.1	8.6
COPD	151.1	3.0	2.6	2.2	0.1	0.4	-	-	-	10.7	1.0	0.4	17.2	13.7	29.9	232.4
Lungenkrebs	13.8	0.3	0.2	0.2	0.0	0.0	-	-	-	1.0	0.1	0.0	1.6	1.2	2.7	21.2
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	11.8	0.2	0.2	0.2	0.0	0.0	-	-	-	0.8	0.1	0.0	1.3	1.1	2.3	18.1
Demenz	560.4	11.6	9.9	8.4	0.4	1.7	-	-	-	41.1	3.9	1.6	66.0	52.5	114.1	871.5
Tage mit eingeschränkter Aktivität	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tage mit Erwerbsausfall	5.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.3	0.0	0.0	0.5	0.4	0.8	7.2
Total	3'007.5	60.0	50.9	43.1	2.1	8.6	-	-	-	212.0	19.9	8.1	340.8	271.2	591.9	4'616.1
in % des Gesamttotals	65.2%	1.3%	1.1%	0.9%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	4.6%	0.4%	0.2%	7.4%	5.9%	12.8%	100.0%
Total Teilbereiche	3'161.4				10.7					240.0			1'204.0			4'616.1
in % des Gesamttotals	68.5%				0.2%					5.2%			26.1%			100.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

«0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «-» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt auch für alle folgenden Abbildungen.

Die Aufteilung auf die Krankheitsbilder in Abbildung 4-14 zeigt, dass 75% oder 3'448 Mio. CHF auf die verlorenen Lebensjahre zurückzuführen sind. Massgeblich trägt mit 872 Mio. (19%) auch das Krankheitsbild Demenz zu den Kosten bei. 5% der Kosten entfallen auf COPD. Die übrigen Krankheitsbilder liegen im Bereich von 0.5% (21 Mio. CHF – Lungenkrebs) oder darunter.

Betrachtet man die Aufteilung auf die Kostenbestandteile, fallen insbesondere die immateriellen Kosten auf, die insgesamt 81% der gesamten Kosten entsprechen, und deutlich tiefer die sonstigen medizinischen Kosten (12%). Auf die gesamten Produktionsausfälle entfallen nur rund 5% der gesamten Kosten. Die Spalkkosten (0.8%) und die Wiederbesetzungskosten (0.2%) sind relativ unbedeutend.

Die Prozentsätze in der letzten Spalte und letzten Zeile der Abbildung 4-14 gelten auch praktisch unverändert für den Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr. Wir verzichten deshalb im Folgenden darauf, diese Aufteilung auch für die weiteren Verkehrsträger darzustellen.

Abbildung 4-14: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung durch den gesamten Strassenverkehr 2021, nach Krankheitsbildern und Kostenbestandteilen

in Mio. CHF	Spitalkosten	Sonst. med. Kosten durch Inzidenzen	Produktionsausfall durch Hospitalisationen	Produktionsausfall durch Inzidenzen	Wiederbesetzungskosten	Immaterielle Kosten durch Hospitalisationen	Immaterielle Kosten durch Inzidenzen	Total	Anteil am Total
Verlorene Lebensjahre	-	-	-	157.54	6.71	-	3'284.59	3'448.8	74.7%
Herz-/Kreislaufkrankungen	5.01	-	1.41	-	-	1.80	-	8.2	0.2%
Atemwegserkrankungen	5.28	-	1.18	-	-	2.14	-	8.6	0.2%
COPD	-	21.10	-	2.05	-	-	209.29	232.4	5.0%
Lungenkrebs	8.13	1.64	2.45	5.60	-	3.39	-	21.2	0.5%
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	1.77	9.30	0.17	4.12	-	0.87	1.83	18.1	0.4%
Demenz	18.78	543.49	48.37	-	3.84	-	257.03	871.5	18.9%
Tage mit eingeschränkter Aktivität	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0%
Tage mit Erwerbsausfall	-	-	-	7.18	-	-	-	7.2	0.2%
Total	38.97	575.53	53.59	169.31	10.55	8.19	3'752.74	4'616.1	100.0%
Anteil am Gesamttotal	0.8%	12.5%	1.2%	3.7%	0.2%	0.2%	81.3%	100.0%	

Differenzierung nach Antriebsarten im Strassenverkehr

In der folgenden Abbildung wird die Aufteilung der Kosten nach Antriebsart dargestellt. Ausgehend von der oben erwähnten Beobachtung, dass im Strassenverkehr der Grossteil der Kosten auf Personenwagen, den Güterverkehr und Busse zurückzuführen ist, sind mit 97.5% auch mehrheitlich Fahrzeuge mit fossilem Antrieb für die Kosten verantwortlich (4'501 Mio. CHF). Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb tragen 77 Mio. CHF (1.7%) bei, die restlichen Fahrzeugantriebe 38 Mio. CHF (0.8%).

Abbildung 4-15: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung durch den gesamten Strassenverkehr 2021, nach Antriebsart und Fahrzeugkategorien

in Mio. CHF	Personenverkehr												Güterverkehr			Gesamt- total
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Fossil	2'945.6	59.9	50.7	43.1	-	-	-	-	-	204.7	-	-	338.1	269.9	588.5	4'500.6
Elektrisch	32.3	0.1	0.2	-	2.1	8.6	-	-	-	3.2	19.9	8.1	1.6	0.5	0.9	77.5
Rest	29.5	-	-	-	-	-	-	-	-	4.1	-	-	1.1	0.8	2.5	38.0
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	3'007.5	60.0	50.9	43.1	2.1	8.6	-	-	-	212.0	19.9	8.1	340.8	271.2	591.9	4'616.1
Anteil Fossil	97.9%	99.9%	99.7%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	96.6%	0.0%	0.0%	99.2%	99.5%	99.4%	97.5%
Anteil Elektrisch	1.1%	0.1%	0.3%	0.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.5%	100.0%	100.0%	0.5%	0.2%	0.2%	1.7%
Anteil Rest	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.9%	0.0%	0.0%	0.3%	0.3%	0.4%	0.8%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Differenzierung nach Kantonen

Bei der Aufteilung der Kosten auf die Kantone spielt vor allem die relative Grösse der Bevölkerung eine Rolle. Die Kostenanteile entsprechen in etwa den Bevölkerungsanteilen. Auf den Kanton Zürich, dessen Bevölkerungsanteil bei 17.9% am höchsten liegt, werden auch die meisten Kosten aufgeteilt: 735 Mio. CHF, oder 15.9%. Beim Kanton Bern, der mit 12.0% der zweithöchste Bevölkerungsanteil ausweist, entspricht der Kostenanteil 12.2% (oder 562 Mio. CHF) – ebenfalls der zweithöchste Wert. Auch bei den restlichen Kantonen mit einer tieferen Bevölkerungsanzahl bleiben die Anteile ähnlich. Der Kanton Uri verzeichnet aufgrund des vielen Durchgangsverkehrs jedoch einen um 87% höheren Anteil an den Luftbelastungskosten (0.79%) als der Bevölkerungsanteil (0.42%).

Abbildung 4-16: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung durch den gesamten Strassenverkehr 2021, aufgeteilt auf die Kantone

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
	in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li		LW	SS
Zürich	470.8	10.8	8.0	9.4	0.5	1.9	-	-	-		41.5	3.3	51.7	43.1	94.2	735.2
Bern	366.3	7.9	6.3	5.0	0.2	1.0	-	-	-		24.5	0.9	41.1	34.0	74.5	561.7
Luzern	161.1	3.6	2.8	1.8	0.1	0.4	-	-	-		14.2	-	17.0	17.7	38.8	257.5
Uri	19.4	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	-	-	-		1.6	-	2.1	4.0	8.5	36.6
Schwyz	69.4	1.1	1.2	0.5	0.0	0.1	-	-	-		3.8	-	7.3	4.8	10.5	98.8
Obwalden	11.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	-	-	-		0.5	-	1.4	0.8	1.8	16.3
Nidwalden	19.0	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	-	-	-		0.7	-	2.6	2.6	5.5	31.4
Glarus	15.8	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	-	-	-		0.9	-	2.5	2.0	4.4	26.6
Zug	42.3	0.6	0.7	0.6	0.0	0.1	-	-	-		4.4	-	4.8	2.4	5.2	61.2
Freiburg	109.6	2.0	1.9	1.4	0.1	0.3	-	-	-		5.9	-	10.8	9.6	21.0	162.6
Solothurn	97.0	3.0	1.7	1.2	0.1	0.2	-	-	-		7.3	0.0	11.6	14.5	31.7	168.4
Basel-Stadt	44.4	1.0	0.7	1.2	0.1	0.2	-	-	-		7.9	1.5	3.6	4.7	10.3	75.7
Basel-Landschaft	96.2	2.4	1.6	1.5	0.1	0.3	-	-	-		6.6	0.8	12.4	11.4	24.7	158.0
Schaffhausen	23.5	0.5	0.4	0.3	0.0	0.1	-	-	-		2.7	-	2.6	2.2	4.8	37.1
Appenzell A.Rh.	17.0	0.2	0.3	0.2	0.0	0.0	-	-	-		0.9	-	1.8	0.9	2.1	23.5
Appenzell I.Rh.	3.7	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-		0.1	-	0.4	0.2	0.5	5.1
St. Gallen	214.5	4.0	3.6	2.3	0.1	0.5	-	-	-		16.9	-	27.0	18.4	40.1	327.4
Graubünden	67.0	1.8	1.1	0.6	0.0	0.1	-	-	-		6.0	-	10.5	7.3	16.0	110.5
Aargau	269.6	5.6	4.6	2.9	0.1	0.6	-	-	-		18.1	-	31.3	29.3	63.9	426.0
Thurgau	97.7	2.0	1.7	1.0	0.1	0.2	-	-	-		4.3	-	9.7	9.3	20.4	146.5
Tessin	176.8	2.9	2.9	1.7	0.1	0.3	-	-	-		10.8	-	17.9	15.1	32.7	261.4
Waadt	300.4	4.2	4.8	4.4	0.2	0.9	-	-	-		16.0	0.4	34.8	19.0	41.3	426.5
Wallis	100.0	2.0	1.7	1.2	0.1	0.2	-	-	-		9.9	-	12.5	8.4	18.4	154.4
Neuenburg	58.7	0.7	1.0	0.8	0.0	0.1	-	-	-		4.4	0.1	6.7	2.9	6.4	81.8
Genf	131.3	1.3	2.4	4.1	0.2	0.8	-	-	-		20.3	1.2	14.6	4.8	10.6	191.6
Jura	24.8	0.4	0.4	0.2	0.0	0.0	-	-	-		1.3	-	2.0	1.6	3.6	34.4
Total	3'007.5	60.0	50.9	43.1	2.1	8.6	-	-	-		231.9	8.1	340.8	271.2	591.9	4'616.1

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Differenzierung nach Raumtypen

In der folgenden Abbildung werden die externen, durch Luftverschmutzung verursachten Gesundheitskosten auf drei Raumtypen aufgeteilt. Die 4.6 Mrd. CHF, die durch den Strassenverkehr an externen Kosten verursacht werden, fallen zu 55% (2.5 Mrd. CHF) in mitteldicht besiedelten Gebieten an. In dicht besiedelten Gebieten fällt knapp ein Viertel (24% oder 1.1 Mrd. CHF) und in gering besiedelten Gebieten gut einen Fünftel (21% oder 1.0 Mrd. CHF) der externen Kosten an.

Diese räumliche Aufteilung findet sich auch bei den einzelnen Verkehrsmitteln wieder. Im motorisierten privaten Verkehr sind die Anteile für mitteldicht besiedelte Gebiete nahe an den 55%. Im Güterverkehr fallen leicht mehr Kosten in mitteldichten Gebieten an (57%). Anders sind die Anteile bei Mofas, E-Bikes und Pedelecs, bei denen jeweils 45% in dicht und mitteldichten Gebieten anfallen, wobei deren externen Kosten in der Summe mit 54 Mio. CHF sehr tief sind. Da der öffentliche Verkehr in dicht besiedelten Gebieten stärker ausgeprägt ist, fallen dort auch grössere Anteile an (42% bei den Bussen, 96% bei den Trams). Dies geht vor allem zulasten des Anteils in den gering besiedelten Gebieten (12% bei den Bussen, 0% bei den Trams).

Abbildung 4-17: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Strassenverkehr 2021, nach Fahrzeugkategorien und Raumtypen

in Mio. CHF	Motorisierter privater Personenverkehr				Personenverkehr					Fuss- und Veloverkehr		Öffentlicher Personenverkehr		Güterverkehr			Gesamt- total
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS			
dicht besiedelt	717.8	12.9	12.4	19.5	1.0	3.9	-	-	-	96.3	7.8	79.4	52.5	114.7	1'118.2		
mitteldicht besiedelt	1'636.0	33.3	27.4	19.5	1.0	3.9	-	-	-	108.0	0.3	197.2	155.5	339.0	2'521.1		
gering besiedelt	653.6	13.7	11.1	4.1	0.2	0.8	-	-	-	27.6	-	64.2	63.2	138.3	976.8		
Total	3'007.5	60.0	50.9	43.1	2.1	8.6	-	-	-	231.9	8.1	340.8	271.2	591.9	4'616.1		
Anteil dicht besiedelt	23.9%	21.5%	24.3%	45.2%	45.2%	45.2%	0.0%	0.0%	0.0%	41.5%	96.1%	23.3%	19.4%	19.4%	24.2%		
Anteil mitteldicht besiedelt	54.4%	55.6%	53.9%	45.2%	45.2%	45.2%	0.0%	0.0%	0.0%	46.6%	3.9%	57.9%	57.3%	57.3%	54.6%		
Anteil gering besiedelt	21.7%	22.9%	21.7%	9.6%	9.6%	9.6%	0.0%	0.0%	0.0%	11.9%	0.0%	18.8%	23.3%	23.4%	21.2%		

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

c) Schienenverkehr

Die folgende Abbildung enthält die detaillierten Ergebnisse zum Schienenverkehr. Von den insgesamt 1'040 Mio. CHF entfallen 773 Mio. CHF (74%) auf die verlorenen Lebensjahre und 200 Mio. CHF (19%) auf Demenz. COPD ist mit 52 Mio. CHF für 5% der Kosten verantwortlich. Die restlichen Krankheitsbilder entsprechen jeweils weniger als 0.5% der gesamten Kosten.

Abbildung 4-18: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Schienenverkehr 2021 nach Krankheitsbildern

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Verlorene Lebensjahre		525.4	247.8	773.2
Herz-/Kreislaufkrankungen		1.3	0.6	1.8
Atemwegserkrankungen		1.3	0.6	1.9
COPD		35.7	16.9	52.5
Lungenkrebs		3.3	1.5	4.8
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)		2.8	1.3	4.1
Demenz		135.9	64.6	200.5
Tage mit eingeschränkter Aktivität		-	-	-
Tage mit Erwerbsausfall		1.0	0.5	1.4
Total		706.5	333.7	1'040.2

Differenzierung nach Kantonen

Beim Schienenverkehr folgt die Aufteilung der externen Kosten auf die Kantone nicht dem gewohnten Muster: Die Anteile pro Kanton weichen hier von den Bevölkerungsanteilen ab. Nicht Zürich, der bevölkerungsstärkste Kanton, sondern Bern verzeichnet mit 169 Mio. CHF die höchsten externen Kosten. Dies entspricht einem Anteil von 16.3% (der Bevölkerungsanteil ist bei 12.0%). Auf den Kanton Zürich, dessen Bevölkerungsanteil bei 17.9% liegt, fallen mit 155 Mio. CHF 14.9% Prozent der externen Kosten des Schienenverkehrs. Auf die Kantone Aargau und Waadt entfallen ebenfalls über 90 Mio. CHF externe Kosten (120, respektive 93 Mio. CHF). Auffallend ist wiederum der Kanton Uri, in dem aufgrund der Gotthardachse 1.4% der durch den Schienenverkehr verursachten Luftbelastungskosten entstehen (Bevölkerungsanteil ist mit 0.4% mehr als dreimal tiefer).

Abbildung 4-19: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Schienenverkehr 2021, aufgeteilt auf die Kantone

	in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich		129.9	25.4	155.3
Bern		116.2	53.2	169.4
Luzern		30.3	4.0	34.3
Uri		5.3	9.6	14.9
Schwyz		18.0	13.3	31.3
Obwalden		3.3	0.0	3.3
Nidwalden		2.5	0.0	2.6
Glarus		4.6	1.3	5.9
Zug		9.1	2.9	12.0
Freiburg		23.6	2.9	26.5
Solothurn		23.1	24.5	47.6
Basel-Stadt		6.7	4.3	11.0
Basel-Landschaft		18.7	15.2	33.9
Schaffhausen		6.9	0.3	7.2
Appenzell A.Rh.		4.9	0.0	4.9
Appenzell I.Rh.		1.8	-	1.8
St. Gallen		40.1	9.5	49.6
Graubünden		25.6	12.4	37.9
Aargau		59.6	60.1	119.7
Thurgau		24.0	6.0	30.0
Tessin		23.3	33.4	56.7
Waadt		66.6	26.4	93.0
Wallis		30.0	15.7	45.6
Neuenburg		14.8	10.1	24.9
Genf		11.7	3.0	14.7
Jura		6.2	0.4	6.6
Total		706.5	333.7	1'040.2

Differenzierung nach Raumtypen

Die insgesamt 1.0 Mrd. CHF externen Gesundheitskosten fallen zu 57% im mitteldicht besiedelten Gebiet an. In dicht und gering besiedelten Gebieten fallen je gut ein Fünftel der Gesundheitskosten an. Im Güterverkehr ist der Kostenanteil in dicht besiedelten Gebieten unterdurchschnittlich (13%), in mitteldicht besiedelten Gebieten dafür bei gut 63%.

Abbildung 4-20: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Schienenverkehr 2021, aufgeteilt nach Verkehrsart und Raumtypen

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
dicht besiedelt	173.3	42.3	215.6
mitteldicht besiedelt	384.03	211.30	595.3
gering besiedelt	149.2	80.1	229.3
Total	706.5	333.7	1'040.2
Anteil dicht besiedelt	24.5%	12.7%	20.7%
Anteil mitteldicht besiedelt	54.4%	63.3%	57.2%
Anteil gering besiedelt	21.1%	24.0%	22.0%

d) Luftverkehr

Im Luftverkehr entstehen insgesamt externe Kosten von 67 Mio. CHF, wobei der Grossteil (61 Mio. CHF oder 91%) auf den Personenverkehr zurückzuführen ist (vgl. folgende Abbildung). Die Aufteilung auf die Krankheitsbilder entspricht der letzten Spalte in Abbildung 4-21 bzw. Abbildung 4-14.

Abbildung 4-21: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Luftverkehr 2021 nach Krankheitsbild, Flughafentyp und Verkehrsmittel

in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Verlorene Lebensjahre	45.6	4.6	50.1
Herz-/Kreislauferkrankungen	0.1	0.0	0.1
Atemwegserkrankungen	0.1	0.0	0.1
COPD	2.9	0.3	3.2
Lungenkrebs	0.3	0.0	0.3
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	0.2	0.0	0.2
Demenz	11.3	1.1	12.4
Tage mit eingeschränkter Aktivität	-	-	-
Tage mit Erwerbsausfall	0.1	0.0	0.1
Total	60.6	6.1	66.6

in Mio. CHF	Landesflughäfen	Regionalflughäfen	Total
Linien- und Charterverkehr interkontinental	7.3	-	7.3
Linien- und Charterverkehr europäisch	51.1	0.0	51.1
Helikopter	0.0	0.1	0.1
Business Aviation	2.0	1.1	3.1
Rest General Aviation	1.3	3.7	5.1
Total	61.7	4.9	66.6

62 Mio. CHF oder 93% der Gesundheitskosten durch die Luftbelastung entstehen durch den Verkehr auf den Landesflughäfen und 5 Mio. CHF oder 7% durch den Verkehr auf den Regionalflughäfen. Werden die verschiedenen Flugfahrzeugkategorien betrachtet, so entfallen 58 Mio. CHF oder 88% auf den Linien- und Charterverkehr.

e) Schiffsverkehr

Im Schiffsverkehr werden die Kosten von insgesamt 215 Mio. CHF in etwa zu gleichen Teilen durch den Personen- und Güterverkehr verursacht: Auf den Personenverkehr entfallen 104 Mio. CHF Kosten (48%), auf den Güterverkehr 111 Mio. CHF (vgl. Abbildung 4-22). Die prozentuale Aufteilung auf die Krankheitsbilder entspricht der letzten Spalte in Abbildung 4-22 bzw. Abbildung 4-14. Die verlorenen Lebensjahre verursachen externe Kosten von 159 Mio. CHF, was 74% der Gesamtkosten entspricht. Durch Demenz entstehende Kosten tragen mit 42 Mio. CHF zu 19% der Kosten bei und COPD verursacht mit 11 Mio. CHF rund 5% der Kosten.

Abbildung 4-22: Externe Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Schiffsverkehr 2021, nach Krankheitsbild

	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
in Mio. CHF			
Verlorene Lebensjahre	76.9	82.5	159.4
Herz-/Kreislauferkrankungen	0.2	0.2	0.4
Atemwegserkrankungen	0.2	0.2	0.4
COPD	5.2	5.6	10.9
Lungenkrebs	0.5	0.5	1.0
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	0.4	0.4	0.8
Demenz	20.1	21.6	41.7
Tage mit eingeschränkter Aktivität	-	-	-
Tage mit Erwerbsausfall	0.1	0.1	0.3
Total	103.6	111.2	214.8

4.7.2 Soziale Kosten

Die sozialen Kosten sind mit den oben dargestellten externen Kosten identisch – mit einer Ausnahme: Im Luftverkehr gibt es aufgrund der emissionsabhängigen Landegebühren eine Internalisierung von 2.4 Mio. CHF (vgl. Kapitel 4.4.2b). Diese Internalisierung wurde vor der Darstellung der obigen Resultate für die externen Kosten abgezogen. Ohne diesen Abzug sind die sozialen Kosten also um 2.4 Mio. CHF höher. Die Ergebnisse für die sozialen Kosten der Luftbelastung des Strassen-, Schienen- und Schiffsverkehrs sind exakt identisch zu den oben dargestellten externen Kosten und werden nicht noch einmal wiederholt.

Die sozialen **Kosten der gesamten Luftbelastung** (inkl. Haushalte, Industrie etc.) betragen nach Abzug des Schwellenwertes von $7.26 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$ (vgl. Kapitel 4.3.2b) insgesamt **9.5 Mrd. CHF**.¹⁵¹

Luftverkehr

Die folgende Abbildung stellt die Aufteilung der sozialen Kosten nach Verkehrsart und pro Infrastrukturtyp und Verkehrsmittel dar. Wie bei den externen Kosten ist auch bei den sozialen Kosten der Personenverkehr für 91% der Kosten (63 Mio. CHF) verantwortlich. Zudem sind die Anteile bei der Aufteilung der Kosten zwischen Landes- und Regionalflughäfen ebenfalls fast identisch: 93% der Kosten (64 Mio. CHF) sind auf den Luftverkehr auf Landesflughäfen zurückzuführen. Die 2.4 Mio. CHF Unterschied zu den externen Kosten bewirken auch bei den absoluten Zahlen nur leicht höhere soziale Kosten.

Abbildung 4-23: Soziale Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung im Luftverkehr 2021 nach Krankheitsbild, Flughafentyp und Verkehrsmittel

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Verlorene Lebensjahre		47.2	4.7	51.9
Herz-/Kreislauferkrankungen		0.1	0.0	0.1
Atemwegserkrankungen		0.1	0.0	0.1
COPD		3.0	0.3	3.3
Lungenkrebs		0.3	0.0	0.3
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)		0.2	0.0	0.3
Demenz		11.7	1.2	12.8
Tage mit eingeschränkter Aktivität		-	-	-
Tage mit Erwerbsausfall		0.1	0.0	0.1
Total		62.7	6.3	69.0

	in Mio. CHF	Landesflughäfen	Regionalflughäfen	Total
Linien- und Charterverkehr interkontinental		7.6	-	7.6
Linien- und Charterverkehr europäisch		53.1	0.1	53.2
Helikopter		0.0	0.1	0.1
Business Aviation		2.0	1.1	3.1
Rest General Aviation		1.3	3.7	5.1
Total		64.1	4.9	69.0

¹⁵¹ Ohne Abzug des Schwellenwertes würden Kosten von 22.3 Mrd. CHF für die gesamte Luftbelastung resultieren. Der Anteil des Verkehrs an der Gesamtluftbelastung (27%) kann aus den auf die gleiche Weise, d.h. ohne Schwellenwert, berechneten Zahlen hergeleitet werden.

4.8 Sensitivitätsanalyse

4.8.1 Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten

Bei der Ermittlung der Gesundheitskosten der Luftverschmutzung müssen diverse Annahmen getroffen werden, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Im Folgenden werden die wesentlichen Unsicherheiten aufgelistet. Danach wird im anschliessenden Teilkapitel untersucht, wie sensitiv die Ergebnisse reagieren, wenn diese Annahmen verändert werden.

Wie in Kapitel 3.3 erläutert, verwenden wir bei Unsicherheiten wo möglich und sinnvoll eine best-mögliche Schätzung (best guess). Ansonsten beruht der Wert auf einer vorsichtigen Schätzung (at least Ansatz). Die folgende Abbildung zeigt die wesentlichen Unsicherheiten im Bereich der Gesundheitskosten der Luftbelastung:

- Fahrleistungen und Emissionen im Strassen- und Schienenverkehr werden als gesichertes Wissen betrachtet. Bei den Emissionen / Immissionen im Luft- und Schiffsverkehr verwenden wir einen best guess, wobei die bestehenden Unsicherheiten nicht genauer analysiert werden, da sie in den bisherigen Berechnungen kaum relevant waren (vgl. Kapitel 3.3.2).
- Die Umlegungen der Emissionen in Immissionen und die bevölkerungsgewichtete Mittelung ist mit einer sehr geringen Unsicherheit behaftet und wird deshalb im Weiteren vernachlässigt.

Abbildung 4-24: Übersicht über Inputdaten, Annahmen und Bandbreiten bei den Gesundheitskosten der Luftbelastung

Bereich / Annahme	Wissenstand (vgl. Kapitel 3.3.1)	Vorgehen in Basis- berechnung	Bandbreite Sensitivitäts- analyse
Emissionen / Immissionen			
Fahrleistungen pro Fahrzeugtyp	Gesichertes Wissen	Datenauswertung	
Emissionen / Immissionen Luft- und Schiffsverkehr	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	
Bevölkerungsgewichtete Immissionen Strasse, Schiene	Gesichertes Wissen	best guess	
Belastungs-Wirkungs-Beziehungen			
Langzeitmortalität	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-49% / +50%
Säuglingssterblichkeit	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-100% / +175%
Herz-/Kreislauferkrankungen	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-89% / +89%
Atemwegserkrankungen	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-100% / +110%
COPD	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-65% / +74%
Lungenkrebs	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-62% / +80%
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-100% / +205%
Demenz	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-63% / +372%
Tage mit eingeschränkter Aktivität	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-41% / +42%
Tage mit Erwerbsausfall	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-100% / +110%
Wertgerüst			
Immaterielle Kosten bei verlorenen Lebensjahren	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	±50%
Übriges Wertgerüst	Wissen mit Unsicherheiten	best guess (teilweise at least)	

- Bei den Belastungs-Wirkungs-Beziehungen bezüglich Todes- und Krankheitsfällen werden die 95%-Konfidenzintervalle der Schätzungen verwendet. Die Unsicherheit der Langzeitmortalität bei Erwachsenen beträgt -49% / +50%. Die Säuglingssterblichkeit ist mit grösseren Unsicherheiten behaftet (-100% / +175%). Bei den Belastungs-Wirkungs-Beziehungen für Krankheitsfälle schwanken die Unsicherheitsbereiche zwischen -41% / +42% (Tage mit eingeschränkter Aktivität) und -63 / +372% (Demenz). Teilweise wird die untere Sensitivität auf -100% beschränkt, da positive Effekte der Luftbelastung auf die Gesundheit als nicht plausibel angesehen werden. In der Sensitivität werden alle Belastungs-Wirkungs-Beziehungen gleichzeitig auf das untere bzw. das obere 95%-Konfidenzintervall gesetzt. Anzumerken ist, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass man sich bei allen Belastungs-Wirkungs-Beziehungen gleichzeitig deutlich überschätzt hat. Das im Folgenden dargestellte Intervall ist damit tendenziell zu gross.
- Wie in Kapitel 20.5.5 erwähnt, gehen wir beim Kostensatz für die verlorenen Lebensjahre von einer Unsicherheit von $\pm 50\%$ aus. Bei den übrigen Kostensätzen (vgl. Abbildung 4-9) verwenden wir meist die bestmögliche Schätzung, müssen teilweise aber at least-Annahmen einsetzen. Auf eine Berechnung einer Sensitivität wird verzichtet, da eine Sensitivitätsanalyse für die immateriellen Kostensätze der Krankheitsfälle gezeigt hat, dass das Ergebnis für 2015 nur um -6% und +7% schwankt.¹⁵²

4.8.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die folgenden beiden Abbildungen stellen dar, wie sich die externen Kosten verändern, wenn die Annahmen in Abbildung 4-24 geändert werden:

- Werden alle Annahmen zu den Effektschätzern nach unten bzw. oben angepasst, schwanken die externen Kosten des Strassenverkehrs um -49% / +67%. Bei den weiteren Verkehrsträgern sind die Schwankungen ähnlich. Beim Luftverkehr ist die Abweichung aufgrund der Internalisierung etwas ausgeprägter, die absoluten Kosten sind jedoch auf einem tieferen Niveau. Allerdings ist nochmals darauf hinzuweisen, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass alle Belastungs-Wirkungs-Beziehungen deutlich unter- oder überschätzt wurden.
- Etwas geringere Schwankungen sind auch beim VOSL (Value of Statistical Life) festzustellen. Eine Erhöhung des Kostensatzes um 50% ergibt bei allen Verkehrsträgern eine Kostenzunahme von rund 36%. Der Effekt ist symmetrisch: Wird der Kostensatz um 50% reduziert, nehmen die externen Kosten im gleichen Ausmass (um 36%) ab.

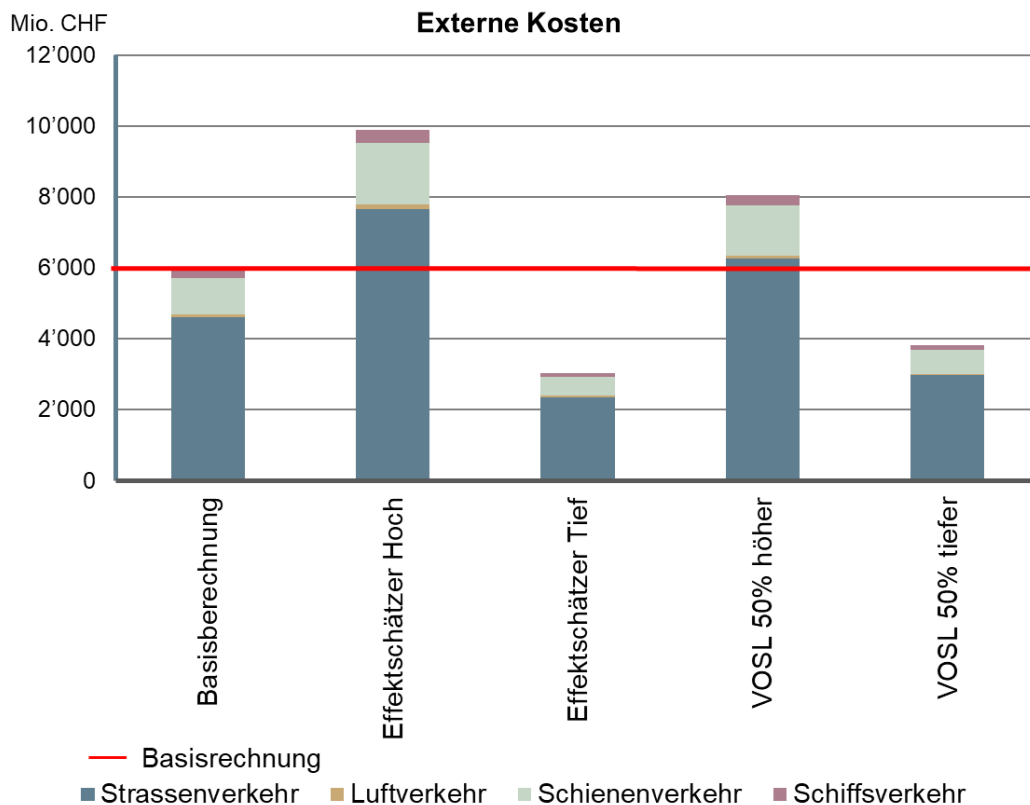
Die Ergebnisse sind bei den sozialen Kosten fast identisch, da diese bei den durch Luftverschmutzung bedingten Gesundheitskosten nur marginal von den externen Kosten abweichen. Auf eine separate Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für soziale Kosten wird deshalb verzichtet.

¹⁵² Zudem wird aus Aufwandgründen auf die bisher durchgeführte Sensitivität mit der alternativen Berechnung über die Zahl der frühzeitigen Todesfälle und den VOSL (anstatt über die Zahl der verlorenen Lebensjahre und den VLYL) verzichtet. Es ist davon auszugehen, dass diese Sensitivität eine ähnliche Auswirkung hat wie früher (+144%, INFRAS; Ecoplan (2019)).

Abbildung 4-25: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die externen Gesundheitskosten der verkehrsbedingten Luftverschmutzung 2021

in Mio. CHF	Strassenverkehr	Schienenverkehr	Luftverkehr	Schiffsverkehr	Total
Basisberechnung	4'616.1	1'040.2	66.6	214.8	5'937.7
Effektschätzer Hoch	7'665.8	1'751.4	113.8	363.5	9'894.5
Effektschätzer Tief	2'359.6	529.7	32.8	109.2	3'031.3
VOSL 50% höher	6'258.4	1'408.4	91.4	290.7	8'048.9
VOSL 50% tiefer	2'973.8	672.1	41.9	138.9	3'826.6
Abweichung von Basisrechnung in %					
Effektschätzer Hoch	66%	68%	71%	69%	67%
Effektschätzer Tief	-49%	-49%	-51%	-49%	-49%
VOSL 50% höher	36%	35%	37%	35%	36%
VOSL 50% tiefer	-36%	-35%	-37%	-35%	-36%
Absolute Abweichung von Basisrechnung					
Effektschätzer Hoch	3'049.8	711.2	47.2	148.7	3'956.8
Effektschätzer Tief	-2'256.5	-510.5	-33.9	-105.6	-2'906.4
VOSL 50% höher	1'642.3	368.2	24.7	75.9	2'111.1
VOSL 50% tiefer	-1'642.3	-368.2	-24.7	-75.9	-2'111.1

Abbildung 4-26: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die externen Gesundheitskosten der verkehrsbedingten Luftverschmutzung 2021



4.8.3 Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen

Die Gesundheitskosten der Luftverschmutzung wurden wo möglich und sinnvoll nach «best guess» und sonst nach dem at least Ansatz bestimmt. Entsprechend wurden verschiedene Annahmen getroffen, die tendenziell zu einer Unterschätzung der Kosten führen. Gesamthaft ist davon auszugehen, dass die tatsächlichen **Gesundheitskosten der Luftverschmutzung höher liegen als hier ausgewiesen**. Dies gilt nicht nur für die Basisrechnung, sondern auch für die Intervalle der Sensitivitätsanalyse. Folgende Gründe sprechen für diese Einschätzung:

Mengengerüst Luftverkehr

- Die gesundheitsschädigenden **Schadstoffimmissionen** des Luftverkehrs dürften aus mehreren Gründen unterschätzt werden.¹⁵³

Abschätzung der Gesundheitsfolgen

- Es werden nur die gesundheitlichen Auswirkungen durch den Leitschadstoff PM₁₀ berücksichtigt. Gesundheitseffekte durch andere Schadstoffe, die unabhängig von PM₁₀ auftreten (z.B. NO₂ und Ozon) werden vernachlässigt.
- Es gibt Hinweise, dass die **Emissionen des Verkehrs toxischer** sein könnten als andere Luftschadstoffe. Für die Berechnung werden jedoch alle Emissionen im gleichen ungewichteten Ausmass berücksichtigt. Damit wird der Anteil des Strassenverkehrs an den Kosten tendenziell unterschätzt.
- Verschiedene Gesundheitsbeeinträchtigungen durch Luftschadstoffe werden nicht berücksichtigt.** Dazu gehören zum Beispiel niedriges Geburtsgewicht, Atemwegssymptome wie Asthma, Selbstmedikation und Vermeidungsverhalten. Für diese Auswirkungen gibt es zwar durchaus Evidenz, dass sie durch Luftschadstoffe beeinflusst werden. Die Monetisierung (z.B. Folgen von niedrigem Geburtsgewicht, Selbstmedikation, Vermeidungsverhalten) wäre jedoch anspruchsvoll. So werden auch die Folgen von Asthma nicht miteinbezogen, deren immaterielle Kosten sich für die gesamte Luftbelastung auf ca. 470 Mio. CHF oder ca. 5% der Kosten der Luftbelastung belaufen dürften (vgl. Box in Kapitel 4.3.2c).

¹⁵³ Folgende Gründe führen zu einer Unterschätzung:

- Emissionen in grosser Höhe (über 900m) werden in den Berechnungen vernachlässigt, weil diese Emissionen meist über der atmosphärischen Grundsicht emittiert werden und deshalb davon ausgegangen wird, dass diese Emissionen nicht auf die Erde zurückfallen. Wie im Bericht zum Luftverkehr (INFRAS; Ecoplan (2012b), Kapitel 6.3.1) gezeigt, gibt es jedoch Forschungsergebnisse, die dies bestreiten. Sind diese Forschungsergebnisse korrekt, dürften sich die Gesundheitskosten der Luftbelastung im Luftverkehr etwa verdreifachen. Dies ist insofern nicht überraschend als der Grossteil der Emissionen im Flugverkehr in grosser Höhe ausgestossen wird. Da es jedoch noch keinen wissenschaftlichen Konsens über die Auswirkungen der Emissionen in grosser Höhe bezüglich Luftverschmutzung am Boden gibt, werden diese Kosten gemäss dem at least Ansatz nicht berücksichtigt.
- Wie in INFRAS; Meteotest (2020b) erläutert, werden bei den Triebwerksemissionen nur die Emissionen bis zu einer Abbruchhöhe von 300m berücksichtigt. Detaillierte Ausbreitungsrechnungen und Messungen zeigen, dass Emissionen, welche über 300m über Grund ausgestossen werden, auf dem Boden praktisch nicht messbar sind. Allfällige Schäden durch Emissionen zwischen 300m und 900m über Boden sind also ebenfalls nicht enthalten.
- Die Emissionen des Flughafens Basel und der Regionalflughäfen sind im Schadstoffausbreitungsmodell nicht enthalten, so dass die Immissionen etwas zu tief liegen.

- Es werden nur Spitaleinweisungen berücksichtigt, bei denen die Hauptdiagnose einem der fünf betrachteten Krankheitsbilder¹⁵⁴ entspricht. Hospitalisationen, in denen die **Nebendiagnose** einem der fünf Krankheitsbilder entspricht werden folglich vernachlässigt. Dies führt insbesondere bei der Demenz zu einer Unterschätzung.
- Bei der Berechnung der verlorenen Lebensjahre wird nicht berücksichtigt, dass die **Lebenserwartung** der Bevölkerung in Zukunft weiter zunehmen könnte.

Bewertung der Gesundheitsfolgen

- Bei den Herz- / Kreislauferkrankungen werden nur die Kosten durch Hospitalisationen berücksichtigt. Weitere Krankheitskosten ausserhalb von Spitalaufenthalten (Pflegekosten, Arztkosten, Medikamentenkonsum, Produktionsausfälle (ohne Spitalaufenthalt), immaterielle Kosten der Krankheit) werden vernachlässigt.
- Die **administrativen Kosten** der Gesundheitsschäden werden nicht miteinbezogen, dürften aber weniger als 0.5% der Kosten ausmachen.¹⁵⁵
- Auch die **Vermeidungskosten** werden vernachlässigt, dürften aber ebenfalls klein sein (vgl. Kapitel 20.5.1).
- Bei der Bestimmung der **Kostensätze** wurden gemäss dem at least Ansatz ebenfalls **vorsichtige Werte** verwendet bzw. teilweise fehlen Datengrundlagen, die eine Bewertung erlauben würden.¹⁵⁶

4.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen, dass die gesamten externen Kosten der Luftbelastung für das Jahr 2021 mit den neuen Berechnungen von 3.3 auf 5.9 Mrd. CHF steigen (Zunahme um 79%). Im Strassenverkehr fallen sie neu um 62% höher aus wie bisher (4.60 statt 2.85 Mrd. CHF),

¹⁵⁴ Herz- / Kreislauferkrankungen, Atemwegserkrankungen, Lungenkrebs, Diabetes und Demenz.

¹⁵⁵ Ecoplan (1996), S. 71–74

¹⁵⁶ Dies zeigt sich z.B. in folgenden Annahmen, die sowohl in den Bereichen Luft- und Lärmbelastung als auch bei den Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr gelten (vgl. Anhang A, Kapitel 20.4):

- Demenzerkrankungen, die nicht zu Spitaleintritten führen, können zu Produktionsausfällen führen, indem – insbesondere in einem früheren Stadium – die Leistungsfähigkeit der betroffenen abnimmt oder – z.B. in einem späteren Stadium – eine Frühpensionierung gewählt wird oder auf eine Beschäftigung über das Pensionsalter hinaus verzichtet wird. Mangels Datengrundlagen müssen solche Effekte vernachlässigt werden.
- Bei der Demenz wurde durch das ARE ein besonders vorsichtiger Wert für die sonstigen medizinischen Kosten gewählt.
- Bei den immateriellen Kosten pro Hospitalisation wird ein vorsichtiger Wert verwendet, der eher zu tief liegen dürfte.
- Die Abschätzung der Ausfalltage über das amerikanische "Official Disability Guideline" dürfte die Ausfalltage tendenziell unterschätzen, weil in den USA mit weniger guten Sozialversicherungen der Druck, wieder zu arbeiten, gemäss einer grösseren Krankenkasse höher sei als in der Schweiz.
- Entsprechend dem at least Ansatz wird nicht berücksichtigt, dass die Arbeitsproduktivität vor oder nach der Arbeitsabwesenheit kleiner sein könnte.
- Bei den frühzeitigen Todesfällen werden keine medizinischen Behandlungskosten berücksichtigt (soweit sie nicht in den Spitalkosten enthalten sind). Zudem werden die Bestattungskosten vernachlässigt.
- Mangels Datengrundlagen musste darauf verzichtet werden, medizinische Heilungskosten für die Tage mit eingeschränkter Aktivität zu berechnen.

im Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr ist die neue Schätzung um je ca. 190% höher als bisher (Schienenverkehr 1.04 statt 0.37 Mrd. CHF, Luftverkehr 67 statt 23 Mio. CHF und Schiffsverkehr 215 statt 73 Mio. CHF).

Die Unterschiede zwischen den Verkehrsträgern (und zwischen dem Personen- und Güterverkehr) sind alle auf die veränderten **Immissionen** zurückzuführen: Im Strassenverkehr nehmen die Immissionen gegenüber den bisherigen Berechnungen um 18% ab, bei den anderen drei Verkehrsträgern jedoch um je ca. 45% zu. Rund 40% der Immissionen sind nicht primäres PM₁₀, sondern sekundäres PM₁₀, das aus NO_x, NH₃, SO_x und VOC-Emissionen entsteht. Das sekundäre PM₁₀ wurde bei der Pollumap-Aktualisierung sehr viel detaillierter modelliert als dies in früheren Versionen der Fall war. Daher ist der Unterschied zu den früheren Datengrundlagen hauptsächlich auf die Weiterentwicklung des Modells zurückzuführen.

Abbildung 4-27: Vergleich zu den bisherigen Berechnungen: Externe Gesundheitskosten der Luftbelastung in Mio. CHF.

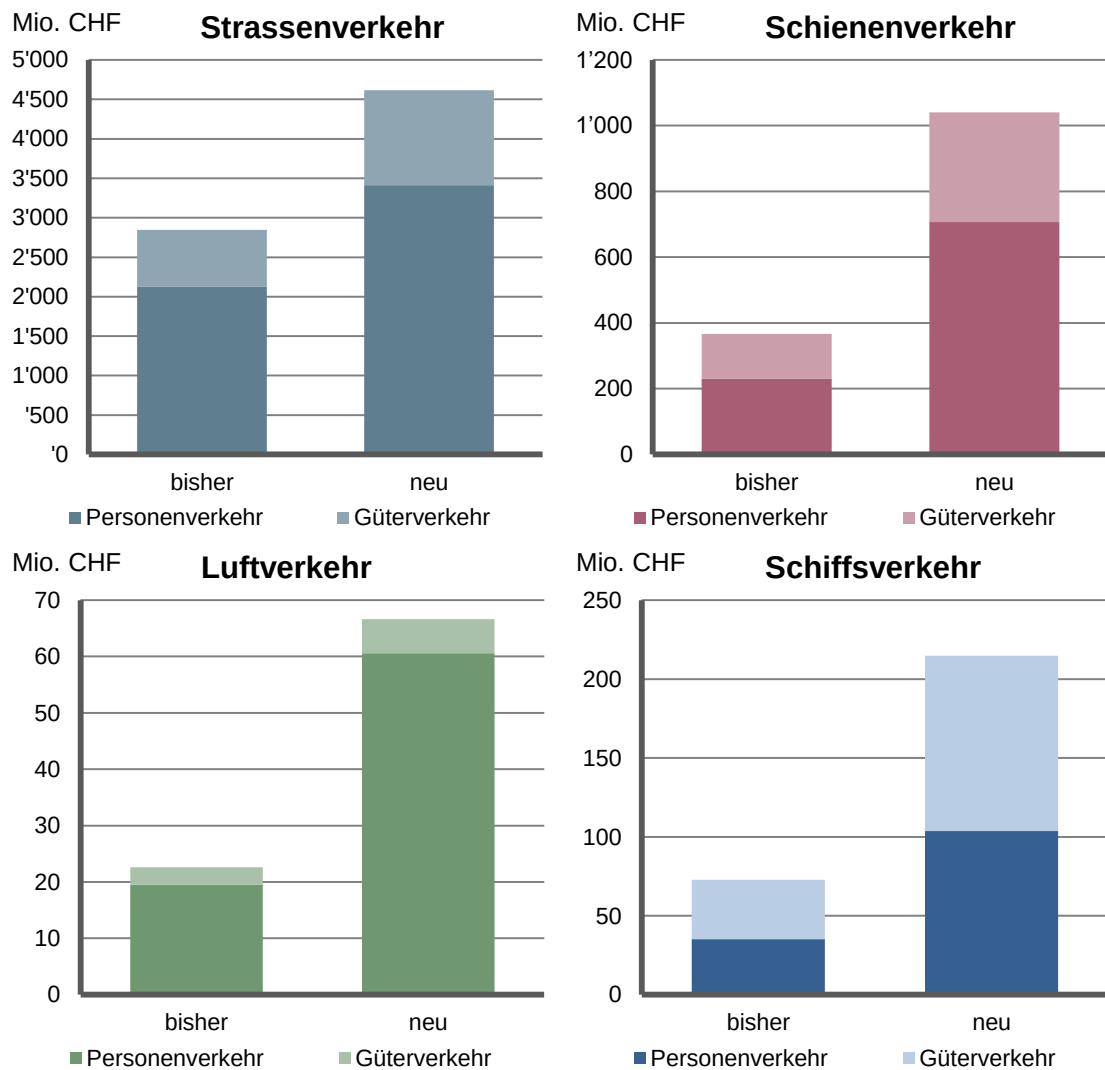
Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	2'124.01	722.88	2'846.9
Schienenverkehr	230.6	136.4	366.9
Luftverkehr	19.5	3.1	22.6
Schiffsverkehr	35.1	37.7	72.9
Total	2'409.2	900.1	3'309.3
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	3'412.1	1'204.0	4'616.1
Schienenverkehr	706.5	333.7	1'040.2
Luftverkehr	60.6	6.1	66.6
Schiffsverkehr	103.6	111.2	214.8
Total	4'282.8	1'654.9	5'937.7
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	60.6%	66.6%	62.1%
Schienenverkehr	206.4%	144.7%	183.5%
Luftverkehr	210.5%	96.6%	195.0%
Schiffsverkehr	194.8%	194.9%	194.8%
Total	77.8%	83.9%	79.4%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	1'288.1	481.1	1'769.2
Schienenverkehr	476.0	197.3	673.3
Luftverkehr	41.1	3.0	44.1
Schiffsverkehr	68.5	73.5	141.9
Total	1'873.6	754.9	2'628.5

Die allgemeine Zunahme ist auf folgende Gründe zurückzuführen:

- Bei den Folgen von Todesfällen liegt die **Belastungs-Wirkungs-Beziehung** für Todesfälle bei Erwachsenen aufgrund neuer Studienergebnisse 78% höher (während die Kostensätze pro verlorenes Lebensjahr bzw. Erwerbsjahr fast unverändert sind). Damit erhöhen sich die Kosten durch verlorene Lebens- und Erwerbsjahre im Strassenverkehr von bisher 2.4 auf neu 3.4 Mrd. CHF.
- Es werden **drei neue Krankheitsbilder** miteinbezogen, bei denen bisher noch nicht genügend wissenschaftliche Grundlagen vorlagen, um einen Zusammenhang bestätigen zu können, nämlich **Demenz, Lungenkrebs und Diabetes**. Während Lungenkrebs und Diabetes nur 0.5% bzw. 0.4% der gesamten Kosten ausmachen, führt die **Demenz** zu einer deutlichen Erhöhung der Kosten: Sie macht 19% der neu berechneten Kosten aus, im Strassenverkehr sind dies 872 Mio. CHF. Dies ist einerseits auf den starken Zusammenhang zwischen der Luftbelastung und der Zunahme der Demenz (hohe Belastungs-Wirkungs-Beziehung) zurückzuführen und andererseits auf die hohen Pflegekosten für demenzkranke Personen (Heim- und Spitexkosten sowie informelle Pflege).
- Zudem wurde Bronchitis durch das breitere Krankheitsbild **COPD** ersetzt. COPD hat eine ca. doppelt so starke Belastungs-Wirkungs-Beziehung wie Bronchitis bisher. Die Kostensätze für COPD sind aber nur ca. 4% höher als die bisherigen Kostensätze für Bronchitis (aufgrund höherer medizinischer Kosten). Damit werden die Kosten der Bronchitis (gut 120 Mio. CHF) ersetzt durch diejenigen von COPD (gut 230 Mio. CHF).
- Die Kosten von Tagen mit eingeschränkter Aktivität bzw. Tage mit Erwerbsausfall nehmen im Strassenverkehr von 295 auf 7 Mio. CHF ab. Dies obwohl bei den Tagen mit Erwerbsausfall eine neue, separate und um 44% höhere Belastungs-Wirkungs-Beziehung verwendet wird. Grund dafür ist, dass bei diesen beiden Krankheitsbildern die Kosten der anderen berücksichtigten Krankheitsbilder abgezogen werden, um Doppelzählungen zu vermeiden (vgl. Kapitel 20.5.3b) und 20.5.6b): So werden für die Tage mit eingeschränkter Aktivität für den Strassenverkehr zuerst immaterielle Kosten von 281 Mio. CHF und Produktionsausfälle von 51 Mio. CHF berechnet. Davon werden aber die immateriellen Kosten bzw. die Produktionsausfälle aller anderen Krankheitsbilder abgezogen. Dabei zeigt sich, dass die immateriellen Kosten der anderen Krankheitsbilder höher sind als die hier berechneten immateriellen Kosten für Tage mit eingeschränkter Aktivität, so dass keine immateriellen Kosten mehr ausgewiesen werden. Beim Produktionsausfall hingegen verbleiben Kosten von 7 Mio. CHF (im Strassenverkehr). Die Reduktionen bei den Tagen mit eingeschränkter Aktivität und bei den Tagen mit Erwerbsausfall gegenüber bisher sind also darauf zurückzuführen, dass neu mehr Krankheitsbilder berücksichtigt werden und spezifisch ausgewiesen werden können.

Schliesslich bleiben Herz- / Kreislauferkrankungen und Atemwegserkrankungen in einer ähnlichen Grössenordnung wie bisher (je knapp 10 Mio. CHF im Strassenverkehr). Die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen sind leicht tiefer. Dafür sind die Kostensätze (insbesondere Spitalkosten) etwas höher.

Abbildung 4-28: Vergleich zu den bisherigen Berechnungen: Externe Gesundheitskosten der Luftbelastung



Achtung: Die Skalen der vier Verkehrsträger sind unterschiedlich

5 Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung

5.1 Berechnungsgegenstand

Luftschadstoffemissionen des Verkehrs verursachen neben den Gesundheitskosten (vgl. Kapitel 4) auch Kosten aufgrund von Gebäudeschäden.¹⁵⁷ Die verkehrsbedingten Gebäudeschäden sind demnach ein Teil der gesamten Wirkung der Luftverschmutzung des Verkehrs.

Den Gebäudeschäden liegt eine komplexe Wirkungskette zugrunde. Die vom Verkehr ausgestossenen Emissionen (Luftschadstoffe) werden meistens zuerst in der Atmosphäre umgewandelt (Transmission), ehe sie als Immissionen auf eine Gebäudefassade einwirken. Durch diese Immissionen entstehen Schäden an den Materialien der Gebäudehülle.

Berechnungsgegenstand sind die Mehrkosten durch solche Materialschäden in verkehrsexponierten Gebieten sowie in nicht verkehrsexponierten Gebieten innerhalb von Metropolitanräumen (Hintergrundbelastung). Die Gebäudeschäden umfassen demnach die zusätzlichen Kosten, welche anfallen, wenn Fassaden (an verkehrsexponierten Örtlichkeiten) häufiger gereinigt oder renoviert werden müssen bzw. wenn sich die Lebensdauer der Fassade (an nicht verkehrsexponierten Lagen innerhalb von Metropolitanräumen) aufgrund der Hintergrundbelastung verkürzt.

5.2 Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen

Die verkehrsbedingten Gebäudekosten haben in der internationalen Forschung eine untergeordnete Bedeutung. Es existieren nur wenige verlässliche Studien, die quantitative Belastungs-Wirkungs-Beziehungen zu den Gebäude- und Materialschäden in Abhängigkeit der Luftschadstoffemissionen bzw. -immissionen herleiten. Des Weiteren gibt es nur wenig konkrete Empfehlungen zu Kostensätzen für Gebäude- und Materialschäden infolge von Luftverschmutzung. So werden in der Methodenkonvention 3.1 des Umweltbundesamtes¹⁵⁸ die Kostensätze aus der NEEDS-Studie¹⁵⁹ aufdatiert.

Studien, welche sich auf Gebäude- und Materialschäden beziehen, konzentrieren sich meist auf die Belastungs-Wirkungs-Beziehung von Schadstoffen auf unterschiedliche Materialien, also z.B. auf die Folgen der Einwirkung von Schwefeldioxid auf Aluminium-Oberflächen. Hingegen fehlen konkrete Angaben, um solche Zustandsänderungen zu monetarisieren.¹⁶⁰ Im vorliegenden Projekt übernehmen wir für die Gebäudeschäden deshalb die bestehende, in der Schweiz bereits angewandte Methodik und datieren das Mengen- und Wertgerüst auf.

Die Kosten werden wie bisher über drei Berechnungsansätze ermittelt:

¹⁵⁷ Darüber hinaus sind die Ernteaussfälle, die Waldschäden und die Biodiversitätsverluste zu erwähnen. Diese Kostenkategorien werden in den Kapiteln 6, 7 und 8 separat betrachtet.

¹⁵⁸ UBA (2020)

¹⁵⁹ NEEDS (2008)

¹⁶⁰ Vgl. z.B. Brimblecombe; Grossi (2010) und Christodoulakis; Tzanis; Varotsos; u. a. (2017)

- Kosten für durchgeführte Renovationen an **verkehrsexponierten** Standorten (**Renovationskosten**).
- Kosten aufgrund der Verschlechterung des Fassadenzustandes ohne direkte Renovationsfolge an **nicht verkehrsexponierten** Standorten in Metropolitanräumen. An nicht verkehrsexponierten Standorten entstehen die Kosten durch die Hintergrundbelastung, da sich PM₁₀-Emissionen flächig ausbreiten (**Kosten durch verkürzte Lebensdauer**).
- Kosten aufgrund erhöhten Reinigungsaufwands von Büro- und Gewerberäumlichkeiten an **verkehrsexponierten** Standorten (**Reinigungskosten**).

Abbildung 5-1 zeigt die Bewertungsmethodik bzw. das Vorgehen in der Übersicht. Analog zu den bisherigen Studien¹⁶¹ dienen die PM₁₀-Emissionen als Leitschadstoff. Daraus wird wiederum die PM₁₀-Konzentration (Immissionen) abgeleitet. Als weitere Inputquelle im Schritt 1 wird auf Daten der Gebäudedatenbank von Wüest & Partner zurückgegriffen. Daraus gehen Fassadenflächen differenziert nach Fassadentyp und Gebäudenutzung hervor, welche gemäss der Grundlagenstufe zusätzlich nach acht Agglomerationstypen¹⁶² unterschieden werden.¹⁶³

Für die Schritte 2–4 werden für jeden Berechnungsansatz separate Kostensätze herangezogen. Die Berechnungsmethode anhand dieser Inputdaten basiert auf der Grundlagenstudie aus dem Jahr 2004¹⁶⁴ und wird immer noch als adäquat eingeschätzt. Insbesondere für die Schritte 2 bzw. 3 werden daraus die folgenden, empirisch hergeleiteten Grundsätze übernommen:

- Gebäudebewirtschaftungsmodell und die daraus resultierenden Renovationszyklen: Dabei wird insbesondere die um 0.5% höhere Renovationstätigkeit an verkehrsexponierten Standorten (PM₁₀-Immissionen > 20 µg/m³) verwendet.
- Empirischer Zusammenhang von PM₁₀-Immissionen und Fassadenzustand¹⁶⁵ für die Bestimmung der verkürzten Lebensdauer einer Fassade an nicht verkehrsexponierten Standorten in Metropolitanräumen: Die bisher angenommene durchschnittliche Fassadenlebensdauer von 45 Jahren¹⁶⁶ wird aufgrund verschiedener Quellen auf 40 Jahre gekürzt.¹⁶⁷ Es kommt weiterhin das folgende Schätzmodell zur Bestimmung der verkürzten Lebensdauer zur Anwendung:
 - Fassadenzustand = $\alpha \cdot (\text{Gebäudealter} \cdot \text{PM}_{10}\text{-Immissionen} [\mu\text{g} / \text{m}^3]) + \epsilon$,
 - wobei $\alpha = -3.3 \cdot 10^{-3}$ und $\epsilon = 4.8$ gilt

¹⁶¹ Ecoplan; INFRAS (2008); INFRAS; Ecoplan (2019); INFRAS; Wüest & Partner (2004)

¹⁶² Metropole, Agglomerationen von Metropolen, Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen, Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanräumen, Kerngemeinden, Agglomeration ausserhalb Metropolitanräumen, Einzelstädte, Land

¹⁶³ Die Definitionen stützen sich auf die folgende Publikation: Schuler; Dessemontet; Joye (2005)

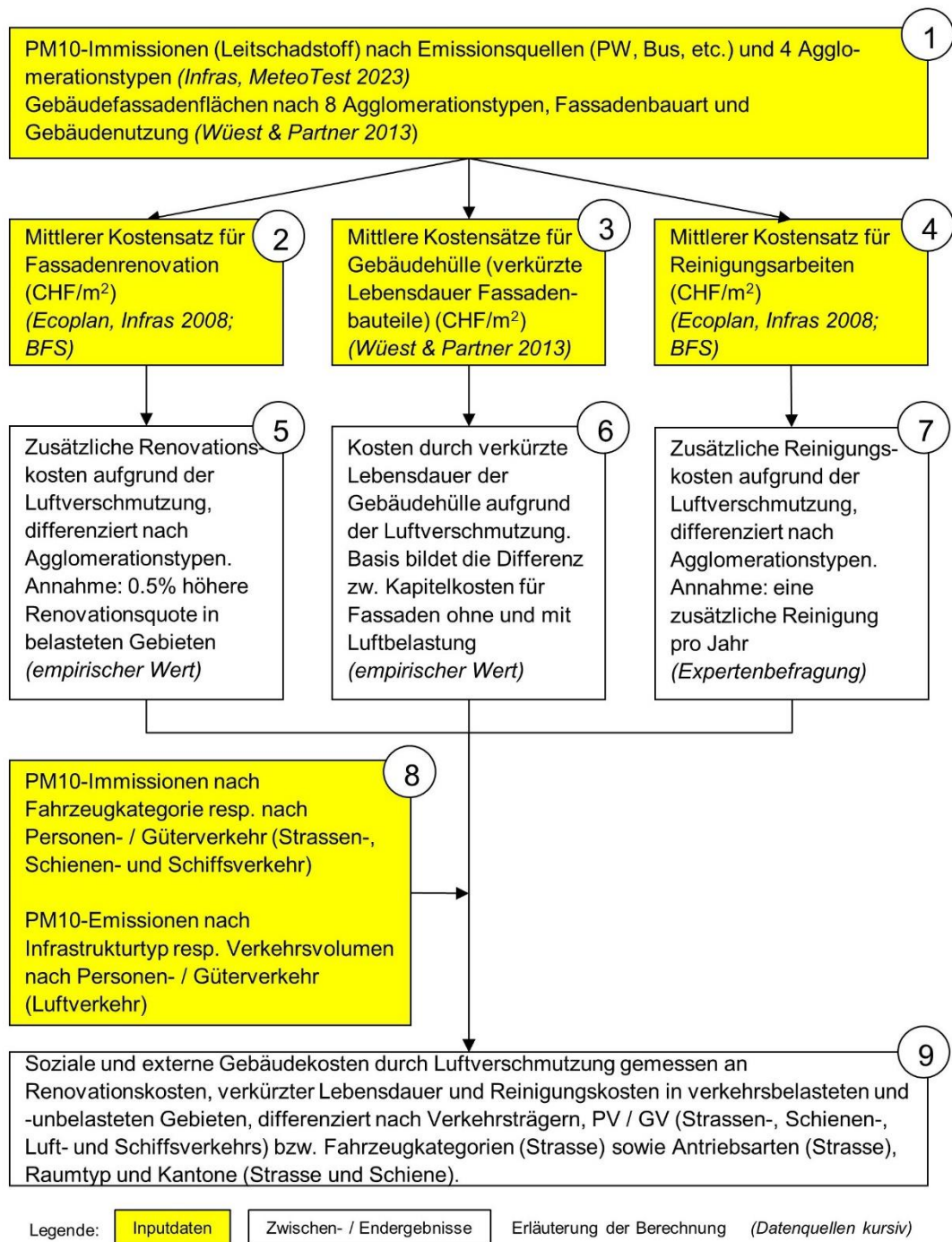
¹⁶⁴ INFRAS; Wüest & Partner (2004)

¹⁶⁵ Die Beurteilung des Fassadenzustands erfolgt auf einer 9-stufigen Skala: 5 sehr gut, 4.5 sehr gut/gut, 4 gut, 3.5 gut/mittel, 3 mittel, 2.5 mittel/mangelhaft, 2 mangelhaft, 1.5 mangelhaft/kritisch, 1 kritisch. Bei einem Fassadenzustand von 2.5 und tiefer beurteilen die Expertinnen und Experten von Wüest & Partner eine Fassadenrenovation als notwendig.

¹⁶⁶ Ecoplan; INFRAS (2008)

¹⁶⁷ Basierend auf SIA (2020) liegt die Lebensdauer von Fassaden bei 30–40 Jahren; gemäss Angaben der Mobiliar (2022) und Credit Suisse (2017) liegt die Lebensdauer von Fassaden zwischen 30 und 50 Jahren.

Abbildung 5-1: Bewertungsmethodik Gebäudeschäden



- Bei einer bestimmten PM10-Immissionssituation wird der Fassadenzustand 2.5 erreicht, der von den Expertinnen und Experten der Grundlagenstudie als relevanter Zustand für eine notwendige Fassadenrenovation angesehen wird.
- Die Anteile der verkehrsexponierten Gebäudeflächen pro Raumtyp wurden aus der Grundlagenstudie übernommen. Als Grundlage für die Unterscheidung zwischen verkehrsexponierten

und nicht verkehrsexponierten Gebieten diene die Arealstatistik sowie die PM₁₀-Immissionen (> 20 µg/m³) bzw. -Emissionen gemäss der Grundlagenstudie.¹⁶⁸

Die Summe der resultierenden Renovations- und Reinigungskosten und die Kosten durch verkürzte Lebensdauer ergibt die externen Gebäudekosten aufgrund der Luftverschmutzung des Verkehrs (Schritte 5–7). Um diese Kosten auf die einzelnen Verkehrsträger bzw. im Strassenverkehr auf die Fahrzeugkategorien umzulegen, werden neben Immissionswerten auch Angaben zu Emissionen und Fahrleistungen herangezogen (Schritt 8).

Die angewendete Methodik in der Grundlagenstudie wird immer noch als adäquat eingeschätzt. Grundsätzlich gilt es zu sagen, dass das Modell zur Berechnung der Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung aus dem Jahr 2004 stammt und seither nicht mehr grundlegend überarbeitet werden konnte. Eine vertiefte Analyse der Belastungs-Wirkungs-Beziehung sowie der Anteile der verkehrsexponierten Flächen nach Agglomerationstyp ist dringend zu empfehlen, war aber nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

5.3 Mengengerüst

5.3.1 PM₁₀-Immissionen

Die PM₁₀-Immissionen stammen aus derselben Quelle wie bei den Gesundheitskosten (verfeinertes Immissionsmodell des BAFU, vgl. Kapitel 4.2.1 und 4.3.1). Als Grundlage für die empirische Schätzfunktion, welche die verkürzte Lebensdauer von Fassaden durch die Luftverschmutzung berechnet, werden diese Immissionen zudem nach vier Agglomerationstypen (Metropole, Agglomeration von Metropolen, Kerngemeinden in Metropolräumen, sonstige Agglomeration in Metropolräumen) differenziert. Für die Studie Externe Effekte des Verkehrs 2010¹⁶⁹ wurden dafür die räumlichen Immissionsdaten über das flächenmässige Gemeinderaster der Schweiz gelegt, und zwar für jeden einzelnen Verkehrsträger resp. für jede einzelne Fahrzeugkategorie. Gemäss einer Einschätzung der Entwickler und Entwicklerinnen des Immissionsmodells¹⁷⁰ können für die vorliegende Studie die gleichen relativen Immissionsanteile je Agglomerationstyp angenommen werden.

Die aggregierten PM₁₀-Konzentrationen für den Verkehr und die restlichen Bereiche (Haushalte, Industrie, Land-/Forstwirtschaft, natürliche Immissionen) sind in nachstehender Abbildung dargestellt.

¹⁶⁸ INFRAS; Wüest & Partner (2004)

¹⁶⁹ Ecoplan; INFRAS (2014)

¹⁷⁰ INFRAS; Meteotest (2020a)

Abbildung 5-2: PM₁₀-Immissionen in der Schweiz 2021

PM ₁₀ -Immissionen 2021 (µg/m ³) nach Raumtyp (Gemeindetyp)	Total	Verkehr	Rest
Metropole	13.40	3.86	9.54
Agglomerationen von Metropolen	12.82	3.34	9.48
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	12.33	3.12	9.21
Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanräumen	11.81	2.83	8.98

5.3.2 Fassadenflächen

Für die Berechnungen der Gebäudekosten für das Jahr 2010 wurde ein Mengengerüst (Gebäudefassadenflächen) aus der Gebäudedatenbank von Wüest & Partner herangezogen. Diese unterscheidet die Fassaden nach acht Agglomerationstypen, der Fassadenbauart und der Gebäudenutzung. Die Fassadenflächen werden gemäss der Gebäude- und Wohnungsstatistik (GWS)¹⁷¹ anhand der Wachstumsraten der Anzahl an Gebäuden in städtischen und ländlichen Gebieten hochgerechnet.

Abbildung 5-3: Fassadenflächen in der Schweiz 2021

Fassadenflächen insgesamt nach Agglomerationstypen & Fassadenbauart (in ha)	verputzt	roh	Glas / Metall	vorgehängt	Türe / Tore	Fenster	Total
Metropole	4'820	531	221	1'206	242	2'010	9'030
Agglomerationen von Metropolen	6'733	1'447	369	2'716	437	3'361	15'063
Kerngemeinden innerhalb Metropolitanräumen	2'681	440	135	863	150	1'218	5'486
Sonstige Agglomeration innerhalb Metropolitanräumen	4'226	849	207	1'722	272	2'000	9'275
Kerngemeinden	2'828	454	150	910	155	1'263	5'760
Agglomeration ausserhalb Metropolitanräumen	3'953	798	195	1'691	255	1'843	8'736
Einzelstädte	227	40	13	82	13	109	484
Land	10'429	2'027	384	5'838	697	4'491	23'867
Total	35'898	6'586	1'673	15'029	2'221	16'295	77'702

Quelle: Datensatz zu Fassadenflächen, Wüest & Partner AG (2013) und BSF (2023).

¹⁷¹ BFS (2023b)

5.4 Wertgerüst

5.4.1 Renovationskosten

Der verwendete Renovationskostensatz stammt aus der Grundlagenstudie und betrug 245 CHF/m² im Jahr 2000.¹⁷² Für die externen Effekte des Verkehrs 2010 wurde der Renovationskostensatz durch Wüest & Partner plausibilisiert. Die Herleitung eines neuen Kostensatzes für die Fassadenrenovation auf Basis einer empirischen Erhebung wäre sinnvoll, aber mit umfangreichen Arbeiten verbunden und war nicht im Auftrag der vorliegenden Studie enthalten. Dennoch zeigen Abklärungen bei Wüest & Partner sowie eine pragmatische Kurzrecherche, dass die Kostensätze weiterhin als plausibel gelten können. Deshalb schreiben wir den Renovationskostensatz mit dem Teil-Baupreisindex «Renovation, Umbau» fort. In der letzten Studie wurde der Kostensatz mithilfe des gesamten Baupreisindex fortgeschrieben. Seit 2010 veröffentlicht das BFS auch Teilindizes für Renovationskosten. Der Teilindex «Renovation, Umbau» eignet sich besser für die Fortschreibung des Renovationskostensatzes als der gesamte Baupreisindex. Der mittlere Kostensatz für das Jahr 2021 beläuft sich demnach auf 294 CHF/m². Gegenüber der letzten Berechnung im Jahr 2015 entspricht dies einer Zunahme von rund 2.2 %, welche der Steigerung des Teilindex «Renovation, Umbau» des Baupreisindex entspricht.¹⁷³

5.4.2 Kosten durch verkürzte Lebensdauer (Gebäudehülle)

Luftverschmutzung verkürzt die Lebensdauer von Gebäudehüllen über die Hintergrundbelastung auch an nicht verkehrsexponierten Standorten. Um die daraus entstehenden Kapitalkosten zu berechnen, werden bauteilspezifische Kostensätze für die Erstellungskosten verwendet. Diese Kostensätze wurden für die externen Effekte des Verkehrs 2010 basierend auf Recherchen und Auswertungen seitens Wüest & Partner aktualisiert. Berücksichtigt wurden dabei statistische Angaben zu Baupreisen ebenso wie Kennwerte abgerechneter Bauten, Herstellerangaben und interne Kennwerte. Diese Kostensätze wurden unter Verwendung des Hochbaupreisindex fortgeschrieben. In Abbildung 5-4 sind die Kostensätze für die Jahre 2015 und 2021 dargestellt. Gegenüber der letzten Berechnung im Jahr 2015 entspricht dies einer Zunahme von rund 3.9%, welche der Steigerung des Hochbaupreisindex im gleichen Zeitraum entspricht. In der letzten Studie wurden die Kostensätze mithilfe des gesamten Baupreisindex fortgeschrieben. Da sich die Erstellungskosten jedoch auf den Hochbau beziehen, wird der Hochbaupreisindex als passender erachtet.

¹⁷² INFRAS; Wüest & Partner (2004)

¹⁷³ In den Vorgängerstudien wurde der Kostensatz mit dem Baupreisindex «Baugewerbe Total» fortgeschrieben. Die Teilindizes «Renovation» werden jedoch als angemessener betrachtet.

Abbildung 5-4: Verwendete Kostensätze 2015 und 2021

Gebäudehülle - Erstellungskosten		
Spezifische Kostensätze (CHF/m ²)	2015	2021
verputzte Fassaden	112	116
rohe Fassaden	266	276
Glas/Metall-Fassaden	748	777
vorgehängte Fassaden	286	297
Türen/Tore	663	689
Fenster	821	853

Quelle: INFRAS; Wüest & Partner (2004) und INFRAS; Ecoplan (2019).

5.4.3 Reinigungskosten

Der Kostensatz für die Reinigungskosten wurde in einer Grundlagenstudie¹⁷⁴ basierend auf Interviews mit Experten und Expertinnen hergeleitet und betrug 4.50 CHF/m² im Jahr 2000. Wir erachten es als zweckmässig, den Kostensatz wie bis anhin mittels Lohnindex fortzuschreiben. Der verwendete Reinigungskostensatz für Glasfassaden beläuft sich demnach im Jahr 2021 auf 5.63 CHF/m². Gegenüber 2000 entspricht dies einer Zunahme von rund 25% (Veränderung des Nominallohnindex, Dienstleistungen – gegenüber 2015 Zunahme um 3.5%). Es wären umfangreiche Abklärungen bzw. empirische Erhebungen notwendig, um den Reinigungskostensatz neu zu ermitteln. Zudem gibt es grosse lokale Unterschiede innerhalb der Schweiz. Da der Kostensatz gemäss einer Kurzrecherche – auch wenn eher konservativ – innerhalb der Bandbreite der Kostensätze liegt, wird er beibehalten (at least Ansatz).

5.5 Vorgehen bei Differenzierungen

5.5.1 Differenzierung nach Antriebsart

Die Differenzierung nach Antriebsart für den Strassenverkehr wird über spezifische Emissionsfaktoren je Fahrzeugkategorie und Antriebsart (fossil, elektrisch und Rest) und anhand der jeweiligen Anteile an der Fahrleistung berechnet (vgl. Kapitel 20.1.6).

5.5.2 Differenzierung nach Raumtypen

Die Differenzierung nach **Raumtypen** im Strassen- und Schienenverkehr erfolgt gleich wie bei den Gesundheitsnutzen der Luftverschmutzung (vgl. Kapitel 4.5.2): Basis bildet das nationale Personenverkehrsmodell (vgl. Anhang A, Kapitel 20.1.4). Dabei werden die Fahrleistungen nach den

¹⁷⁴ INFRAS; Wüest & Partner (2004)

drei Raumtypen dichtbesiedelt, mitteldichtbesiedelt und geringbesiedelt differenziert und die entsprechenden prozentualen Anteile auf das Endergebnis angewendet. Bei dieser Auswertung werden zwei zusätzliche Effekte berücksichtigt:

- Die Emissionsfaktoren im Strassenverkehr werden nach innerorts, ausserorts und Autobahn differenziert.
- Zudem wird berücksichtigt, dass der Grossteil der Gebäudeschäden in unmittelbarer Nähe zum Emissionsort auftreten. Gemäss VSS 41 828¹⁷⁵ (Ziffer 20) verursacht PM₁₀ regionale Gebäudeschäden von 2'200 CHF pro Tonne und zusätzlich im bebauten Gebiet lokale Schäden von 139'000 CHF pro Tonne (Preisstand 2015). Die Schäden im bebauten Gebiet sind damit um den Faktor 64 höher ($= (139'000 + 2'200) / 2'200$). Für die Aufteilung der Gebäudeschäden werden also die Emissionen im bebauten Gebiet mit dem Faktor 64 multipliziert.

Die PM₁₀-Konzentrationen liegen für die Verkehrsträger Strasse, Schiene, Wasser und Luft vor, jeweils differenziert nach Personen- und Güterverkehr; im Strassenverkehr finden sich zudem Differenzierungen nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten. Die Differenzierung der Kosten nach Verkehrsträgern und Verkehrsmitteln erfolgt anhand der relativen Anteile der Verkehrsmittel an den gesamten PM₁₀-Immissionen im Verkehr.

5.5.3 Differenzierung nach Kantonen

Die Differenzierung der Ergebnisse im Strassen- und Schienenverkehr nach den Kantonen erfolgt gleich wie die Differenzierung nach Raumtyp: Die Emissionen pro Fahrzeugkategorie und Raumtyp werden über die Fahrleistungen aus dem nationalen Verkehrsmodell und den nach Fahrzeugkategorie und Strassentyp differenzierten Emissionsfaktoren ermittelt. Dabei wird ebenfalls der Gewichtungsfaktor 64 für Emissionen im bebauten Gebiet angewendet.

5.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

Wir gehen davon aus, dass zwischen den Immissionen und den daraus resultierenden Gebäudeschäden ein linearer Zusammenhang besteht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen linear verlaufen. Damit wären gemäss unserer Einschätzung die Grenz- und Durchschnittskosten bei den Gesundheitsschäden der Luftbelastung identisch.

¹⁷⁵ VSS 41 828 (2022)

5.7 Ergebnisse

5.7.1 Externe Kosten

a) Überblick Gesamtverkehr

Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 zeigen einen Überblick der externen Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung. Für das Jahr 2021 betragen die Kosten rund 259.6 Mio. CHF. 78% dieser Kosten entfallen auf den Strassenverkehr, 17% auf den Schienen-, 1% auf den Luft- und 4% auf den Schiffsverkehr.

Abbildung 5-5: Überblick über die externen Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021



Abbildung 5-6: Überblick über die externen Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr	149.7	52.4	202.1	77.9%
Schienenverkehr	30.8	14.5	45.3	17.4%
Luftverkehr	2.6	0.3	2.9	1.1%
Schiffsverkehr	4.5	4.8	9.3	3.6%
Total	187.6	72.0	259.6	100.0%
in % des Totals	72.3%	27.7%	100.0%	

b) Strassenverkehr

Die externen Gebäudekosten des Strassenverkehrs betragen im Jahr 2021 202 Mio. CHF. Diese Kosten werden insbesondere durch den motorisierten privaten Personenverkehr (69%) und den Güterverkehr (26%) verursacht. Von den Kosten entfallen 73% auf die Renovationskosten und 27% auf die Reinigungskosten. Die Kosten aufgrund der verkürzten Lebensdauer betragen für alle Verkehrsträger Null. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Exposition der Fassaden gegenüber der verkehrsbedingten Luftverschmutzung über die letzten Jahre gesunken ist und nun einen Punkt erreicht hat, bei dem die Kosten unter der angewandten Wirkungsbeziehung Null sind. Dies liegt unter anderem daran, dass eine lineare (negative) Beziehung zwischen dem Alter der Gebäude und dem Zustand der Fassade postuliert wurde, während die Schäden von einem zusätzlichen Jahr mit dem Alter abnehmen. Die lineare Annahme ist für eine Anwendung über 4–5 Jahre geeignet, aber nicht mehr. Es wird empfohlen, für zukünftige Aktualisierungen die Wirkungsbeziehung unter diesen neuen Umständen in einer separaten Studie empirisch herzuleiten.

Abbildung 5-7: Überblick über die externen Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Fahrzeugkategorien

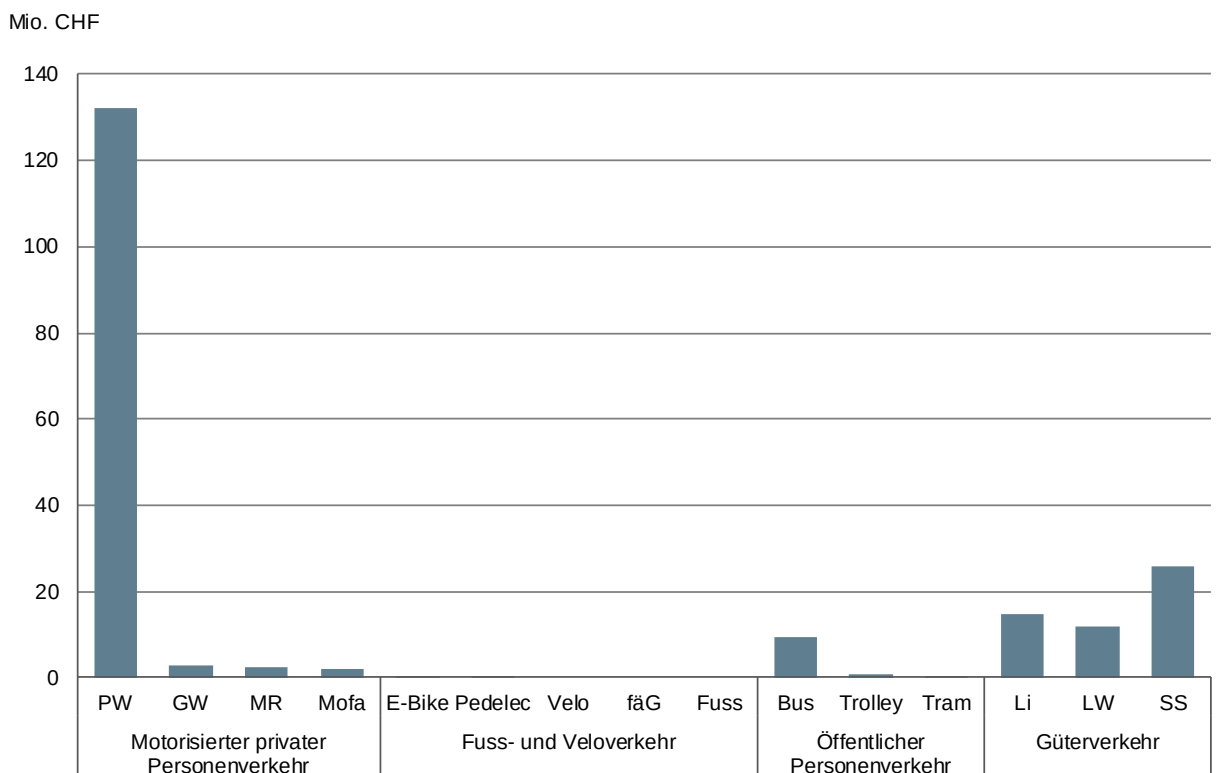


Abbildung 5-8: Überblick über die externen Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Fahrzeugkategorien und Kostenelementen

in Mio. CHF	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li		LW	SS
Renovationskosten	96.8	1.9	1.6	1.4	0.1	0.3	-	-	-	6.8	0.6	0.3	10.9	8.6	18.9	148.1
Verkürzte Lebensdauer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Reinigungskosten	35.3	0.7	0.6	0.5	0.0	0.1	-	-	-	2.5	0.2	0.1	4.0	3.1	6.9	54.0
Total	132.1	2.6	2.2	1.9	0.1	0.4	-	-	-	9.2	0.9	0.4	14.8	11.8	25.8	202.1
in % des Gesamttotals	65.4%	1.3%	1.1%	0.9%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	4.6%	0.4%	0.2%	7.3%	5.8%	12.8%	100.0%
Total Teilbereiche	138.8				0.5					10.4			52.4			202.1
in % des Gesamttotals	68.7%				0.2%					5.2%			25.9%			100.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

«0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «->» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt auch für alle folgenden Abbildungen.

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung der durch den Strassenverkehr verursachten Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung differenziert nach den einzelnen Fahrzeugkategorien und Antriebsarten. 98% der Kosten (197 Mio. CHF) des Strassenverkehrs werden durch fossile Fahrzeuge verursacht. Elektrofahrzeuge verursachen 1.7% der Kosten.

Abbildung 5-9: Externe Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Antriebsart

in Mio. CHF	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li		LW	SS
Fossil	129.4	2.6	2.2	1.9	-	-	-	-	-	8.9	-	-	14.7	11.7	25.6	197.0
Elektrisch	1.4	0.0	0.0	-	0.1	0.4	-	-	-	0.1	0.9	0.4	0.1	0.0	0.0	3.4
Rest	1.3	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2	-	-	0.0	0.0	0.1	1.7
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	132.1	2.6	2.2	1.9	0.1	0.4	-	-	-	9.2	0.9	0.4	14.8	11.8	25.8	202.1
Anteil Fossil	97.9%	99.9%	99.7%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	96.6%	0.0%	0.0%	99.2%	99.5%	99.4%	97.5%
Anteil Elektrisch	1.1%	0.1%	0.3%	0.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.5%	100.0%	100.0%	0.5%	0.2%	0.2%	1.7%
Anteil Rest	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.9%	0.0%	0.0%	0.3%	0.3%	0.4%	0.8%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

In der folgenden Abbildung werden die externen, durch Luftverschmutzung verursachten Gebäudedekosten auf die Kantone differenziert. Die Aufteilung der Kosten auf die Kantone hängt vor allem von der relativen Grösse der Bevölkerung ab. Die meisten Kosten fallen auf den Kanton Zürich (17%), den Kanton Bern (12%) und den Kanton Aargau (9%) an.

Abbildung 5-10: Externe Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Kantonen

in Mio. CHF	Personenverkehr									Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
Zürich	21.9	0.5	0.4	0.4	0.0	0.1	-	-	-	1.8	0.1	2.4	2.2	4.7	34.7
Bern	16.2	0.4	0.3	0.2	0.0	0.0	-	-	-	1.1	0.0	1.8	1.6	3.4	24.9
Luzern	7.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.6	-	0.8	0.8	1.8	11.9
Uri	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.1	-	0.1	0.1	0.2	1.0
Schwyz	3.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	-	0.3	0.2	0.5	4.5
Obwalden	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.1	0.6
Nidwalden	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	-	0.1	0.1	0.2	1.4
Glarus	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	-	0.1	0.1	0.2	1.0
Zug	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	-	0.2	0.1	0.2	2.5
Freiburg	4.5	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.3	-	0.4	0.4	0.8	6.6
Solothurn	4.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.3	0.0	0.5	0.6	1.2	6.9
Basel-Stadt	2.9	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.4	0.1	0.2	0.3	0.7	4.7
Basel-Landschaft	4.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.3	0.0	0.6	0.5	1.0	6.9
Schaffhausen	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.1	-	0.1	0.1	0.3	2.0
Appenzell A.Rh.	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	-	0.1	0.1	0.1	1.3
Appenzell I.Rh.	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.3
St. Gallen	8.8	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.7	-	1.0	0.7	1.6	13.2
Graubünden	2.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	-	0.4	0.3	0.6	3.7
Aargau	11.7	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.8	-	1.3	1.2	2.5	18.0
Thurgau	4.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	-	0.4	0.4	1.0	6.6
Tessin	8.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.5	-	0.8	0.5	1.2	11.4
Waadt	11.4	0.1	0.2	0.2	0.0	0.0	-	-	-	0.7	0.0	1.4	0.7	1.5	16.2
Wallis	4.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	-	-	-	0.4	-	0.5	0.4	0.8	6.3
Neuenburg	2.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	0.0	0.3	0.2	0.3	3.9
Genf	7.2	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	-	-	-	0.9	0.1	0.8	0.3	0.6	10.4
Jura	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.1	-	0.1	0.1	0.1	1.2
Total	132.1	2.6	2.2	1.9	0.1	0.4	-	-	-	10.1	0.4	14.8	11.8	25.8	202.1

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Die folgende Abbildung zeigt die externen, durch die Luftverschmutzung verursachten Gebäudekosten auf drei Raumtypen differenziert. Die externen Kosten von 202 Mio. CHF, die durch den Strassenverkehr verursacht werden, fallen zu 53% in mitteldicht besiedelten Gebieten, zu 30% in dicht besiedelten und zu 17% in gering besiedelten Gebieten an.

Abbildung 5-11: Externe Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Raumtyp

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total	
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr						
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
dicht besiedelt	39.4	0.7	0.6	0.8	0.0	0.2	-	-	-	4.4	0.3	4.3	3.1	6.7	60.5
mitteldicht besiedelt	69.3	1.4	1.2	0.8	0.0	0.2	-	-	-	4.7	0.0	8.3	6.4	14.0	106.4
gering besiedelt	23.4	0.5	0.4	0.2	0.0	0.0	-	-	-	1.0	-	2.2	2.3	5.1	35.2
Total	132.1	2.6	2.2	1.9	0.1	0.4	-	-	-	10.1	0.4	14.8	11.8	25.8	202.1
Anteil dicht besiedelt	29.8%	27.5%	29.3%	45.2%	45.2%	45.2%	0.0%	0.0%	0.0%	43.2%	96.6%	29.1%	25.9%	25.8%	29.9%
Anteil mitteldicht besiedelt	52.5%	52.8%	52.6%	45.2%	45.2%	45.2%	0.0%	0.0%	0.0%	46.5%	3.4%	56.1%	54.5%	54.5%	52.6%
Anteil gering besiedelt	17.7%	19.7%	18.1%	9.6%	9.6%	9.6%	0.0%	0.0%	0.0%	10.3%	0.0%	14.8%	19.6%	19.7%	17.4%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

c) Schienenverkehr

Von den im Jahr 2021 vom Schienenverkehr verursachten externen Kosten aufgrund von Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung in Höhe von 45 Mio. CHF können zu 68% dem Personenverkehr und zu 32% dem Güterverkehr zugeordnet werden.

Abbildung 5-12: Externe Kosten des Schienenverkehrs im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Personen- und Güterverkehr sowie Kostenelementen

	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
in Mio. CHF			
Renovationskosten	22.6	10.6	33.2
Verkürzte Lebensdauer	-	-	-
Reinigungskosten	8.2	3.9	12.1
Total	30.8	14.5	45.3

Anders als bei den Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung fallen bei den Gebäudekosten durch Luftverschmutzung im Schienenverkehr die meisten Kosten in den Kantonen mit der grössten Bevölkerung an: Zürich (17.9%), Bern (16.0%), Aargau (11.4%) und Waadt (8.8%). Dieser Unterschied liegt an dem unterschiedlichen Gewichtungsfaktor für Schäden in bebauten Gebieten (vgl. Kapitel 4.5.2 und Kapitel 5.5.2). Auffällig ist, dass mit 1% der Kosten ein im Vergleich zur relativen Bevölkerung grosser Anteil der Kosten auf den Kanton Uri fällt. Dies ist auf die Gotthardachse zurückzuführen.

Abbildung 5-13: Externe Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Kantonen

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich	6.7	1.4	8.1
Bern	5.0	2.3	7.3
Luzern	1.4	0.2	1.6
Uri	0.1	0.3	0.4
Schwyz	0.7	0.5	1.2
Obwalden	0.1	0.0	0.1
Nidwalden	0.1	0.0	0.1
Glarus	0.2	0.0	0.2
Zug	0.4	0.1	0.5
Freiburg	0.8	0.1	0.9
Solothurn	1.0	1.2	2.2
Basel-Stadt	0.4	0.3	0.7
Basel-Landschaft	0.8	0.7	1.5
Schaffhausen	0.3	0.0	0.3
Appenzell A.Rh.	0.2	0.0	0.2
Appenzell I.Rh.	0.1	-	0.1
St. Gallen	1.7	0.4	2.2
Graubünden	0.7	0.3	1.0
Aargau	2.6	2.6	5.2
Thurgau	1.0	0.3	1.3
Tessin	1.0	1.3	2.3
Waadt	2.8	1.2	4.0
Wallis	1.0	0.5	1.4
Neuenburg	0.7	0.5	1.2
Genf	0.6	0.2	0.8
Jura	0.2	0.0	0.2
Total	30.8	14.5	45.3

Im Schienenverkehr fallen 59% der gesamten Kosten für Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung in mitteldicht besiedelten Gebieten an. Im Güterverkehr liegt der Anteil der Kosten in mitteldicht besiedelten Gebieten sogar bei 68%. In dicht besiedelten und gering besiedelten Gebieten fallen gut ein Viertel bzw. ein Siebtel aller externen Kosten durch Luftverschmutzung im Schienenverkehr an.

Abbildung 5-14: Externe Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Raumtyp

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
dicht besiedelt	9.6	2.5	12.1
mitteldicht besiedelt	16.7	9.8	26.5
gering besiedelt	4.4	2.2	6.6
Total	30.8	14.5	45.3
Anteil dicht besiedelt	31.3%	17.4%	26.8%
Anteil mitteldicht besiedelt	54.3%	67.6%	58.5%
Anteil gering besiedelt	14.4%	15.0%	14.6%

d) Luftverkehr

Der Luftverkehr verursacht im Jahr 2021 externe Gebäudekosten von knapp 3 Mio. CHF.

Abbildung 5-15: Externe Kosten des Luftverkehrs im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Personen- und Güterverkehr sowie Kostenelementen

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Renovationskosten	1.9	0.2	2.1
Verkürzte Lebensdauer	-	-	-
Reinigungskosten	0.7	0.1	0.8
Total	2.6	0.3	2.9

Der grösste Anteil der Kosten sind auf den europäischen Linien- und Charterverkehr zurückzuführen (77%). Etwa 93% der Kosten sind den Landesflughäfen zuzuschreiben und 7% den Regionalflughäfen.

Abbildung 5-16: Externe Kosten des Luftverkehrs im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Flugarten und Infrastrukturtyp

in Mio. CHF	Landesflughäfen	Regionalflughäfen	Total
Linien- und Charterverkehr interkontinental	0.3	-	0.3
Linien- und Charterverkehr europäisch	2.2	0.0	2.2
Helikopter	0.0	0.0	0.0
Business Aviation	0.1	0.0	0.1
Rest General Aviation	0.1	0.2	0.2
Total	2.7	0.2	2.9

e) Schiffsverkehr

Der Schiffsverkehr verursacht vergleichsweise geringe Kosten für den Kostenbereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung. Aufgrund der geographischen Eigenschaften des Schiffsverkehrs ist es nachvollziehbar, dass der Schiffsverkehr weniger Kosten durch Gebäudeschäden verursacht als andere Verkehrsträger. Die Kosten betragen 9 Mio. CHF und verteilen sich etwa gleichmässig auf den Güter- und den Personenverkehr (rund 52% zu 48%).

Abbildung 5-17: Externe Kosten des Schiffsverkehrs im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 nach Personen- und Güterverkehr sowie Kostenelementen

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Renovationskosten		3.3	3.5	6.8
Verkürzte Lebensdauer		-	-	-
Reinigungskosten		1.2	1.3	2.5
Total		4.5	4.8	9.3

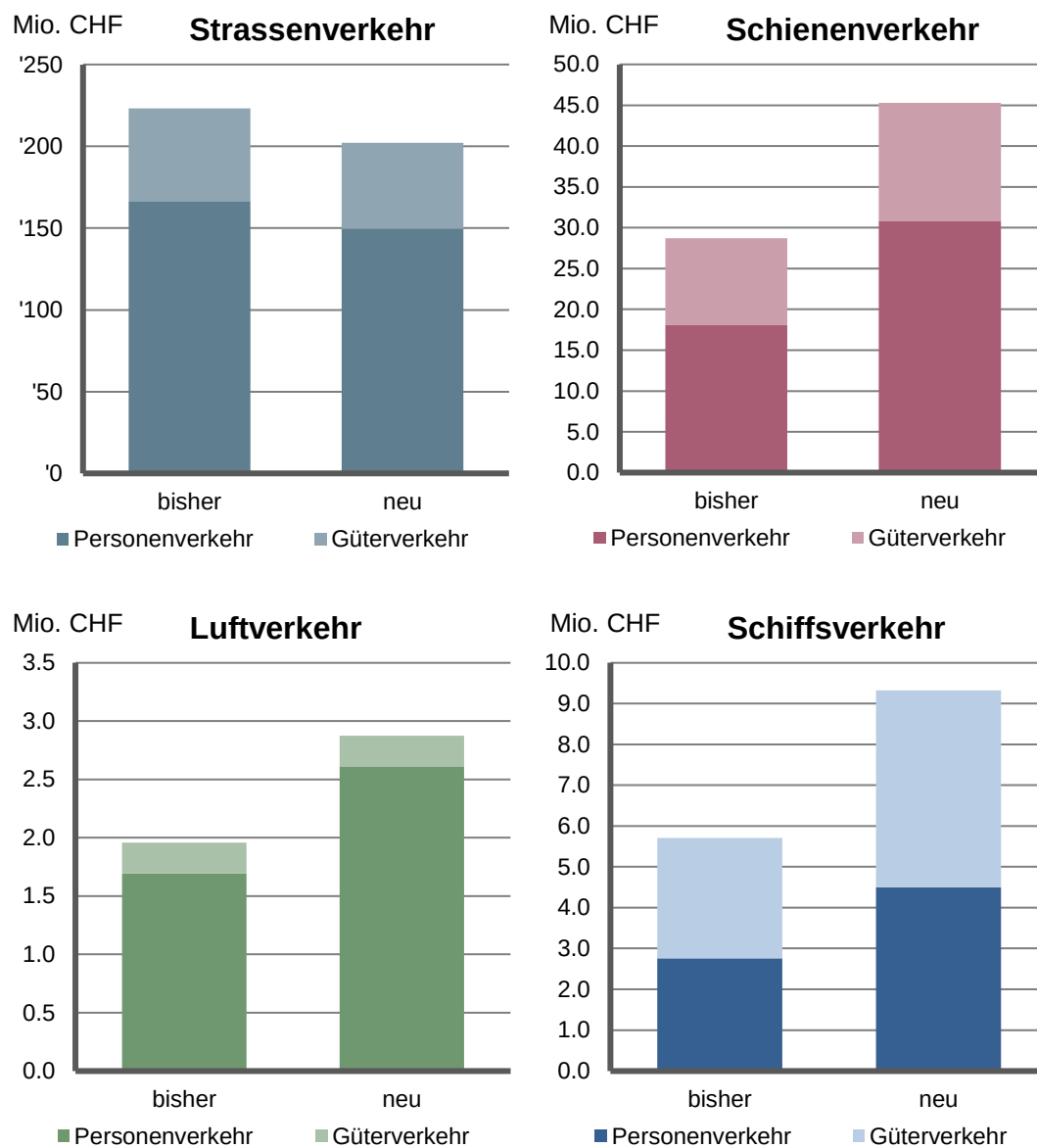
5.8 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse ist für diesen Kostenbereich nicht vorgesehen, da der Anteil der externen Kosten durch Gebäudeschäden an den Gesamtkosten mit 1.5 % unter 10 % liegt. In Bezug auf die Frage, in welcher Bandbreite die externen Kosten des Verkehrs aufgrund von Unsicherheiten schwanken, ist dieser Kostenbereich von untergeordneter Bedeutung.

5.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen grafisch und tabellarisch den Vergleich der Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 mit den Ergebnissen der Berechnungen mit dem früheren Tool. Der Vergleich zeigt den Effekt der neuen Datengrundlagen.

Abbildung 5-18: Überblick und Vergleich der Berechnungen für die Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 basierend auf den alten und den neuen Grundlagen



Achtung: Die Skalen der vier Verkehrsträger sind unterschiedlich

Abbildung 5-19: Vergleich der Berechnungen für die Kosten im Bereich Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung 2021 basierend auf den alten und den neuen Grundlagen

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	166.51	56.66	223.2
Schienenverkehr	18.0	10.7	28.7
Luftverkehr	1.7	0.3	2.0
Schiffsverkehr	2.8	3.0	5.7
Total	189.0	70.6	259.6
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	149.7	52.4	202.1
Schienenverkehr	30.8	14.5	45.3
Luftverkehr	2.6	0.3	2.9
Schiffsverkehr	4.5	4.8	9.3
Total	187.6	72.0	259.6
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	-10.1%	-7.5%	-9.5%
Schienenverkehr	70.5%	36.0%	57.7%
Luftverkehr	54.3%	-1.4%	46.7%
Schiffsverkehr	63.3%	63.3%	63.3%
Total	-0.8%	2.0%	0.0%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	-16.8	-4.3	-21.1
Schienenverkehr	12.7	3.8	16.6
Luftverkehr	0.9	-0.0	0.9
Schiffsverkehr	1.7	1.9	3.6
Total	-1.4	1.4	0.0

Insgesamt bleiben die externen Kosten im Bereich der Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung gleich. Innerhalb der verschiedenen Verkehrsträger unterscheiden sich die Kosten jedoch deutlich. Die Kosten im Strassenverkehr sind um 10% gesunken, während sie im Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr im Vergleich stark angestiegen sind (um 58%, 47% bzw. 63%).

Die Unterschiede zwischen den Verkehrsträgern sowie zwischen Personen- und Güterverkehr lassen sich auf die neue Datengrundlage der PM10-Immissionen zurückführen. Die PM10-Immissionen des Strassenverkehrs sind in der neuen Berechnung niedriger als in der alten Berechnung, während die PM-Immissionen der anderen Verkehrsträger in der neuen Berechnung höher sind.

Anmerkungen

Uns ist bewusst, dass die Zusammenhänge in der Grundlagenstudie veraltet sind. Eine Aktualisierung der Daten und Wirkungsbeziehungen erfordert jedoch ein separates Projekt und war nicht Teil dieses Auftrags.

Die PM10-Immissionen im Schienenverkehr werden nun gemäss dem Verhältnis aus der EMIS-Datenbank genauer auf den Personen- und Güterverkehr aufgeteilt. Dadurch erklären sich die grossen Unterschiede im Schienengüterverkehr im Vergleich zu den früheren Berechnungen. Früher wurden die PM10-Immissionen vereinfachend entsprechend der Anzahl SBB-Loks auf den Personen- und Güterverkehr verteilt.

6 Ernteaufälle durch Luftverschmutzung

6.1 Berechnungsgegenstand

Luftschadstoffemissionen können Pflanzen in vielfältiger Weise schädigen und führen, wenn Nutzpflanzen betroffen sind, zu Schäden in der Landwirtschaft. Besonders ausgeprägt und gut untersucht sind die Schädigungen durch bodennahes Ozon (O_3) bei Nutzpflanzen.¹⁷⁶ Als starkes Oxidationsmittel führt Ozon bei Pflanzen zu Schäden an den Membranen und beeinträchtigt damit die Photosynthese und Transpiration. Diese Schäden führen bei längerer Ozonexposition zu einer Verminderung des Pflanzenwachstum und damit zu verminderten Ernteerträgen in der Landwirtschaft. Der negative Zusammenhang zwischen Ozonimmissionen und Ernteerträgen ist weit anerkannt und die Ursache-Wirkungskette lässt sich auf Basis der wissenschaftlichen Literatur quantifizieren.

Auf eine Quantifizierung von Ernteaufällen durch Schwefeldioxidemissionen wird verzichtet, obwohl auch Schwefeldioxid zu Ertragsausfällen führen kann. Weil aber die SO_2 -Emissionen des Verkehrs heute sehr niedrig sind und zudem die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen nicht gleich gut untersucht sind wie beim Ozon, verzichten wir aktuell auf eine Quantifizierung.

6.2 Bewertungsmethodik

Die Methodik zur Bewertung der Ernteaufälle infolge Luftverschmutzung ist etabliert und wird auch in internationalen Studien angewandt (z.B. EU-Projekte HEIMTSA, EXIOPOL, HEATCO).¹⁷⁷ Überdies sind Kostensätze für Ernteschäden auch in der aktuellen UBA-Methodenkonvention 3.1¹⁷⁸ enthalten.

Frühere Studien zur Berechnung der externen Kosten des Verkehrs¹⁷⁹ geben einen detaillierten Überblick zu den Wirkungen von Luftschadstoffen (insbesondere Ozon) auf Nutzpflanzen.

Die Kosten verursacht durch Ernteaufälle in der Landwirtschaft aufgrund des Verkehrs werden mit Hilfe von Belastungs-Wirkungs-Beziehungen berechnet, die über Experimente mit variierenden AOT40¹⁸⁰ Expositionen untersucht wurden. In neueren Studien¹⁸¹ werden fluxbasierte Belastungs-Wirkungs-Beziehungen empfohlen. Diese zeichnen sich durch eine bessere Abbildung der zugrun-

¹⁷⁶ Zur Bildung von bodennahem Ozon tragen unter anderem Emissionen von Stickoxiden (NO_x) und flüchtigen Kohlenwasserstoffen (Volatile Organic Compounds, VOC) bei. Der Verkehr trägt insbesondere einen grossen Anteil an den Stickoxidemissionen.

¹⁷⁷ Bickel; Friedrich (2006); EXIOPOL (2011); HEIMTSA (2011a)

¹⁷⁸ UBA (2020)

¹⁷⁹ Ecoplan; INFRAS (2014)

¹⁸⁰ AOT40 steht für Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 Parts Per Billion (ppb). Der AOT40 ist ein Index, der die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen über 40 ppb während der Wachstumsperiode darstellt. Berücksichtigt werden nur die Tagesstunden mit einer Strahlung von über 50 W/m^2 . Einheit: $ppm \cdot h$ oder $ppb \cdot h$.

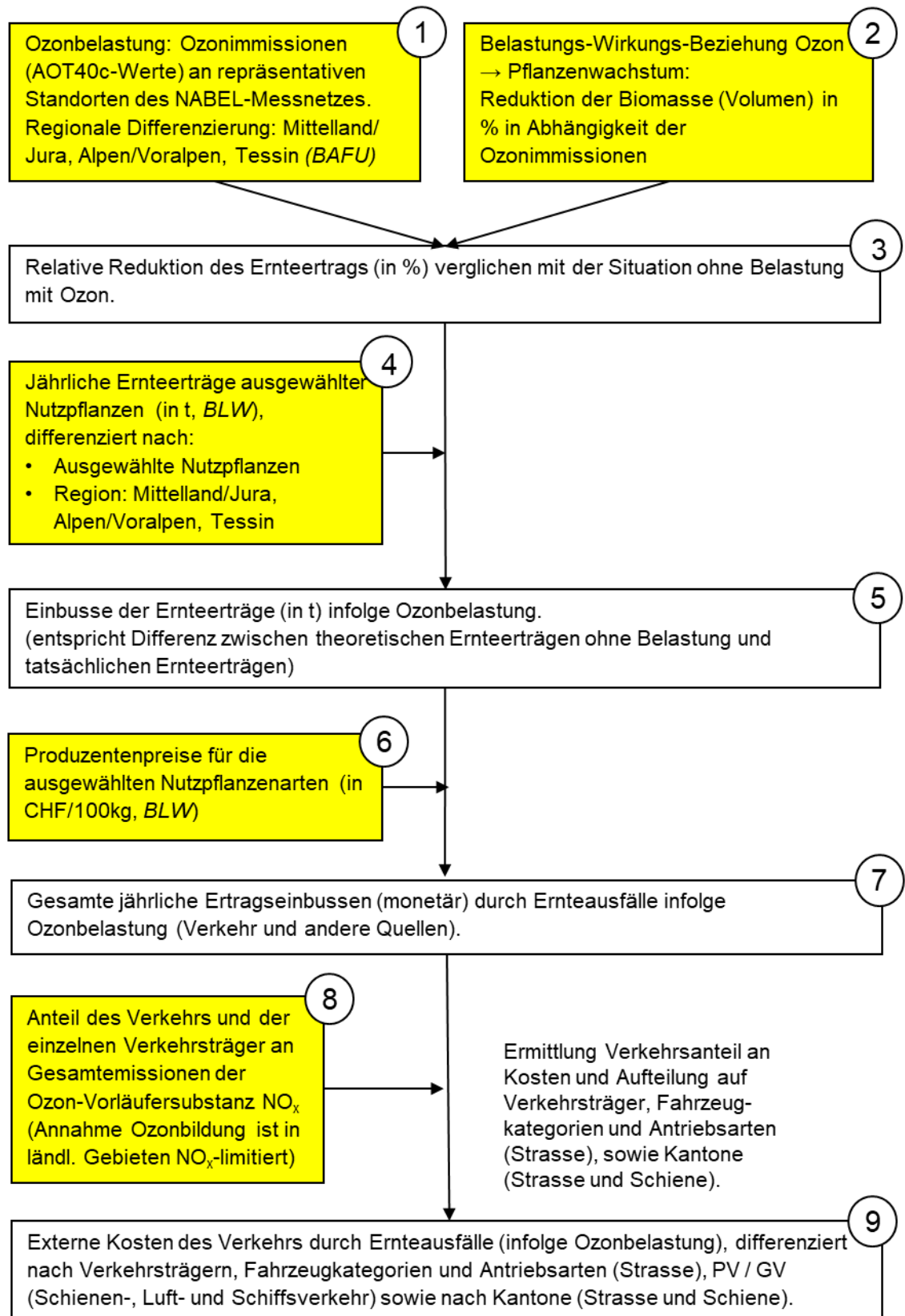
¹⁸¹ EEA (2021b); Emberson; Pleijel; Ainsworth; u. a. (2018)

deliegenden biologischen Prozesse aus. Die Verwendung des fluxbasierten Ansatzes zur Modellierung der Belastungs-Wirkungs-Beziehung bedingt jedoch die Verfügbarkeit verschiedener klimatischer Variablen (z.B. Umgebungstemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Strahlungsstärke, relative Bodenfeuchte während der Vegetationsperiode). Diese liegen für die Berechnungen in dieser Studie nicht in der benötigten Auflösung vor. Für die vorliegenden Berechnung verwenden wir daher wie bisher die Methode basierend auf den aktualisierten AOT40c-Werten für die Jahre 2014–2019.¹⁸²

Abbildung 6-1 gibt einen Überblick über das gewählte Vorgehen. Zur Quantifizierung der Ozonbelastung (AOT40c einer Vegetationsperiode) werden Messdaten von repräsentativen Standorten des NABEL (Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe) differenziert nach Regionen (1) verwendet. Mit bekannten Belastungs-Wirkungs-Beziehungen zwischen Ozonimmissionen und Reduktion der Biomasse (2) aus wissenschaftlichen Studien wird der prozentuale Rückgang der Ernteerträge der verschiedenen Nutzpflanzenarten (3) – verglichen mit der Situation ohne Belastung – berechnet. Verrechnet man diesen prozentualen Ernteaussfall mit den gesamten Ernteerträgen (4), können die mengenmässigen Ernteverluste berechnet werden, die durch das Ozon verursacht worden sind (5). Diese mengenmässigen Ernteverluste werden monetarisiert (7), indem die Mengen mit den Preisen (Produzenten- bzw. Faktorpreise) der entsprechenden Nutzpflanzen (6) multipliziert werden. Für die Berechnung des Verkehrsanteils an den quantifizierten totalen Ernteverlusten, wird der relative Beitrag des Verkehrs (und der einzelnen Verkehrsträger) an der gesamten Ozonbelastung bestimmt (8). Dabei wird angenommen, dass in ländlichen Gebieten die Ozonbildung durch NO_x limitiert ist. Der Verkehrsanteil an den NO_x-Emissionen – verrechnet mit dem monetarisierten Ernteaussfall – ergibt dann die externen Kosten des Verkehrs infolge von Ernteaussfällen (9).

¹⁸² Das „c“ steht für crops (Getreide).

Abbildung 6-1: Bewertungsmethodik Ernteauffälle durch Luftverschmutzung



Legende:

Inputdaten

Zwischen- / Endergebnisse

Erläuterung der Berechnung (Datenquellen kursiv)

6.3 Mengengerüst

6.3.1 Ozonimmissionen

Für die Ozonbelastung werden Immissionsmesswerte aus dem nationalen Messprogramm NABEL verwendet. Als Indikator wird der AOT40c-Wert verwendet, der die stündlich akkumulierte Ozonkonzentration über 40 ppb zwischen 1. Mai und 31. Juli in der Landwirtschaft wiedergibt (AOT = Accumulated exposure over threshold; c = crops). Für die NABEL-Messstationen sind AOT40c-Daten auf Bestellung verfügbar. Die Ozonimmissionen der einzelnen Jahre schwanken je nach klimatischen Verhältnissen (z.B. Anzahl Sonnentage eines Frühlings und Sommers) erheblich. Aus diesem Grund werden als Grundlage Mittelwerte der letzten 5 Jahre (2015–2019¹⁸³) verwendet. Weil für die Landwirtschaft die Emissionen in ländlichen, eher verkehrsfernen Gebieten (in allen Höhenlagen) relevant sind, werden Daten von Messstationen aus den entsprechenden Gebieten verwendet. Zusätzlich unterscheiden sich die Ozonimmissionen zwischen dem Mittelland / Jura und den Alpen gegenüber dem Tessin relativ stark. Die Berechnung wird darum für die drei Raumtypen differenziert durchgeführt.

Abbildung 6-2: Ozonimmissionen (AOT40c) an ausgewählten NABEL-Messstationen: Mittelwerte der Jahre 2015–2019

NABEL-Messstation	Ozonimmissionen 2015-2019: AOT40c (in ppm*h)
Mittelland/Jura	
Tänikon	10.80
Payerne	10.13
Mittelwert Mittelland/Jura	10.47
Alpen	
Davos	10.21
Tessin	
Magadino	14.19
Lugano	18.65
Mittelwert Tessin	16.42

6.3.2 Belastungs-Wirkungs-Beziehungen

Gemäss verschiedener Grundlagenstudien¹⁸⁴ kann der Zusammenhang zwischen dem Ernteertrag von Nutzpflanzen und der Ozonkonzentration mit der folgenden Grundformel (lineare Gleichung) beschrieben werden:

¹⁸³ Es werden Daten der Jahre vor der Corona-Pandemie verwendet, um mögliche Effekte aufgrund pandemiebedingter Einschränkungen zu vermeiden.

¹⁸⁴ Führer (2009); Holland; Mills; Hayes; u. a. (2002); Mills; Buse; Gimeno; u. a. (2007)

$$\text{Relativer Ernteertrag (in \%)} = 100 + m \cdot \text{AOT40c (in ppm}\cdot\text{h)}$$

Für die verschiedenen Nutzpflanzenarten variiert dabei nur der Wert der Steigung (m) in der linearen Gleichung. Der Ernterückgang bei einer bestimmten Ozonbelastung (AOT40c) wird relativ zum Ernteertrag einer Pflanze an einem unbelasteten Standort berechnet (Referenzwert). Ein unbelasteter Standort mit einer natürlichen Hintergrundbelastung an Ozon weist einen AOT40c-Wert von 0 ppm·h auf. Die folgende Abbildung zeigt die verwendeten Belastungs-Wirkungs-Beziehungen der verschiedenen Nutzpflanzenarten.

Abbildung 6-3: Daten zur Belastungs-Wirkungs-Beziehung zwischen Ozonbelastung und Ernteertrag bei verschiedenen Nutzpflanzen

Nutzpflanzenart	Prozentuale Reduktion des Ernteertrags pro zusätzlicher ppm·h Ozonbelastung (Steigung m) ¹	Reduktion des Ertrags unter Ozonbelastung je Region		
		Mittelland	Alpen	Tessin
Weizen	-1.61	15%	15%	24%
Gerste	-0.06	1%	1%	1%
Hafer	0	0%	0%	0%
Roggen	0	0%	0%	0%
Körnermais	-0.36	3%	3%	5%
Zuckerrüben	-0.58	6%	5%	9%
Kartoffeln	-0.57	5%	5%	9%
Raps	-0.56	5%	5%	8%
Sonnenblumen	-1.2	12%	11%	18%
Trauben	-0.3	3%	3%	5%
Karotten	-0.92	9%	9%	14%
Tomaten	-0.83	8%	8%	12%
Frischgemüse allgemein	-0.95	9%	9%	14%

¹ Die Werte m beziehen sich auf die Belastungs-Wirkungs-Beziehung: Relativer Ernteertrag (in %) = 100 – m·AOT40c (in ppm·h).

Quellen: Fuhrer (2009); Holland; Mills; Hayes; u. a. (2002) und Mills; Buse; Gimeno; u. a. (2007)

6.3.3 Ernteerträge

Als Basis für die Ernteerträge der ausgewählten Nutzpflanzen in der Schweizer Landwirtschaft dienen aktuelle statistische Auswertungen im Rahmen des Agrarberichts des Bundesamtes für Landwirtschaft zur landwirtschaftlichen Produktion in der Schweiz.¹⁸⁵ Die schweizerischen Gesamterträge werden weiter anteilmässig auf die drei Regionen Mittelland, Alpen und Tessin an-

¹⁸⁵ BLW (2022)

hand der Produktionsflächen aufgeteilt. Angaben zu den Produktionsflächen nach Nutzpflanzenarten werden jährlich im Rahmen der landwirtschaftlichen Strukturerhebung vom BFS¹⁸⁶ ausgewiesen.

Abbildung 6-4: Ernteerträge für verschiedene Nutzpflanzen 2021¹⁸⁷

Nutzpflanzenart	Ernteerträge 2021 (in Tonnen)
Weizen	435'188
Gerste	169'718
Hafer	7'359
Roggen	7'948
Körnermais	98'216
Zuckerrüben	1'102'116
Kartoffeln	342'752
Raps	77'030
Sonnenblumen	11'142
Trauben	85'499
Karotten	65'472
Tomaten	38'637
Frischgemüse allgemein	93'312

6.3.4 Verkehrsanteil an Ozonbelastung

Um den Anteil des Verkehrs an den Ertragseinbussen durch vermindertes Pflanzenwachstum zu bestimmen, greifen wir auf den Verkehrsanteil an der Ozonbelastung zurück.

Bodennahes Ozon entsteht vorwiegend aus den Vorläufersubstanzen NO_x und VOC. Diese Vorläufersubstanzen sind daher für die Bestimmung des Verkehrsanteils an der Ozonbelastung relevant. In ländlichen Gebieten ist die Ozonbildung jedoch vorwiegend NO_x-limitiert.¹⁸⁸ Der Verkehrsanteil an der Ozonbelastung wird daher anhand der nach Antriebsart differenzierten Stickoxidemissionen (NO_x) für jede Fahrzeugkategorie des Strassenverkehrs sowie für die Verkehrsträger Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr bestimmt (siehe Anhang Kapitel 20.2). Im Jahr 2021 betrug der gesamte Anteil des Verkehrs an den gesamten NO_x-Emissionen in der Schweiz 51.2%.¹⁸⁹

¹⁸⁶ BFS (2023d)

¹⁸⁷ Quelle: BLW (2022)

¹⁸⁸ Ecoplan; INFRAS (2014)

¹⁸⁹ Diese 51.2% teilen sich folgendermassen auf die Verkehrsträger auf: Strassenverkehr 46.5%, Schienenverkehr 0.7%, Luftverkehr 1.3%, Schiffsverkehr 3.4%.

6.4 Wertgerüst

Abbildung 6-5 zeigt die Produzentenpreise der ausgewählten Nutzpflanzen in der Schweiz für das Jahr 2021. Anhand dieser Preise werden die Kosten der Ertragsausfälle ermittelt.

Abbildung 6-5: Produzentenpreise für verschiedene Nutzpflanzen 2021¹⁹⁰

Nutzpflanzenart	Produzentenpreise 2021 (in CHF/100 kg)
Weizen	47.75
Gerste	34.43
Hafer	30.40
Roggen	41.32
Körnermais	37.11
Zuckerrüben	5.57
Kartoffeln	59.59
Raps	96.15
Sonnenblumen	92.13
Trauben	377.81
Karotten	110.00
Tomaten	268.00
Frischgemüse allgemein	275.60

6.5 Vorgehen bei Differenzierungen

6.5.1 Differenzierung nach Antriebsart

Die Kosten des Strassenverkehrs werden nach den drei Antriebskategorien (fossil, elektrisch und Rest) differenziert ausgewiesen. Die Differenzierung nach Antriebsart erfolgt, wie in Kapitel 2.3 und Kapitel 20.2.1 beschrieben, über die spezifischen NO_x-Emissionen je Fahrzeugkategorie und Antriebsart.

6.5.2 Differenzierung nach Kantonen

Die Differenzierung nach Kantonen für den Strassen- und Schienenverkehr wird anhand der kantonalen Anteile der hier relevanten Luftschadstoff-Emissionen berechnet. Diese beruhen im Strassenverkehr auf den kantonalen Fahrleistungsanteilen, wenn vorhanden differenziert für Autobahn, innerorts und ausserorts und den entsprechenden Emissionsfaktoren (siehe Kapitel 20.1.5). Im Schienenverkehr beruht die kantonale Differenzierung auf den Fahrleistungsanteilen je Kanton für den Personen- und Güterverkehr.

¹⁹⁰ Quelle: BLW (2022)

6.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

Die ozonbedingte Wachstumsreduktion bei Nutzpflanzen wird mit einer linearen Funktion beschrieben und hängt ausschliesslich von der Ozonimmission ab (AOT40c). Somit entsprechen die Grenzkosten den hier berechneten Durchschnittskosten.

6.7 Ergebnisse

6.7.1 Externe Kosten

a) Überblick Gesamtverkehr

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die gesamten externen Kosten infolge der Ernteauffälle durch Ozonbelastung im Jahr 2021 differenziert nach Verkehrsträgern.¹⁹¹

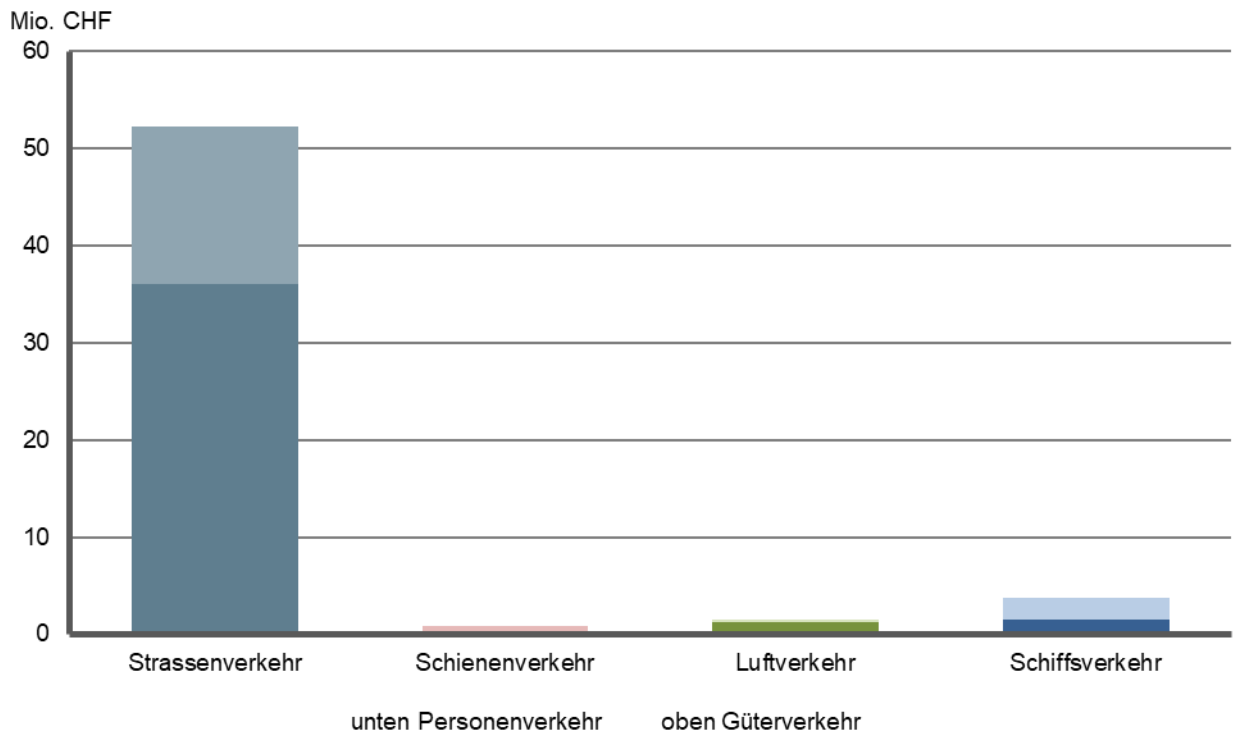
Die gesamten durch den Verkehr verursachten Ernteauffälle betrugen 2021 gut **58.3 Mio. CHF**. Von diesen Kosten verursachte der Strassenverkehr 89.6% (52.2 Mio. CHF), der Schienenverkehr 1.4%, der Luftverkehr 2.5% und der Schiffsverkehr 6.5%. In absoluten Zahlen verursachen die Verkehrsträger Schiene, Luft und Schiff zusammen 6 Mio. CHF an Ernteauffällen infolge Luftverschmutzung. Die Aufteilung der Gesamtkosten nach Personen- und Güterverkehr liegt bei 67% zu 33%.

Abbildung 6-6: Externe Kosten infolge Ernteauffälle durch Ozonbelastung für das Jahr 2021 nach Verkehrsträgern differenziert.

	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
in Mio. CHF				
Strassenverkehr	36.1	16.1	52.2	89.6%
Schienenverkehr	0.2	0.6	0.8	1.4%
Luftverkehr	1.3	0.2	1.4	2.5%
Schiffsverkehr	1.5	2.3	3.8	6.5%
Total	39.1	19.2	58.3	100.0%
in % des Totals	67.1%	32.9%	100.0%	

¹⁹¹ Bei dieser Kostenkategorie entsprechen die externen den sozialen Kosten, da es keinen Internalisierungsbeitrag gibt. Zudem sind die externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende sowie aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr genau gleich hoch.

Abbildung 6-7: Externe Kosten infolge Ernteaussfälle durch Ozonbelastung für das Jahr 2021



b) Strassenverkehr

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Aufteilung der Ernteaussfälle durch Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs auf die einzelnen Fahrzeugkategorien. Mehr als die Hälfte der Kosten (32.9 Mio. CHF oder 63%) des Strassenverkehrs wird durch die Personenwagen verursacht. Der öffentliche Strassenverkehr, sprich Linienbusse, ist verantwortlich für rund 4% der Kosten (2.1 Mio. CHF) und der Strassengüterverkehr für 31% (16.1 Mio. CHF).

Abbildung 6-8: Externe Kosten infolge Ernteaussfälle des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien

	Personenverkehr									Güterverkehr			Gesamttotal			
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Ernteaussfälle	32.9	0.6	0.5	0.0	-	-	-	-	-	2.1	-	-	9.4	4.5	2.3	
Total	32.9	0.6	0.5	0.0	-	-	-	-	-	2.1	-	-	9.4	4.5	2.3	
in % des Gesamttotals	63.1%	1.2%	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.0%	0.0%	0.0%	18.0%	8.6%	4.3%	
Total Teilbereiche	34.0				0.0					2.1			16.1			52.2
in % des Gesamttotals	65.2%				0.0%					4.0%			30.8%			100.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrgähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

«0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «-» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt für alle Abbildungen.

Abbildung 6-9: Externe Kosten infolge Ernteaussfälle des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien

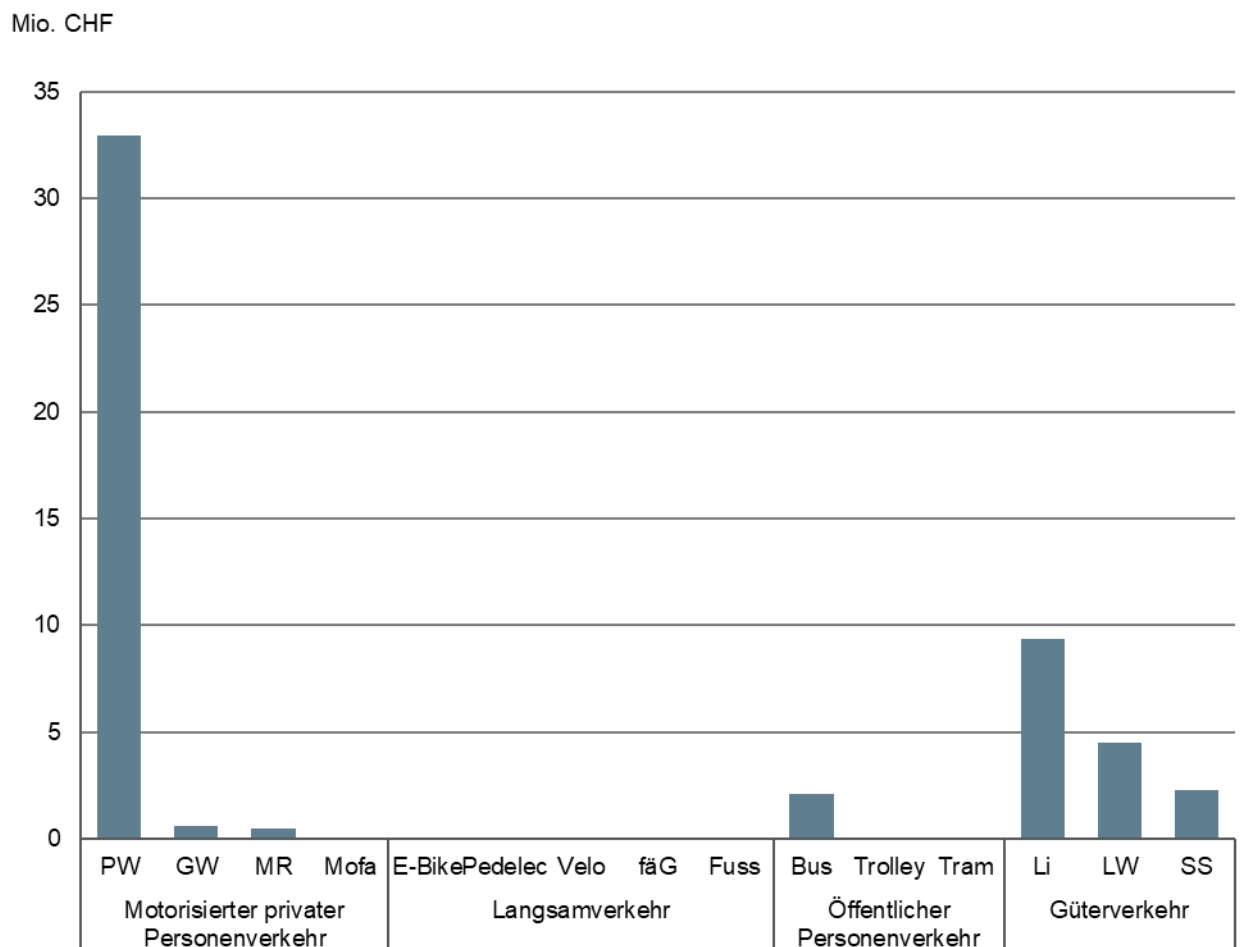


Abbildung 6-10 zeigt die externen Kosten infolge von Ernteaussfällen des Strassenverkehrs differenziert nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten. 99.7% der Kosten (52 Mio. CHF) des Strassenverkehrs werden durch fossile Fahrzeuge verursacht. Elektrofahrzeuge verursachen keine NOx-Emissionen und deshalb auch keine Ernteaussfälle.

Abbildung 6-10: Externe Kosten infolge Ernteaussfälle des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Fossil	32.9	0.6	0.5	0.0	-	-	-	-	-	2.0	-	-	9.4	4.5	2.2	52.0
Elektrisch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rest	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	0.0	0.0	0.0	0.2
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	32.9	0.6	0.5	0.0	-	-	-	-	-	2.1	-	-	9.4	4.5	2.3	52.2
Anteil Fossil	99.9%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	95.6%	0.0%	0.0%	100.0%	99.9%	99.9%	99.7%
Anteil Elektrisch	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Anteil Rest	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.3%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Abbildung 6-11 zeigt die kantonalen Anteile der externen Kosten des Strassenverkehrs infolge von Ernteaussfällen. Für die kantonale Differenzierung werden die ermittelten Gesamtkosten anhand der kantonalen Anteile an den NO_x-Emissionen aufgeteilt. Dabei werden mengenbezogene kantonale Unterschiede der landwirtschaftlichen Produktion nicht berücksichtigt. Den grössten Anteil der externen Kosten weist Zürich (knapp 15%) auf, gefolgt von Bern (12%) und Waadt (10.6%).

Abbildung 6-11: Externe Kosten infolge Ernteaussfälle des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien und Kantone differenziert

	Personenverkehr									Güterverkehr			Gesamt-		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr					total	
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
Zürich	4.9	0.1	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.3	-	1.3	0.6	0.3	7.7
Bern	4.0	0.1	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	1.1	0.5	0.3	6.3
Luzern	1.7	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.4	0.3	0.1	2.7
Uri	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.1	0.0	0.5
Schwyz	0.7	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.2	0.1	0.0	1.1
Obwalden	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.2
Nidwalden	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.4
Glarus	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.3
Zug	0.5	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.7
Freiburg	1.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.2	0.1	1.9
Solothurn	1.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.3	0.1	1.9
Basel-Stadt	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.1	0.0	0.0	0.5
Basel-Landschaft	1.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.2	0.1	1.8
Schaffhausen	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.3
Appenzell A.Rh.	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.2
Appenzell I.Rh.	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.1
St. Gallen	2.5	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	0.9	0.3	0.2	4.1
Graubünden	0.9	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.1	0.1	1.5
Aargau	3.0	0.1	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	0.9	0.5	0.3	4.9
Thurgau	1.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.3	0.1	0.1	1.6
Tessin	1.9	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.5	0.3	0.1	3.0
Vaud	3.7	0.1	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	1.1	0.4	0.2	5.5
Valais	1.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.1	0.1	1.8
Neuenburg	0.6	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.2	0.0	0.0	0.9
Genf	1.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	0.3	0.1	0.0	1.7
Jura	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.4
Total	32.9	0.6	0.5	0.0	-	-	-	-	-	2.1	-	9.4	4.5	2.3	52.2

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

c) Schienenverkehr

Der Schienenverkehr verursacht sehr geringe externe Kosten durch luftverschmutzungsbedingte Ernteaussfälle, da fast kein NO_x emittiert wird. Im Jahr 2021 waren es 0.8 Mio. CHF. Der grösste Teil davon (knapp 80% bzw. 0.6 Mio. CHF) wird durch den Güterverkehr verursacht, weil im Güterverkehr deutlich mehr Dieselloks eingesetzt werden als im Personenverkehr.

Abbildung 6-12: Externe Kosten infolge Ernteaussfälle des Schienenverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr differenziert

Ernteaussfälle	Personen-verkehr	Güter-verkehr	Total
	in Mio. CHF		
Ernteaussfälle	0.2	0.6	0.8
Total	0.2	0.6	0.8

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung der externen Kosten infolge von Ernteaussfällen nach Kantonen sowie Verkehrsart. Die Kantone Bern und Aargau weisen mit jeweils 16.2% der Gesamtkosten die höchsten Anteile auf. Die Kantone Tessin (9%), Waadt (8.2%) und Zürich (8.1%) folgen mit Anteilen knapp unter 10% der Gesamtkosten.

Abbildung 6-13: Externe Kosten infolge Ernteaussfälle des Schienenverkehrs 2021 nach Personen-, Güterverkehr und Kantone differenziert

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich	0.027	0.040	0.067
Bern	0.028	0.104	0.133
Luzern	0.007	0.007	0.014
Uri	0.002	0.023	0.024
Schwyz	0.005	0.028	0.033
Obwalden	0.001	0.000	0.001
Nidwalden	0.001	0.000	0.001
Glarus	0.001	0.003	0.004
Zug	0.002	0.007	0.009
Freiburg	0.007	0.006	0.012
Solothurn	0.006	0.043	0.049
Basel-Stadt	0.001	0.005	0.006
Basel-Landschaft	0.005	0.027	0.032
Schaffhausen	0.002	0.000	0.002
Appenzell A.Rh.	0.001	0.000	0.001
Appenzell I.Rh.	0.000	-	0.000
St. Gallen	0.010	0.017	0.027
Graubünden	0.008	0.031	0.039
Aargau	0.014	0.119	0.133
Thurgau	0.006	0.010	0.016
Tessin	0.006	0.068	0.074
Waadt	0.016	0.051	0.067
Wallis	0.009	0.037	0.046
Neuenburg	0.003	0.016	0.020
Genf	0.002	0.004	0.006
Jura	0.002	0.001	0.002
Total	0.2	0.6	0.8

d) Luftverkehr

Auch die externen Kosten des Luftverkehrs infolge von Ernteaussfällen sind sehr tief. Im Jahr 2021 betrugen diese Schäden 1.4 Mio. CHF, wovon der überwiegende Teil durch den Personenverkehr verursacht wird. 97% dieser Kosten fallen an Landesflughäfen an. Teilt man die Kosten auf die einzelnen Flugarten auf, sind 92% dem Linien- und Charterverkehr zuzuordnen, die Kosten der Helikopter sind vernachlässigbar klein und die General Aviation, sowie die Business Aviation verursachen je 4% der Kosten.

Abbildung 6-14: Externe Kosten infolge Ernteaussfälle des Luftverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr differenziert

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Ernteaussfälle		1.3	0.2	1.4
Total		1.3	0.2	1.4

Abbildung 6-15: Externe Kosten infolge Ernteaussfälle des Luftverkehrs 2021 nach Flugart und Infrastrukturtyp differenziert

	in Mio. CHF	Landesflughäfen	Regionalflughäfen	Total
Linien- und Charterverkehr interkontinental		0.4	-	0.4
Linien- und Charterverkehr europäisch		0.9	0.0	0.9
Helikopter		0.0	0.0	0.0
Business Aviation		0.0	0.0	0.1
Rest General Aviation		0.0	0.0	0.1
Total		1.4	0.0	1.4

e) Schiffsverkehr

Der Schiffsverkehr verursachte im Jahr 2021 externe Kosten durch Ernteaussfälle im Umfang von knapp 4 Mio. CHF. Davon entfallen 36% (1.5 Mio. CHF) auf die öffentliche Personenschifffahrt und der Rest auf den Güterverkehr.

Abbildung 6-16: Externe Kosten infolge Ernteaussfälle des Luftverkehrs 2021 nach Flugart und Infrastrukturtyp differenziert

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Ernteaussfälle		1.5	2.3	3.8
Total		1.5	2.3	3.8

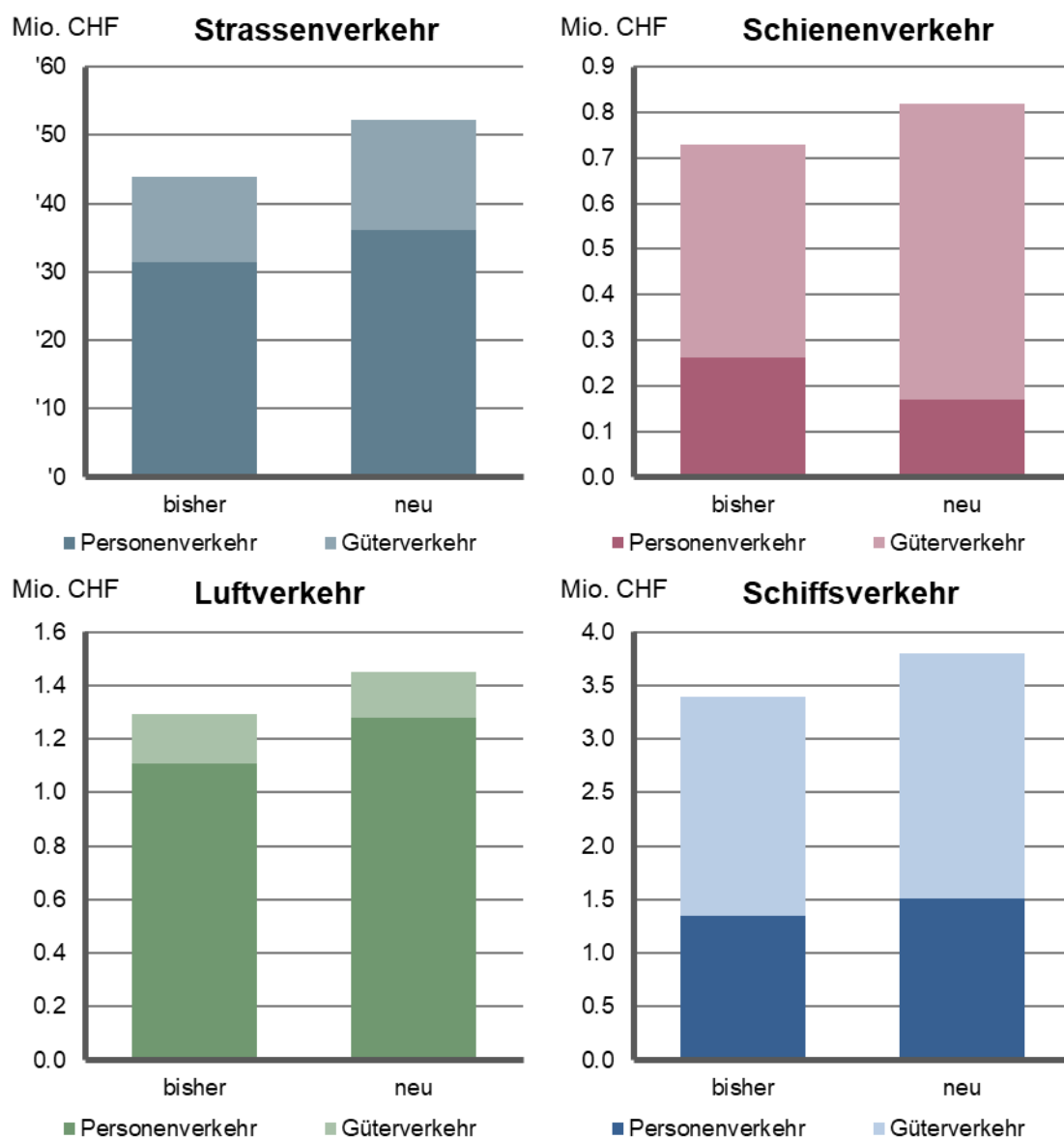
6.8 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse ist für diesen Kostenbereich nicht vorgesehen, da der Anteil der externen Kosten durch Ernteaussfälle an den Gesamtkosten mit 0.3% unter 10% liegt. In Bezug auf die Frage, in welcher Bandbreite die externen Kosten des Verkehrs aufgrund von Unsicherheiten schwanken, ist dieser Kostenbereich von untergeordneter Bedeutung.

6.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen grafisch und tabellarisch den Vergleich der externen Kosten infolge von Ernteaussfällen durch Ozonbelastung für das Jahr 2021 basierend auf dem Vergleich der aktualisierten Berechnungen mit den Ergebnissen der bisherigen Berechnungsmethodik. Der Vergleich zeigt nur den Effekt der neuen Datengrundlagen da an der Berechnungsmethodik keine Änderungen vorgenommen wurden. Insgesamt nehmen die Ernteaussfälle gegenüber den bisherigen Berechnungen um 16% zu. Zum einen führte der Ausschluss der Jahre 2020 und 2021 bei der Berechnung der Ozonbelastung zu höheren Belastungswerten, da diese Jahre pandemiebedingt tiefe Ozonbelastungswerte aufwiesen. Zusätzlich führte die aktualisierte Datengrundlage zu leichten Veränderungen. Insbesondere im Strassenverkehr führte die Berechnung der NO_x-Emissionen mittels aktualisierter Emissionsfaktoren zu einer zusätzlichen Erhöhung des Anteils an den externen Kosten infolge Ernteaussfälle.

Abbildung 6-17: Vergleich der Berechnungen der externen Kosten infolge Ernteaussfälle basierend auf der ursprünglichen und überarbeiteten Berechnungsmethodik 2021



Achtung: Die Skalen der vier Verkehrsträger sind unterschiedlich

Abbildung 6-18: Überblick und Vergleich der Berechnungen für die externen Kosten infolge Ernteaussfälle basierend auf den alten und den neuen Datengrundlagen sowie Methodik

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	31.37	12.57	43.9
Schienenverkehr	0.3	0.5	0.7
Luftverkehr	1.1	0.2	1.3
Schiffsverkehr	1.4	2.0	3.4
Total	34.1	15.3	49.4
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	36.1	16.1	52.2
Schienenverkehr	0.2	0.6	0.8
Luftverkehr	1.3	0.2	1.4
Schiffsverkehr	1.5	2.3	3.8
Total	39.1	19.2	58.3
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	15.1%	28.1%	18.8%
Schienenverkehr	-35.3%	38.9%	12.1%
Luftverkehr	15.3%	-7.2%	12.1%
Schiffsverkehr	12.1%	12.2%	12.2%
Total	14.6%	25.8%	18.1%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	4.7	3.5	8.3
Schienenverkehr	-0.1	0.2	0.1
Luftverkehr	0.2	-0.0	0.2
Schiffsverkehr	0.2	0.2	0.4
Total	5.0	3.9	8.9

7 Waldschäden durch Luftverschmutzung

7.1 Berechnungsgegenstand

Luftschadstoffemissionen des Verkehrs und dessen schädigende Wirkung auf Pflanzen können neben den landwirtschaftlichen Ertragsausfällen auch den Wald negativ beeinflussen. Insbesondere verkehrsinduzierte Emission von Luftschadstoffen wie Stickoxiden (NO_x), Schwefeldioxyden (SO₂) und Ammoniak (NH₃) stören durch die bodenversauernde Wirkung den Nährstoffhaushalt der Waldbäume und damit das Baumwachstum. Eine erhöhte Ozonbelastung hemmt zudem zusätzlich das Baumwachstum.¹⁹² Diese Störungen können zu verschiedenen Sekundäreffekten führen. Dazu zählen z.B. vermindertes Stammwachstum, Kronenverlichtungen, verminderte Standfestigkeit oder erhöhte Anfälligkeit auf Schädlinge oder Klimaeffekte.

In diesem komplexen Ökosystem, das von einer Vielzahl anderer Faktoren beeinflusst wird, sind für Waldschäden durch Luftverschmutzung nur wenige Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge wissenschaftlich untersucht und quantifiziert.¹⁹³ Aus diesem Grund beschränken sich die Berechnungen auf bekannte Wirkungen mit einem relevanten Schadenspotential und mit quantitativ beschriebenen Zusammenhängen. Dazu zählen:

- **Kosten durch vermindertes Holzwachstum:** Ozonimmissionen und durch verschiedene Luftschadstoffe versauerte Böden führen zu einem reduzierten Holzwachstum und somit geringeren Holzerträgen. Dies kann in der Forstwirtschaft zu Ertragsausfällen führen. Die negative Wirkung von Ozonimmissionen entspricht dem gleichen Effekt wie bei den Ernteaufgängen im Kapitel 6. Dort werden allerdings nur die Schäden an landwirtschaftlichen Nutzpflanzen untersucht.
- **Kosten durch verstärkten Windwurf:** Bodenversauerung führt (wie auch andere Stressfaktoren) zu einer verminderten Standfestigkeit der Bäume und erhöht damit das Windwurfisiko bei extremen Sturmereignissen (wie es z.B. der Sturm Lothar im Jahr 1999 war). Somit steigen die Sturmschäden im Wald und für die Forstwirtschaft fallen Zusatzkosten für die Räumung und Wiederaufforstung sowie Mindererträge bei der Holzverwertung an.

Studien zeigen, dass Ozonimmissionen neben dem verminderten Holzwachstum und dem Windwurfisiko auch zu einer reduzierten CO₂-Speicherkapazität (so genannte CO₂-Sequestrierung) des Waldes führen können.¹⁹⁴ Grund dafür ist die oben beschriebene wachstumshemmende Wirkung von Ozon. Es handelt sich also nicht um eine zusätzliche Wirkung, sondern um einen anderen Schadens- bzw. Bewertungsfokus. Wie bisher¹⁹⁵ wird die CO₂-Speicherkapazität bei der Monetarisierung nicht berücksichtigt.¹⁹⁶

¹⁹² Braun; Rihm (2012)

¹⁹³ Zwar sind kausale Zusammenhänge zwischen Luftschadstoffemissionen und negativen Wirkungen auf das Ökosystem Wald in einigen Bereichen nachgewiesen, es fehlen jedoch belastbare quantitative Belastungs-Wirkungs-Beziehungen.

¹⁹⁴ Harmens; Mills (2012)

¹⁹⁵ Ecoplan; INFRAS (2014)

¹⁹⁶ Damit soll eine Doppelzählung vermieden werden, denn der Wert eines gesunden Baumes kann über den Holzpreis oder über seine CO₂-Speicherkapazität bestimmt werden.

Eine weitere thematische Überschneidung und damit ein Risiko für eine Doppelzählung besteht mit den Kostenbereich Biodiversitätsverluste (Kapitel 8). Es liegt jedoch keine Doppelzählung vor, da sich die betrachteten Schäden deutlich unterscheiden und somit komplementär sind: Im Gegensatz zu den hier berechneten direkten Schäden für die Forstwirtschaft werden im Kapitel 8 die Biodiversitätsverluste allgemein bewertet (über einen Reparaturkostenansatz) und somit stehen andere Schadenswirkungen im Fokus. Wie bereits in den früheren Studien verzichteten wir aber auch im vorliegenden Kapitel zu den Waldschäden darauf die allgemeine Wirkung des Stickstoffeintrags oder der Bodenversauerung zusätzlich zu quantifizieren (z.B. Verlust der Säureneutralisierungskapazität), weil sonst Doppelzählungen zu erwarten wären.

7.2 Bewertungsmethodik

Für die Bewertung der Waldschäden durch Luftschadstoffemissionen verwenden wir die etablierte Berechnungsmethodik, wie sie in den früheren Berechnungen der externen Kosten des Verkehrs für die Jahre 2010¹⁹⁷ und 2015¹⁹⁸ verwendet wurde. Neue anwendbare Belastungs-Wirkungs-Beziehungen liegen für dieses komplexe Ökosystem nicht vor.

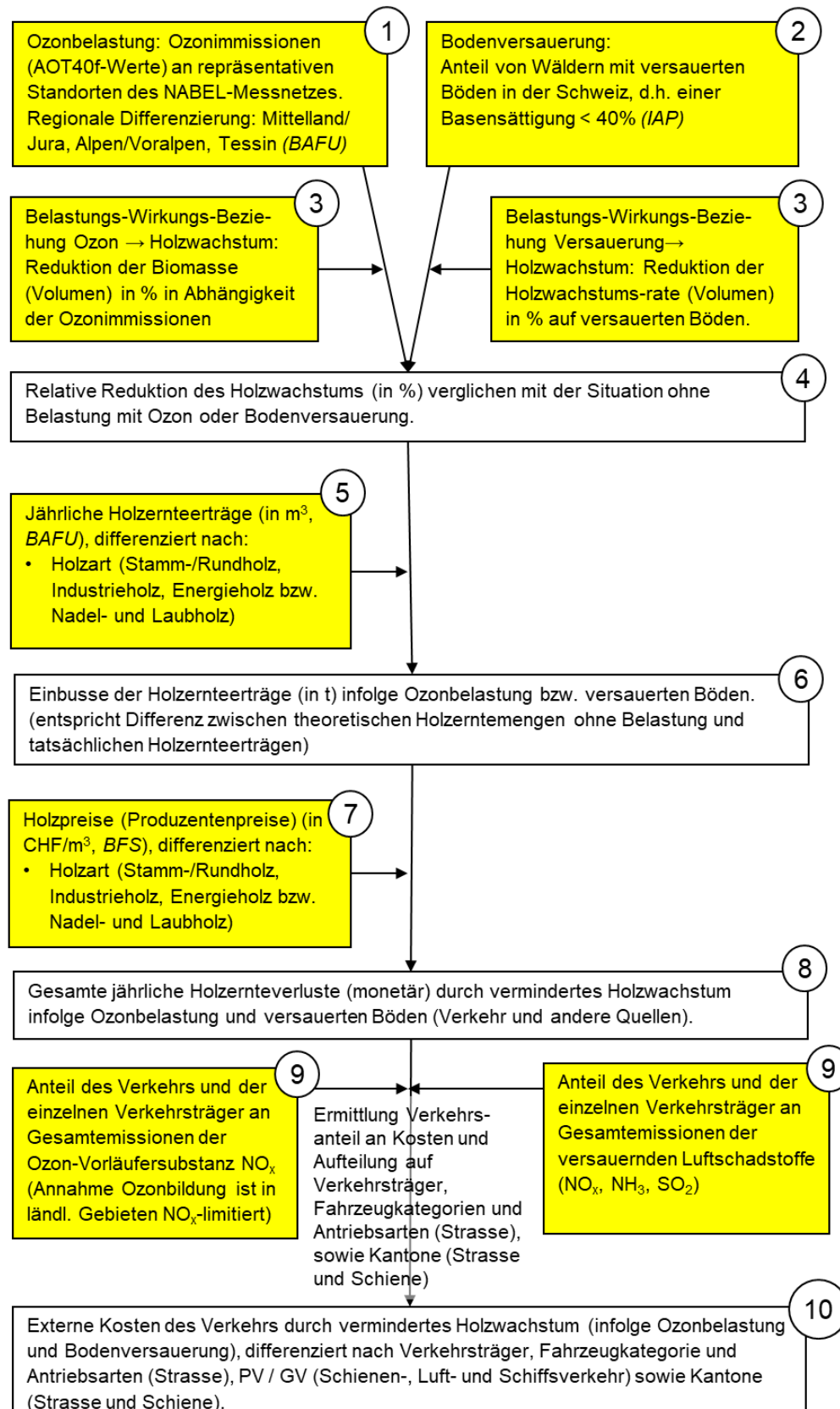
Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Bewertungsmethodik des verminderten Holzwachstums und verstärkten Windwurfs.

Die Berechnung der **Kosten durch vermindertes Holzwachstum** startet mit der Belastungssituation (vgl. Abbildung 7-1). Dabei bilden für die beiden separaten Wirkungspfade einerseits die Ozonbelastung (Schritt 1) und andererseits der Anteil versauerter Waldböden (2) die Grundlage. Aus diesen Belastungsdaten wird mit Hilfe von Belastungs-Wirkungs-Beziehungen (Schritt 3, eine für den Zusammenhang Ozonbelastung → Holzwachstum und eine für den Zusammenhang Bodenversauerung → Holzwachstum) die relative Reduktion des Holzwachstums ermittelt (4). Wird dieser durch Ozon und Versauerung bedingte relative Rückgang des Holzwachstums den jährlichen Holzerntemengen (5) gegenübergestellt, erhält man die mengenmässige Einbusse der Holzernteerträge (6). Durch Multiplikation dieser eingebüsst Holz mengen mit den Produzentenpreisen für Holz (7) ergeben sich die gesamten jährlichen Kosten durch Holzernteeverluste, die durch anthropogen bedingte Ozonimmissionen und Bodenversauerung verursacht werden (8). Von diesen Gesamtkosten durch alle anthropogenen Quellen muss schliesslich noch der Anteil des Verkehrs sowie der einzelnen Verkehrsträger, Fahrzeugkategorien und Antriebsarten ermittelt werden (10). Diese Allokation erfolgt auf Basis des Anteils der Emissionen des Verkehrs bzw. der einzelnen Verkehrsträger, Fahrzeugkategorien, Antriebsarten an den Gesamtemissionen der Luftschadstoffe, die zu Ozonbelastung und Versauerung führen (9). Als relevante Schadstoffe für die Allokation werden hierzu NO_x für die Ozonbelastung verwendet, sowie die drei versauernden Luftschadstoffe NO_x, NH₃ und SO₂ für die Bodenversauerung. Alle Details zu den verwendeten Inputgrössen finden sich in den folgenden Teilkapiteln zum Mengen- und Wertgerüst.

¹⁹⁷ Ecoplan; INFRAS (2014)

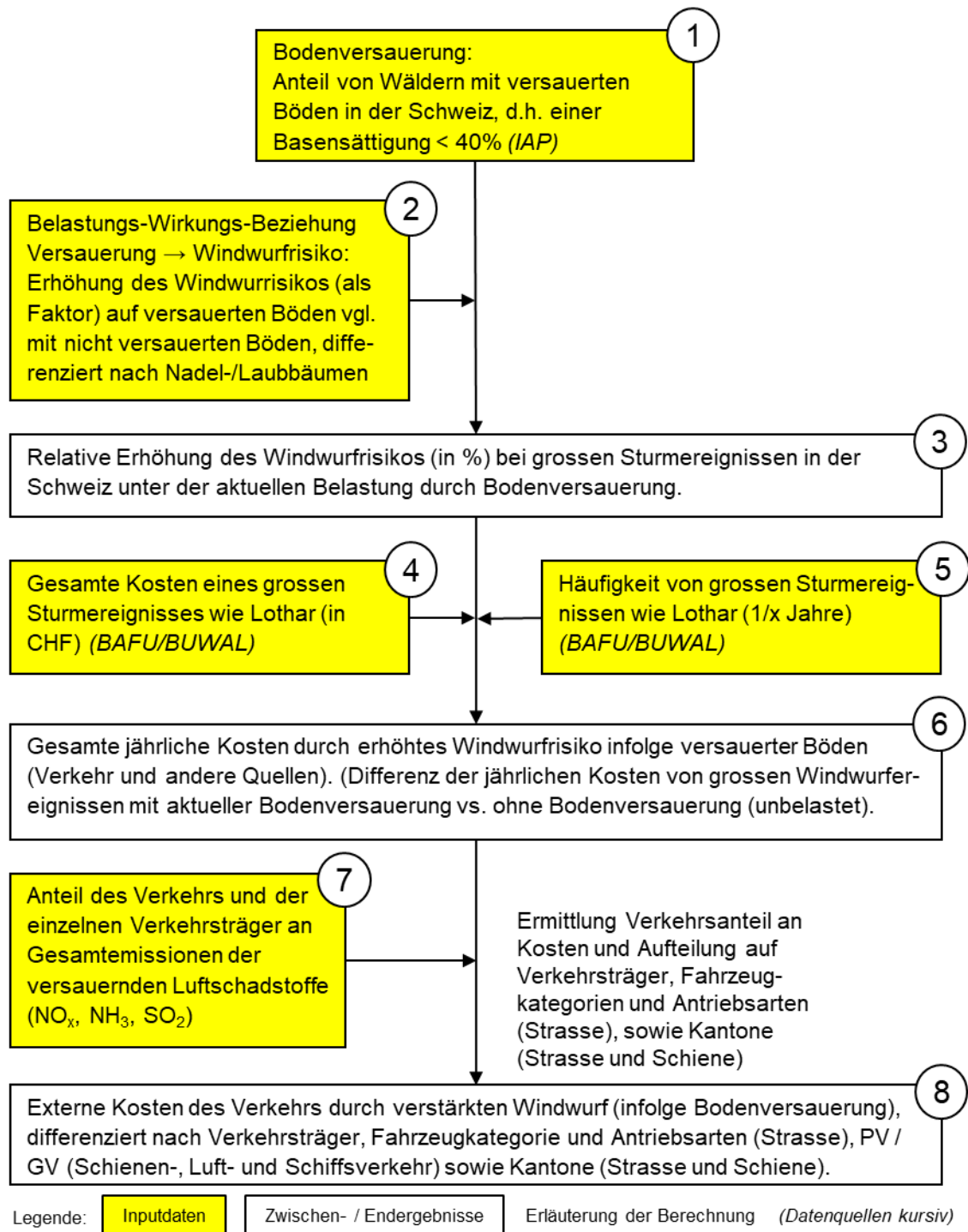
¹⁹⁸ INFRAS; Ecoplan (2019)

Abbildung 7-1: Berechnungsmethodik Waldschäden durch Luftverschmutzung (vermindertes Holzwachstum)



Legende: Inputdaten Zwischen- / Endergebnisse Erläuterung der Berechnung (Datenquellen kursiv)

Abbildung 7-2: Berechnungsmethodik Waldschäden durch Luftverschmutzung (Windwurf)



Die Berechnung der **Kosten durch verstärkten Windwurf** beginnt ebenfalls mit der Belastungssituation (Anteil versauerter Waldböden, Schritt 1) und der Anwendung einer Belastungs-Wirkungs-Beziehung (2) für den Zusammenhang zwischen Bodenversauerung und Windwurfrisiko (vgl. Abbildung 7-2). Auf diese Weise lässt sich die relative Erhöhung des Risikos von Windwurf bei grossen Sturmereignissen bei der aktuellen Versauerung von Waldböden ermitteln (3). Die

Monetarisierung der Schäden erfolgt mit Hilfe von Angaben zu Kosten grosser Sturmereignisse wie Lothar (4) sowie der Häufigkeit solcher Sturmereignisse (5). Als Ergebnis resultieren die gesamten jährlichen Kosten durch erhöhtes Windwurfrisiko, die durch anthropogen bedingte Bodenversauerung verursacht werden (6). Der Anteil des Verkehrs, der einzelnen Verkehrsträger, Fahrzeugkategorien und Antriebsarten an den Kosten durch verstärkten Windwurf (8) wird auf Basis der Emissionsanteile versauernder Luftschadstoffe (NO_x , NH_3 und SO_2) berechnet (7, analog wie beim verminderten Holzwachstum).

7.3 Mengengerüst

7.3.1 Vermindertes Holzwachstum

a) Ozonimmissionen

Für die Ozonbelastung werden Immissionsmesswerte aus dem nationalen Messprogramm NABEL (Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe) verwendet. Als Indikator wird der AOT40f-Wert verwendet, der die akkumulierte Ozonmenge über 40 ppb als Schwellenwert während der Wachstumszeit im Wald wiedergibt.¹⁹⁹ Für die NABEL-Messstationen sind AOT40f-Daten auf Bestellung verfügbar. Die Ozonimmissionen der einzelnen Jahre schwanken je nach klimatischen Verhältnissen (z.B. Anzahl Sonnentage eines Frühlings und Sommers) erheblich. Aus diesem Grund werden als Grundlage Mittelwerte der letzten 5 Jahre (2015–2019)²⁰⁰ verwendet. Weil für die Holzwirtschaft die Emissionen in ländlichen, eher verkehrsfernen Gebieten (in allen Höhenlagen) relevant sind, werden Daten von Messstationen aus den entsprechenden Gebieten verwendet. Die Ozonimmissionswerte unterscheiden sich zudem stark zwischen dem Mittelland / Jura, den Alpen / Voralpen und dem Tessin, darum wird die gesamte Berechnung differenziert nach diesen drei Raumtypen durchgeführt. Abbildung 7-3 zeigt die mittlere Ozonbelastung an den ausgewählten NABEL-Messstationen sowie die verwendeten Mittelwerte der drei Raumtypen (Mittelland / Jura, Alpen / Voralpen, Tessin).

¹⁹⁹ Der AOT40-Wert für den Wald (AOT40f, f = forest) zeigt die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen über 40 ppb, welche zwischen 1. April und 30. September gemessen werden.

²⁰⁰ Es werden Daten der Jahre vor der Corona-Pandemie verwendet, um mögliche Effekte aufgrund pandemiebedingter Einschränkungen zu vermeiden.

Abbildung 7-3: Ozonimmissionen (AOT40f) an ausgewählten NABEL-Messstationen: Mittelwerte der Jahre 2015–2019

NABEL-Messstation	Ozonimmissionen 2015-2019: AOT40f (in ppm*h)
Mittelland/Jura	
Chaumont	21.17
Lägeren	17.25
Payerne	16.51
Tänikon	16.89
Mittelwert Mittelland/Jura	17.95
Alpen	
Davos	16.73
Rigi	21.31
Mittelwert Alpen	19.02
Tessin	
Magadino	22.01
Lugano	28.26
Mittelwert Tessin	25.13

b) Bodenversauerung in Wäldern

Zum Anteil der versauerten Waldböden werden Daten aus dem Waldzustandsbericht²⁰¹ sowie dem Landesforstinventar (LFI) verwendet. Demnach weisen ca. **40%** aller Waldflächen in der Schweiz eine Basensättigung von weniger als 40% im Oberboden auf; bei Basensättigungen <40% ist mit Beeinträchtigungen von Wachstum und Vitalität zu rechnen.²⁰²

c) Belastungs-Wirkungs-Beziehungen

Das verminderte Holzwachstum kann wie einleitend erwähnt folgende Ursachen haben: übermässige Ozonbelastung oder Bodenversauerung.

Vermindertes Holzwachstum durch Ozonbelastung

Der Einfluss des Ozons auf das Holzwachstum ist in einer Reihe von Studien beschrieben und quantifiziert worden. Die vorliegenden Berechnungen basieren auf publizierten Belastungs-Wirkungs-Beziehungen²⁰³ für Fichten, Föhren, Buchen, Birken und Eichen. Der Zusammenhang zwi-

²⁰¹ IAP (2013)

²⁰² Die Basensättigung <40% wird für die weiteren Berechnungen als Indikator verwendet, weil die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen zwischen Bodenversauerung und Holzwachstum sowie Bodenversauerung und Windwurfisiko auf diesem Wert abgestützt sind.

²⁰³ Braun; Rihm (2012); Karlsson; Pleijel; Belhaj; u. a. (2005)

schen Ozonbelastung und Holzbiomasse bzw. Stammvolumen wird analog wie bei den Nutzpflanzen in Kapitel 6 durch die folgende Formel charakterisiert, für die aus der Forschung je nach Baumart verschiedene Werte für die Steigung m bekannt sind:

$$\text{Relatives Biomassen- / Stammvolumen (in \%)} = 100 + m \cdot \text{AOT40f (in ppm}\cdot\text{h)}$$

Abbildung 7-4 zeigt die verwendeten Belastungs-Wirkungs-Beziehungen zwischen Ozonbelastung und Biomasse bzw. Stammvolumen (Holzmenge).

Abbildung 7-4: Verwendete Belastungs-Wirkungs-Beziehungen zwischen Ozonimmissionen und Biomasse bzw. Stammvolumen

Baumart	Prozentuale Reduktion der Biomasse (bzw. Stammvolumen) pro zusätzlicher ppm·h Ozonbelastung (Steigung m)	Reduktion des Ertrags unter Ozonbelastung je Region		
		Mittelland	Alpen	Tessin
Nadelbäume:	-0.0026	-6%	-7%	-8%
Fichte (<i>Picea abies</i>)	-0.0014			
Föhre (<i>Pinus silvestris</i>)	-0.0048			
Laubbäume:	-0.0052	-18%	-19%	-24%
Buche (<i>Fagus sylvatica</i>), Birke (<i>Betula pendula</i>)	-0.0054			
Eiche (<i>Quercus petraea</i>)	-0.0038			

Quellen: Fichte und Buche/Birke: Braun, Rihm (2012); Föhre, Eiche: Karlsson; Pleijel; Belhaj; u. a. (2005).

Vermindertes Holzwachstum durch Bodenversauerung

Für die Belastungs-Wirkungs-Beziehung zwischen Bodenversauerung und vermindertem Holzwachstum werden die quantitativen Grundlagen wie in der Berechnung für das Jahr 2010²⁰⁴ verwendet. Demnach ist die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (Volumenzunahme) von Holz auf versauerten Böden bei Nadelbäumen um 49% bzw. bei Laubbäumen um 33% reduziert.

Es ist zu erwähnen, dass es sich hierbei um theoretische (rechnerische) Werte handelt. In der Realität sind diese Werte bzw. Effekte mit weiteren Wirkungen überlagert, die Stickstoff auf das Holzwachstum haben kann. So kann der Eintrag von Stickstoff bis zu einem gewissen Grad auch düngend wirken, über einem gewissen Niveau aber wieder wachstumshemmend.²⁰⁵

d) Holznutzung (Holzernteerträge)

Als Grundlage für die Holznutzung werden aktuelle statistische Daten des BAFU zu den jährlichen Holzernteerträgen aus dem Jahrbuch Wald und Holz²⁰⁶ verwendet. Die folgende Abbildung zeigt die Holzerntemengen im Jahr 2021 für verschiedene Holzarten.

²⁰⁴ Ecoplan; INFRAS (2014)

²⁰⁵ Etzold; Waldner; Thimonier; u. a. (2014)

²⁰⁶ BAFU (2022)

Abbildung 7-5: Jährliche Holzerntemengen für verschiedene Holzarten (in 1'000 m³)

Produkt, Holzart	Ernte Mengen je Region [1000 m ³]		
	Mittelland / Jura	Alpen / Voralpen	Tessin/ Alpensüdseite
Stamm-/Rundholz	2334	2036	59
Laubholz	379	70	1
Nadelholz	1955	1966	58
Industrieholz	475	161	1
Laubholz	219	37	0
Nadelholz	256	124	1
Energieholz: Hackschnitzel	165	61	3
Laubholz	122	29	2
Nadelholz	43	32	1
Energieholz: Stückholz	676	472	78
Laubholz	561	234	57
Nadelholz	116	237	21

e) Verkehrsanteile

Um den Anteil des Verkehrs an den Kosten durch vermindertes Holzwachstum zu ermitteln, wird auf folgende Grundlagen zurückgegriffen:

- Verkehrsanteil an **Ozonbelastung**: Da bodennahes Ozon aus den Vorläufersubstanzen NO_x und VOC gebildet wird, sind diese für die Bestimmung des Verkehrsanteils an der Ozonbelastung relevant. Weil in ländlichen Gebieten die Ozonbildung als NO_x-limitiert gilt, erfolgt die Allokation des Verkehrsanteils an der Ozonbelastung in der vorliegenden Studie basierend auf den Stickoxidemissionen (NO_x) (siehe Anhang Kapitel 20.2). Im Jahr 2021 betrug der Anteil des Verkehrs an den gesamten NO_x-Emissionen in der Schweiz 51.2%.²⁰⁷ Dieser Wert wird als Indikator für den Verkehrsanteil an der Ozonbelastung verwendet.
- Verkehrsanteil an **Bodenversauerung**: Die Versauerung von Böden wird durch die drei anthropogenen Luftschadstoffe Stickoxid (NO_x), Ammoniak (NH₃) und Schwefeldioxid (SO₂) verursacht. Basierend auf den Verkehrs- sowie den Gesamtemissionen dieser drei Schadstoffe sowie unter Berücksichtigung des doppelten Säurepotenzials von SO₂ gegenüber NO_x und NH₃ kann der Verkehrsanteil an der Bodenversauerung bestimmt werden. Der Anteil des Verkehrs an den gesamten NO_x-Emissionen betrug im Jahr 2021 wie erwähnt 51.2%, an den NH₃-Emissionen 1.5% und an den SO₂-Emissionen 2.49%. Unter Berücksichtigung der Gesamtemissionen und des Säurepotenzials resultiert für das Jahr 2021 insgesamt ein Gesamtanteil des Verkehrs an der Bodenversauerung von 14.7%.²⁰⁸

²⁰⁷ Diese 51.2% teilen sich folgendermassen auf die Verkehrsträger auf: Strassenverkehr 46.5%, Schienenverkehr 0.7%, Luftverkehr 1.3%, Schiffsverkehr 3.4%.

²⁰⁸ Diese 14.7% teilen sich folgendermassen auf die Verkehrsträger auf: Strassenverkehr 13.08%, Schienenverkehr 0.18%, Luftverkehr 0.62%, Schiffsverkehr 0.86%.

7.3.2 Verstärkter Windwurf

a) Bodenversauerung in Wäldern

Wie in Kapitel 7.3.1 beschrieben, wird mit einem Anteil an versauerten Waldböden von 40% gerechnet.

b) Belastungs-Wirkungs-Beziehung

Eine Belastungs-Wirkungs-Beziehung zwischen Bodenversauerung und Windwurfrisiko konnte im Anschluss an den Sturm Lothar nachgewiesen und quantifiziert werden. Dabei konnte gezeigt werden, dass das Windwurfrisiko beim Sturm Lothar auf versauerten Böden mit einer Basensättigung $\leq 40\%$ bei Fichten 3.6-mal und bei Buchen 4.8-mal höher war als auf nicht versauerten Böden.²⁰⁹ Diese beiden Werte werden hier zur Vereinfachung pauschal für Nadelbäume (Faktor 3.6) und für Laubbäume (Faktor 4.8) verwendet. Unter Berücksichtigung des Anteils versauerter Waldböden (40%) und dem Umstand, dass beim Sturm Lothar 77% der betroffenen Bäume Nadelhölzer waren und 23% Laubhölzer²¹⁰, ergibt sich insgesamt eine Erhöhung des Windwurfrisikos durch die Bodenversauerung um den Faktor 2.15.²¹¹ Dies entspricht einer Risikoerhöhung um +115%.

c) Häufigkeit von grossen Sturmereignissen (Windwurfrisiko)

Ein Sturm wie Lothar ereignet sich etwa alle 15 Jahre.²¹² Entsprechend beträgt die Wahrscheinlichkeit für einen Sturm dieser Grösse pro Jahr $1/15$ ($= 0.067$).

d) Verkehrsanteile

Die Berechnung des Verkehrsanteils an der Bodenversauerung und die Differenzierung nach Verkehrsträger, Fahrzeugkategorien, sowie Antriebsarten erfolgt nach demselben Vorgehen wie in Kapitel 7.3.1 e) bereits beschrieben wurde.

7.4 Wertgerüst

7.4.1 Vermindertes Holzwachstum

Die Bewertung der Kosten durch vermindertes Holzwachstum erfolgt über die durchschnittlichen Holzpreise. Es werden dazu Produzentenpreise für die verschiedenen Holzarten verwendet. Eine Bewertung des verminderten Holzwachstums ist unabhängig davon, ob dieses Holz tatsächlich geerntet wird.

²⁰⁹ BUWAL (2005a); IAP; Flückiger; Braun (2004); Mayer; Brang; Dobbertin; u. a. (2005)

²¹⁰ BUWAL (2003)

²¹¹ Risikofaktor = $(1 - 40\%) \cdot 1 + 40\% \cdot (77\% \cdot 3.6 + 23\% \cdot 4.8) = 2.15$

²¹² BUWAL (2005b)

Abbildung 7-6: Produzentenpreise für verschiedene Holzarten und Regionen (in CHF pro m³)

Produkt, Holzart	Preise für das Jahr 2021 [CHF/m ³]		
	Mittelland / Jura	Alpen / Voralpen	Tessin/ Alpensüdseite
Stamm-/Rundholz (Säge-Rundholz)			
Laubholz	96	100	100
Nadelholz	97	96	96
Industrieholz			
Laubholz	49	51	51
Nadelholz	40	38	38
Energieholz: Hackschnitzel			
Laubholz	68	69	69
Nadelholz	80	78	78
Energieholz: Stückholz			
Laubholz	90	85	85
Nadelholz	110	127	127

Quelle: BFS Statistik Produzentenpreise Rohholz 2010; Fortschreibung mittels Produzentenpreisindex Rohholz, BAFU

7.4.2 Verstärkter Windwurf

Zu den ökonomischen Auswirkungen von Sturmgrossereignissen werden weiterhin die bisherigen Kostensätze, basierend auf den Studien zu den ökonomischen Auswirkungen des Sturmes Lothar verwendet.²¹³ Die Kosten setzen sich aus Einkommensverlusten von Waldeigentümern (v.a. infolge Holzpreiserfall) sowie Ausgaben der öffentlichen Hand für Pflege- und Aufrüstemassnahmen zur Behebung von Folgeschäden zusammen. Die Gesamtkosten werden mit Hilfe der Nominallohnentwicklung auf das Jahr 2021 angepasst. Somit resultieren Gesamtkosten von 952 Mio. CHF pro Sturmgrossereignis. Davon ist allerdings nur gut die Hälfte (509 Mio. CHF) auf die Bodenversauerung zurückzuführen.²¹⁴ Die restlichen Kosten wären auch auf unversauertem Boden angefallen. Diese gesamten Zusatzkosten je Sturmereignis werden schliesslich mit Hilfe der Häufigkeit von grossen Sturmereignissen in Jahreskosten umgerechnet.

7.5 Vorgehen bei Differenzierungen

7.5.1 Differenzierung nach Antriebsart

Die Kosten des Strassenverkehrs werden differenziert nach den drei Antriebskategorien fossil, elektrisch und «Rest» ausgewiesen. Die Differenzierung nach Antriebsart wird – wie in Kapitel

²¹³ BUWAL (2004); (2005b)

²¹⁴ Die Berechnung dieses Anteils erfolgt auf Basis der Belastungssituation (Anteil versauerte Böden) sowie den Belastungs-Wirkungs-Beziehungen (siehe Kapitel 7.3.2b).

20.1.6 und Kapitel 20.2.1 beschrieben – anhand spezifischer Schadstoffemissionen je Fahrzeugkategorie und Antriebskategorie berechnet. Die Kosten der Ozonbelastung werden über die spezifischen NO_x-Emissionen je Fahrzeugkategorie und Antriebsart differenziert, während die Kosten durch Versauerung über die SO₂, NH₃ und NO_x-Emissionen nach Fahrzeugkategorie und Antriebskategorie differenziert werden.

7.5.2 Differenzierung nach Kantonen

Die Kosten der Verkehrsträger Schiene und Strasse werden – wie in Kapitel 2.3 und Kapitel 20.1 beschrieben – anhand der Anteile der Emissionen von SO₂, NH₃ und NO_x nach Kanton aufgeschlüsselt.

7.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

Die ozonbedingte Wachstumsreduktion von Waldbäumen wird mit einer linearen Funktion beschrieben und hängt ausschliesslich von der Ozonimmission ab (AOT40f). Somit entsprechen die Grenzkosten den hier berechneten Durchschnittskosten verursacht durch den Holzertragsausfall aufgrund der Wachstumsreduktion der Waldbäume.

Im Gegensatz dazu können die Auswirkungen der Bodenversauerung und des Stickstoffeintrags auf das Baumwachstum nicht mit einer linearen Funktion beschrieben werden. Ebenso gibt es keine Hinweise, dass das Windwurfisiko linear zur Bodenversauerung zunimmt. Somit können die hier berechneten Durchschnittskosten an Waldschäden nicht den Grenzkosten gleichgesetzt werden.

7.7 Ergebnisse

7.7.1 Externe Kosten

a) Überblick Gesamtverkehr

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die gesamten externen Kosten infolge Waldschäden durch Ozonbelastung und Versauerung der Böden im Jahr 2021 differenziert nach Verkehrsträgern.²¹⁵

Die gesamten durch den Verkehr verursachten Waldschäden betrugen 2021 insgesamt **54.8 Mio. CHF**. Von diesen Kosten verursachte der Strassenverkehr 89.7% (49.1 Mio. CHF), der Schienenverkehr 1.4%, der Luftverkehr 2.5% und der Schiffsverkehr 6.4%. In absoluten Zahlen verursachen

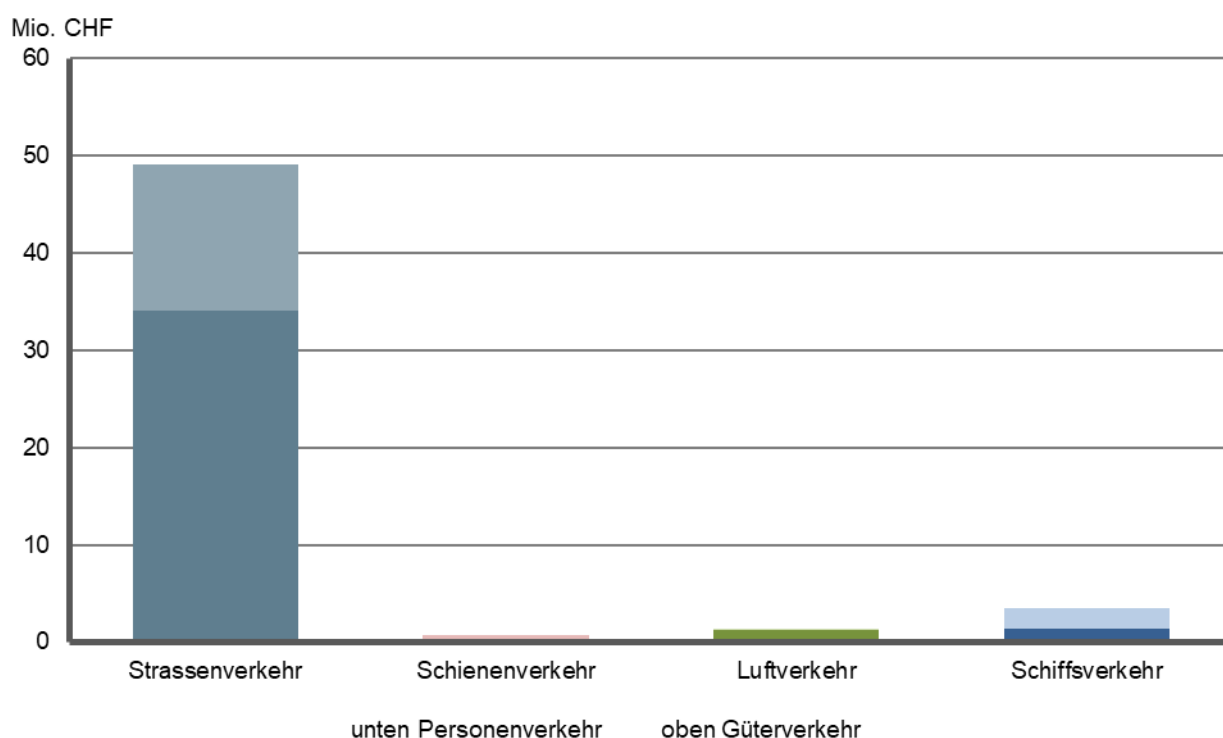
²¹⁵ Bei dieser Kostenkategorie entsprechen die externen den sozialen Kosten, da es keinen Internalisierungsbeitrag gibt. Zudem sind die externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende sowie aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr genau gleich hoch.

die Verkehrsträger Schiene, Luft und Schiff zusammen 5.7 Mio. CHF an Waldschäden infolge Luftverschmutzung. Die Aufteilung der Gesamtkosten nach Personen- und Güterverkehr liegt bei 67% zu 33%.

Abbildung 7-7: Externe Kosten infolge Waldschäden durch Ozonbelastung und Versauerung für das Jahr 2021 nach Verkehrsträgern differenziert.

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr	34.1	15.0	49.1	89.7%
Schienenverkehr	0.2	0.6	0.8	1.4%
Luftverkehr	1.2	0.2	1.4	2.5%
Schiffsverkehr	1.4	2.1	3.5	6.4%
Total	36.9	17.9	54.8	100.0%
in % des Totals	67.3%	32.7%	100.0%	

Abbildung 7-8: Externe Kosten infolge Waldschäden durch Ozonbelastung und Versauerung der Böden für das Jahr 2021



b) Strassenverkehr

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Aufteilung der Waldschäden durch Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs auf die einzelnen Fahrzeugkategorien und Kostenbestandteile. Mehr als die Hälfte der Kosten (31.2 Mio. CHF oder 63%) des Strassenverkehrs wird durch die Personenwagen verursacht. Der öffentliche Strassenverkehr, sprich Linienbusse, ist verantwortlich für knapp 4% der Kosten (1.9 Mio. CHF) und der Strassengüterverkehr für 31% (15 Mio. CHF).

Von den insgesamt 49.1 Mio. CHF für die Waldschäden des Strassenverkehrs ist das aufgrund von Ozon verminderte Holzwachstum für 27.8 Mio. CHF (56.5%) verantwortlich, das aufgrund von Versauerung verminderte Holzwachstum für 17 Mio. CHF (34.6%) und der verstärkte Windwurf für 4.4 Mio. CHF (8.9%).

Abbildung 7-9: Externe Kosten infolge Waldschäden des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien und Kostenbestandteilen

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Vermindertes Holzwachstum (Ozon)	17.5	0.3	0.3	0.0	-	-	-	-	-	1.1	-	-	5.0	2.4	1.2	27.8
Vermindertes Holzwachstum (Versauerung)	10.9	0.2	0.2	0.0	-	-	-	-	-	0.7	-	-	3.0	1.4	0.7	17.0
Verstärkter Windwurf (Versauerung)	2.8	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	-	0.8	0.4	0.2	4.4
Total	31.2	0.6	0.4	0.0	-	-	-	-	-	1.9	-	-	8.7	4.2	2.1	49.1
in % des Gesamttotals	63.4%	1.2%	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.9%	0.0%	0.0%	17.7%	8.5%	4.3%	100.0%
Total Teilbereiche	32.2				0.0					1.9			15.0			49.1
in % des Gesamttotals	65.5%				0.0%					3.9%			30.6%			100.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

«0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «-» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt auch für alle folgenden Abbildungen.

Abbildung 7-10: Externe Kosten infolge Waldschäden des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien

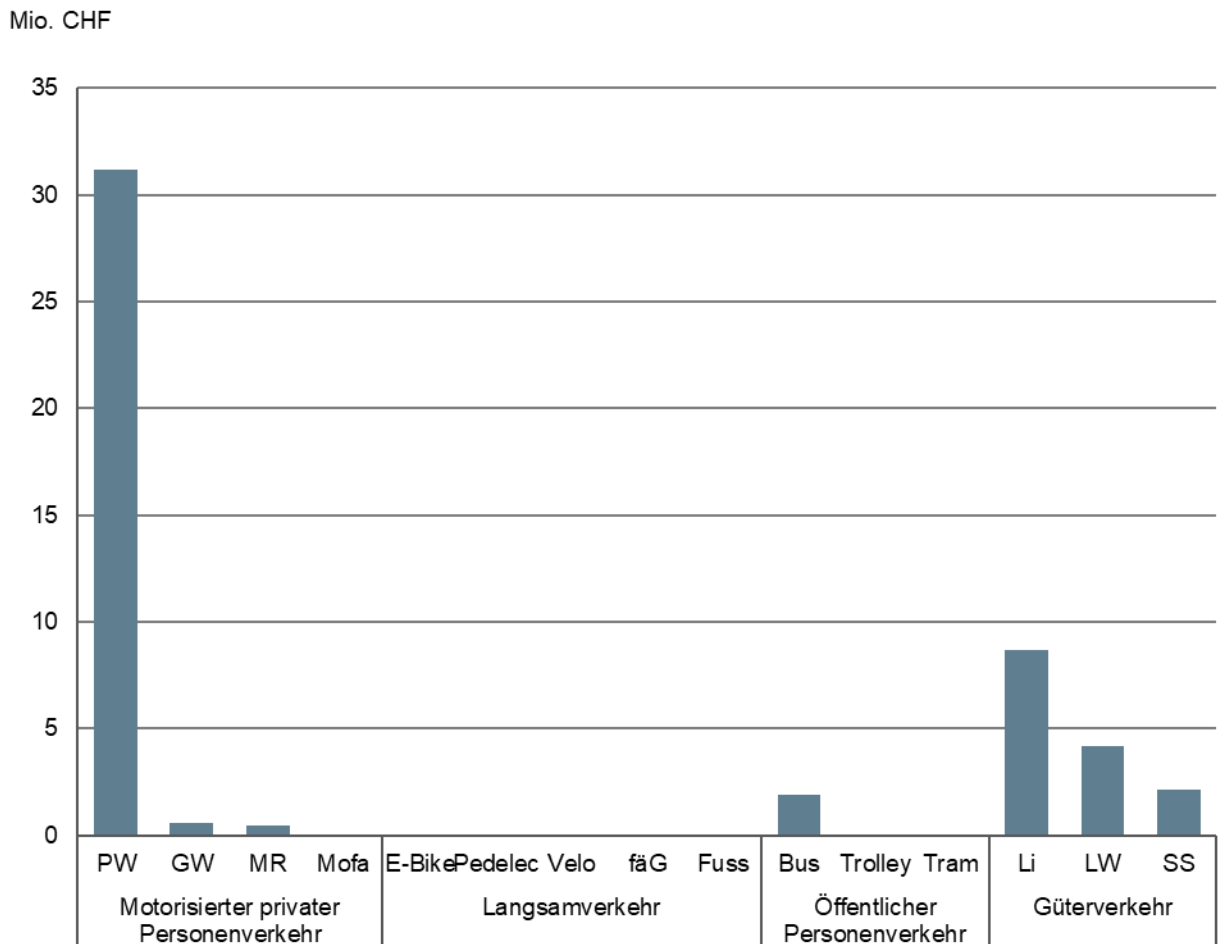


Abbildung 7-11 zeigt die externen Kosten infolge von Waldschäden des Strassenverkehrs differenziert nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten. 99.7% der Kosten (49 Mio. CHF) des Strassenverkehrs...

Abbildung 7-11: Externe Kosten infolge Waldschäden des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien und Antriebsart

in Mio. CHF	Motorisierter privater Personenverkehr				Personenverkehr					Öffentlicher Personenverkehr			Güterverkehr			Gesamt-total
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Fossil	31.1	0.6	0.4	0.0	-	-	-	-	-	1.8	-	-	8.7	4.2	2.1	49.0
Elektrisch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rest	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	0.0	0.0	0.0	0.1
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	31.2	0.6	0.4	0.0	-	-	-	-	-	1.9	-	-	8.7	4.2	2.1	49.1
Anteil Fossil	99.8%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	95.6%	0.0%	0.0%	100.0%	99.9%	99.9%	99.7%
Anteil Elektrisch	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Anteil Rest	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.3%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

PW = Personerwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

senverkehrs werden durch fossile Fahrzeuge verursacht. Elektrofahrzeuge verursachen keine NO_x-, NH₃- und SO₂-Emissionen und deshalb auch keine Waldschäden.

Abbildung 7-12 zeigt die kantonalen Anteile der externen Kosten des Strassenverkehrs infolge von Waldschäden. Den grössten Anteil der externen Kosten weist Zürich (knapp 15%) auf, gefolgt von Bern (12%) und Waadt (10.6%).

Abbildung 7-12: Externe Kosten infolge Waldschäden des Strassenverkehrs 2021 differenziert nach Fahrzeugkategorien und Kantone

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total	
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr		Li	LW		SS
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram				
Zürich	4.7	0.1	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.3	-	1.2	0.6	0.3	7.3
Bern	3.8	0.1	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	1.0	0.5	0.3	5.9
Luzern	1.6	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.4	0.2	0.1	2.5
Uri	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.1	0.0	0.5
Schwyz	0.7	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.2	0.1	0.0	1.0
Obwalden	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.2
Nidwalden	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.3
Glarus	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.3
Zug	0.5	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.7
Freiburg	1.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.2	0.1	1.8
Solothurn	1.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.2	0.1	1.8
Basel-Stadt	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.1	0.0	0.0	0.5
Basel-Landschaft	1.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.2	0.1	1.7
Schaffhausen	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.3
Appenzell A.Rh.	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.2
Appenzell I.Rh.	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.0
St. Gallen	2.4	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.8	0.3	0.2	3.8
Graubünden	0.8	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.1	0.1	1.4
Aargau	2.8	0.1	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	0.8	0.5	0.2	4.6
Thurgau	1.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.2	0.1	0.1	1.5
Tessin	1.8	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.5	0.3	0.1	2.8
Waadt	3.5	0.0	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	1.0	0.3	0.2	5.2
Wallis	1.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.1	0.1	1.7
Neuenburg	0.6	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.8
Genf	1.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	0.3	0.1	0.0	1.6
Jura	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.4
Total	31.2	0.6	0.4	0.0	-	-	-	-	-	1.9	-	8.7	4.1	2.1	49.1

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

c) Schienenverkehr

Der Schienenverkehr verursacht sehr geringe externe Kosten durch luftverschmutzungsbedingte Waldschäden, da fast kein NO_x, SO₂ und NH₃ emittiert wird. Im Jahr 2021 waren es 0.8 Mio. CHF. Der grösste Teil davon (79% bzw. 0.6 Mio. CHF) wird durch den Güterverkehr verursacht, weil im Güterverkehr deutlich mehr Dieselloks eingesetzt werden als im Personenverkehr.

Abbildung 7-13: Externe Kosten infolge Waldschäden des Schienenverkehrs 2021 differenziert nach Personen- und Güterverkehr und Kostenbestandteilen

	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
in Mio. CHF			
Vermindertes Holzwachstum (Ozon)	0.1	0.3	0.4
Vermindertes Holzwachstum (Versauerung)	0.1	0.2	0.3
Verstärkter Windwurf (Versauerung)	0.0	0.1	0.1
Total	0.2	0.6	0.8

Abbildung 7-14 zeigt die Aufteilung der externen Kosten durch Waldschäden nach Kantonen und Verkehrsart. Der Kanton Bern und Aargau weisen mit jeweils 16.2% der Gesamtkosten die höchsten Anteile auf. Die Kantone Tessin (9%), Waadt (8.2%) und Zürich (8.1%) folgen mit Anteilen knapp unter 10% der Gesamtkosten.

Abbildung 7-14: Externe Kosten infolge Waldschäden des Schienenverkehrs 2021 differenziert nach Personen- und Güterverkehr sowie Kantonen

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich	0.025	0.037	0.062
Bern	0.026	0.097	0.123
Luzern	0.006	0.007	0.013
Uri	0.002	0.021	0.022
Schwyz	0.004	0.026	0.030
Obwalden	0.001	0.000	0.001
Nidwalden	0.001	0.000	0.001
Glarus	0.001	0.003	0.004
Zug	0.002	0.006	0.008
Freiburg	0.006	0.005	0.012
Solothurn	0.005	0.040	0.045
Basel-Stadt	0.001	0.005	0.006
Basel-Landschaft	0.004	0.025	0.030
Schaffhausen	0.001	0.000	0.002
Appenzell A.Rh.	0.001	0.000	0.001
Appenzell I.Rh.	0.000	-	0.000
St. Gallen	0.009	0.016	0.025
Graubünden	0.007	0.028	0.036
Aargau	0.013	0.110	0.123
Thurgau	0.005	0.010	0.015
Tessin	0.005	0.063	0.068
Waadt	0.015	0.047	0.062
Wallis	0.008	0.034	0.042
Neuenburg	0.003	0.015	0.018
Genf	0.002	0.004	0.006
Jura	0.002	0.001	0.002
Total	0.2	0.6	0.8

d) Luftverkehr

Auch die externen Kosten des Luftverkehrs infolge von Waldschäden sind sehr tief. Im Jahr 2021 betrugen diese Schäden 1.4 Mio. CHF, wovon der überwiegende Teil durch den Personenverkehr verursacht wird. 92% dieser Kosten fallen an Landesflughäfen an. Teilt man die Kosten auf die einzelnen Flugarten auf, sind 93% dem Linien- und Charterverkehr zuzuordnen, die Kosten der Helikopter sind vernachlässigbar klein und die General Aviation, sowie die Business Aviation verursachen je rund 4% der Kosten.

Abbildung 7-15: Externe Kosten infolge Waldschäden des Luftverkehrs 2021 differenziert nach Personen- und Güterverkehr und Kostenbestandteilen

	Personen-verkehr	Güter-verkehr	Total
in Mio. CHF			
Vermindertes Holzwachstum (Ozon)	0.7	0.1	0.8
Vermindertes Holzwachstum (Versauerung)	0.4	0.1	0.5
Verstärkter Windwurf (Versauerung)	0.1	0.0	0.1
Total	1.2	0.2	1.4

Abbildung 7-16: Externe Kosten infolge Waldschäden des Luftverkehrs 2021 differenziert nach Flugart und Infrastrukturtyp

	Landesflughäfen	Regionalflughäfen	Total
in Mio. CHF			
Linien- und Charterverkehr interkontinental	0.4	-	0.4
Linien- und Charterverkehr europäisch	0.9	0.0	0.9
Helikopter	0.0	0.0	0.0
Business Aviation	0.0	0.0	0.1
Rest General Aviation	0.0	0.0	0.1
Total	1.3	0.0	1.4

e) Schiffsverkehr

Der Schiffsverkehr verursachte im Jahr 2021 externe Kosten durch Waldschäden im Umfang von 3.5 Mio. CHF. Davon entfallen 40% (1.4 Mio. CHF) auf die öffentliche Personenschifffahrt und der Rest auf den Güterverkehr.

Abbildung 7-17: Externe Kosten infolge Waldschäden des Schiffsverkehrs 2021 differenziert nach Personen- und Güterverkehr und Kostenbestandteilen

	Personen-verkehr	Güter-verkehr	Total
in Mio. CHF			
Vermindertes Holzwachstum (Ozon)	0.8	1.2	2.0
Vermindertes Holzwachstum (Versauerung)	0.5	0.7	1.2
Verstärkter Windwurf (Versauerung)	0.1	0.2	0.3
Total	1.4	2.1	3.5

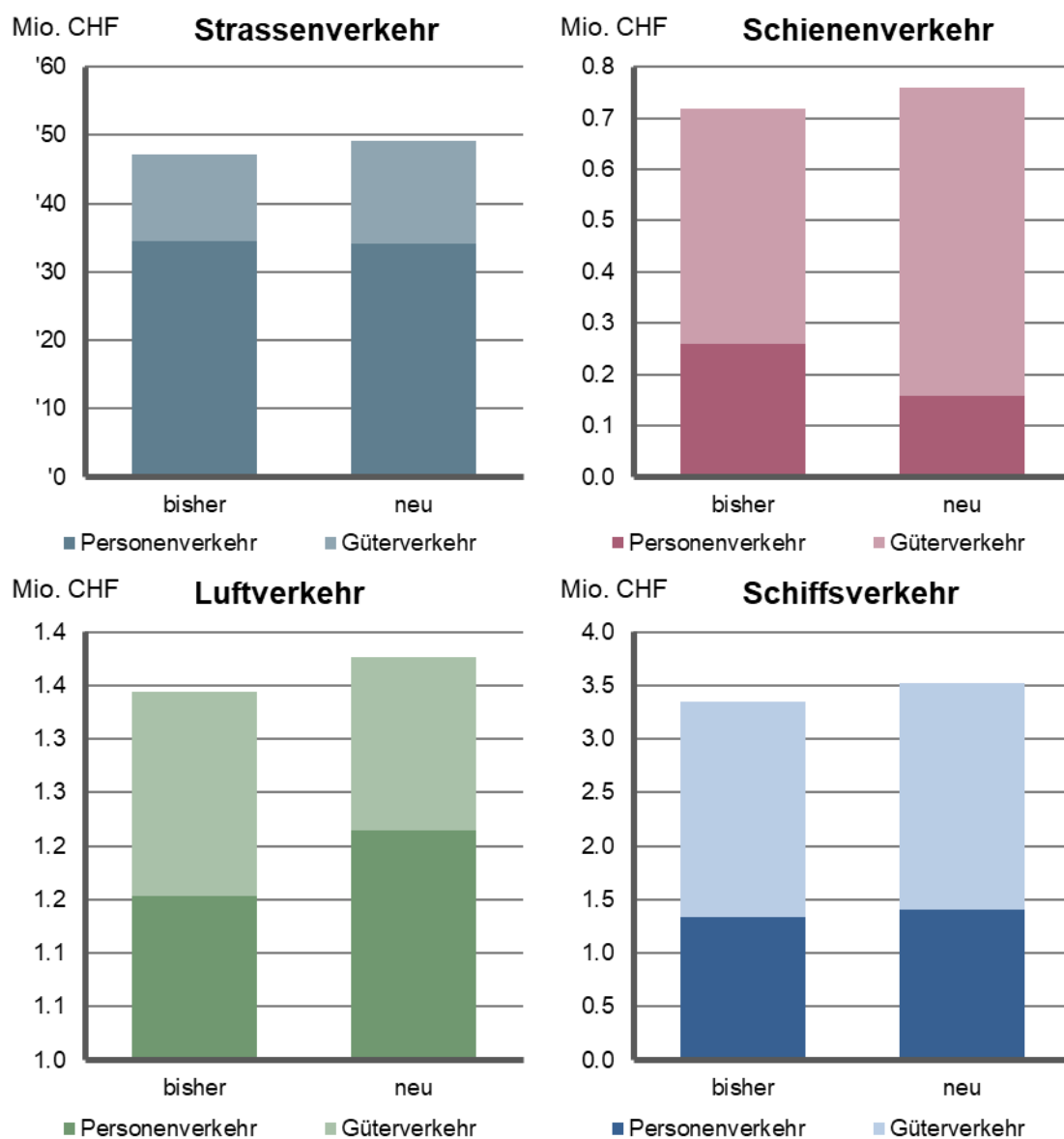
7.8 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse ist für diesen Kostenbereich nicht vorgesehen, da der Anteil der externen Kosten infolge von Waldschäden durch Luftverschmutzung an den Gesamtkosten mit 0.3% unter 10% liegt. In Bezug auf die Frage, in welcher Bandbreite die externen Kosten des Verkehrs aufgrund von Unsicherheiten schwanken, ist dieser Kostenbereich daher von untergeordneter Bedeutung.

7.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen grafisch und tabellarisch den Vergleich der externen Kosten infolge von Waldschäden durch Ozonbelastung und Versauerung für das Jahr 2021 basierend auf dem Vergleich der aktualisierten Berechnungen mit den Ergebnissen der bisherigen Berechnungsmethodik. Der Vergleich zeigt den Effekt der neuen Datengrundlagen und leichten Anpassungen in der Berechnungsmethodik. Insgesamt haben die Waldschäden gegenüber den bisherigen Berechnungen um knapp 4.3% zugenommen. An der Berechnungsmethodik der externen Kosten infolge Waldschäden führt vor allem der Ausschluss der Jahre 2020 und 2021 bei der Berechnung der Ozonbelastung zu höheren Schadenswerten, denn diese beiden Jahre wiesen pandemiebedingt sehr tiefe Ozonbelastungen auf. Die Aktualisierung der Datengrundlage führte zusätzlich zu leichten Veränderungen. Insbesondere im Strassenverkehr trug die Berechnung der Luftschadstoffemissionen mittels aktualisierter Emissionsfaktoren zu einem geringeren Anteil bei.

Abbildung 7-18: Vergleich der Berechnungen der externen Kosten infolge Waldschäden basierend auf der ursprünglichen und überarbeiteten Berechnungsmethodik 2021



Achtung: Die Skalen der vier Verkehrsträger sind unterschiedlich

Abbildung 7-19: Überblick und Vergleich der Berechnungen für die externen Kosten infolge Waldschäden basierend auf den alten und den neuen Datengrundlagen sowie Methodik

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	34.60	12.52	47.1
Schienenverkehr	0.3	0.5	0.7
Luftverkehr	1.2	0.2	1.3
Schiffsverkehr	1.3	2.0	3.3
Total	37.3	15.2	52.5
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	34.1	15.0	49.1
Schienenverkehr	0.2	0.6	0.8
Luftverkehr	1.2	0.2	1.4
Schiffsverkehr	1.4	2.1	3.5
Total	36.9	17.8	54.8
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	-1.4%	19.5%	4.2%
Schienenverkehr	-39.1%	30.7%	5.5%
Luftverkehr	5.4%	-15.2%	2.5%
Schiffsverkehr	5.5%	5.5%	5.5%
Total	-1.2%	17.6%	4.3%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	-0.5	2.4	2.0
Schienenverkehr	-0.1	0.1	0.0
Luftverkehr	0.1	-0.0	0.0
Schiffsverkehr	0.1	0.1	0.2
Total	-0.4	2.7	2.2

8 Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung

8.1 Berechnungsgegenstand

Der Eintrag von Luftschadstoffen in die Umwelt kann zu Eutrophierung (Überdüngung) und Versauerung natürlicher Ökosysteme (Böden, Gewässer etc.) führen. Eutrophierung und Versauerung führen wiederum zu Biodiversitätsverlusten in diesen Ökosystemen:

- Der Eintrag von stickstoffhaltigen Luftschadstoffen wie Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH_3) führt zu einer Düngung von Böden und Gewässern. Diese Düngung (Eutrophierung) hat beispielsweise bei Landökosystemen einen negativen Einfluss auf die Biodiversität. Denn nährstoffreiche Habitate weisen häufig eine reduzierte Artenzahl auf als nährstoffarme Standorte. Grund dafür ist die hohe Konkurrenzfähigkeit einiger nährstoffliebender Arten, welche die übrigen Arten verdrängen. Insgesamt führt deshalb die Eutrophierung von Ökosystemen zu einem Biodiversitätsverlust.
- Säurebildende Luftschadstoffe wie Schwefeldioxid (SO_2), Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH_3) führen zu einer Versauerung der Böden und Gewässer. Ähnlich wie die Eutrophierung hat auch die Versauerung einen negativen Einfluss auf die Biodiversität: Auf versauerten Böden ist das Gedeihen vieler grundsätzlich standorttypischer Pflanzenarten gehemmt. Auf diese Weise führt die Versauerung zu einem Biodiversitätsverlust.

Das vorliegende Kapitel fokussiert auf die Biodiversitätsverluste infolge des Eintrags von versauernden und eutrophierenden Luftschadstoffen.

Es ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass Biodiversitätsverluste auch durch andere Umweltbelastungen verursacht werden können, z.B. durch die Versiegelung oder Zerschneidung natürlicher Ökosysteme. Jene Biodiversitätsverluste sind jedoch nicht Teil des vorliegenden Kapitels, sondern sind im Kapitel 12 (Natur und Landschaft) abgedeckt.

8.2 Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen

Die Berechnung der Kosten der Biodiversitätsverluste basiert auf der Methodik, die bereits im Bericht für das Jahr 2010²¹⁶ verwendet wurde und damit auf den Resultaten des EU-Forschungsprojekts NEEDS (New Energy Externalities Development for Sustainability) basiert. In diesem Rahmen wurde eine Methodik basierend auf dem Ersatzkostenansatz entwickelt,²¹⁷ um die Auswirkungen der Emissionen von versauernden und eutrophierenden Luftschadstoffen wie NO_x , NH_3 und SO_2 auf die Biodiversität berechnen zu können. Resultat der Studie sind spezifische Kostensätze für die externen Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge von Luftschadstoffemissionen.²¹⁸ Ausgewiesen werden Kostensätze pro emittierter Tonne NO_x , NH_3 und SO_2 für alle Länder der EU-28 plus einige weitere Länder wie die Schweiz. Die hier angewandte Berechnung greift direkt auf die

²¹⁶ Ecoplan; INFRAS (2014)

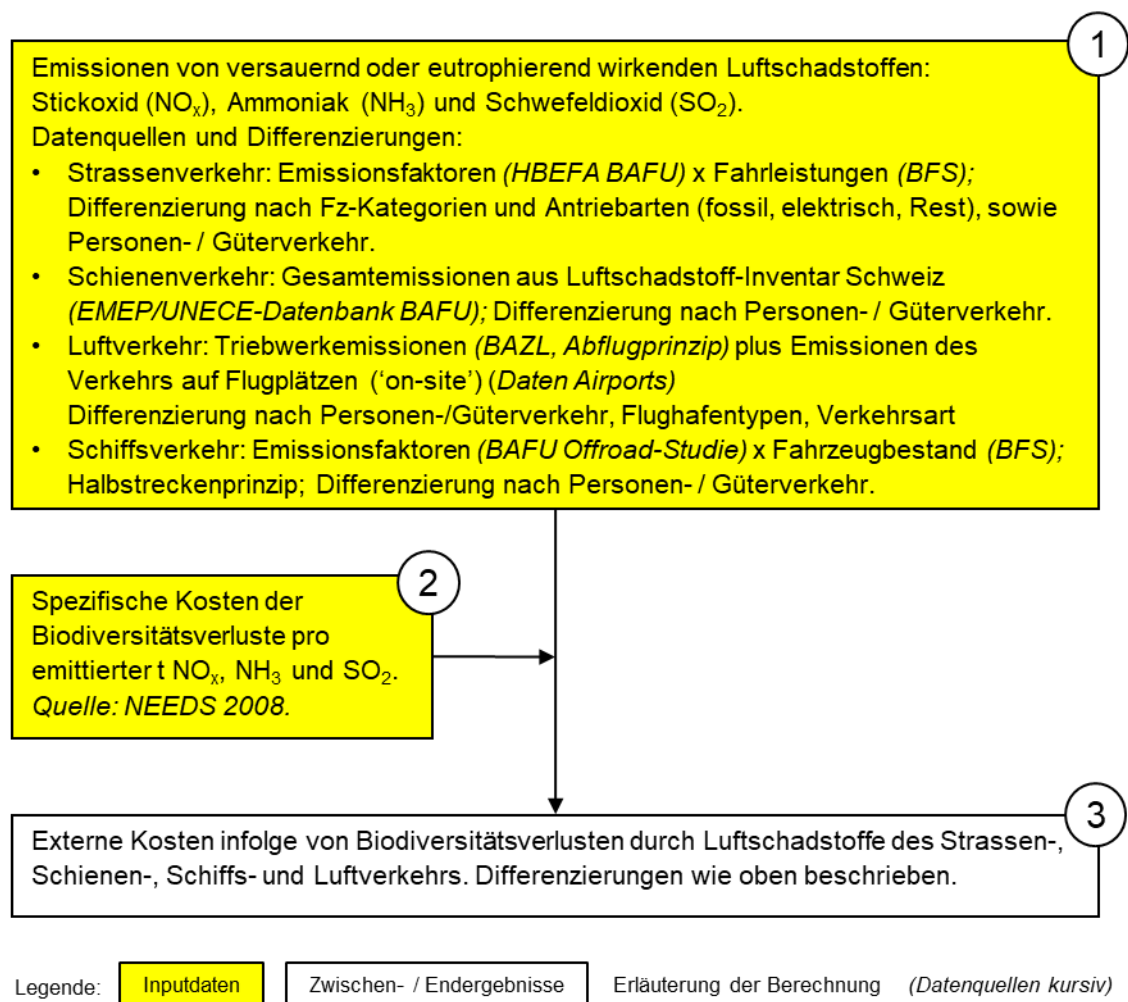
²¹⁷ Ott; Baur; Kaufmann; u. a. (2006)

²¹⁸ NEEDS (2008)

spezifischen Kostensätze pro emittierte Menge Luftschadstoffe zurück. Für einen detaillierten Exkurs zur NEEDS-Methodik verweisen wir auf den Bericht zu den externen Kosten und Nutzen des Verkehrs für das Jahr 2010.²¹⁹

Abbildung 8-1 zeigt die Bewertungsmethodik im Detail. Für die Berechnungen werden zwei zentrale Inputgrössen benötigt. Zum einen sind Emissionsmengen der versauernden und/oder eutrophierenden Luftschadstoffe Stickoxid (NO_x), Ammoniak (NH_3) und Schwefeldioxid (SO_2) nötig (Schritt 1). Die detaillierten Informationen zu den Datenquellen der Emissionsmengen sind im Kapitel 8.3 aufgeführt. Zum anderen werden für die Monetarisierung Kostensätze pro Tonne NO_x , NH_3 und SO_2 angewandt, die auf den Ergebnissen von NEEDS basieren (Schritt 2). Auf diese Weise resultieren die externen Kosten infolge von Biodiversitätsverlusten durch Luftschadstoffemissionen des Verkehrs (3).

Abbildung 8-1: Bewertungsmethodik Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung



²¹⁹ Ecoplan; INFRAS (2014)

8.3 Mengengerüst

8.3.1 Emissionen von versauernden und eutrophierenden Luftschadstoffen

Als Mengengerüst dienen die aktuellen Emissionsdaten für NO_x (Stickoxide), NH₃ (Ammoniak) und SO₂ (Schwefeldioxid) der verschiedenen Verkehrsträger, die in Kapitel 20.2 detailliert beschrieben sind. Die folgenden Abbildungen zeigen die in der vorliegenden Studie verwendeten Emissionsmengen der vier Verkehrsträger.

Abbildung 8-2: NO_x-, NH₃- und SO₂-Emissionen des Strassenverkehrs 2021

Luftschadstoff t/a	Motorisierter privater Personenverkehr				Personenverkehr Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr			Güterverkehr			Gesamt- total
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
NH ₃	739	2	4	0	-	-	-	-	-	4	-	-	31	14	13	806
NO _x	14843	271	214	3	-	-	-	-	-	939	-	-	4'224	2'012	1'015	23'520
SO ₂	36	0	1	0	-	-	-	-	-	1	-	-	5	4	4	52

Quelle: siehe Kapitel 20.2

Abbildung 8-3: NO_x-, NH₃- und SO₂-Emissionen des Schienenverkehrs 2021

Luftschadstoff	t/a	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
NH ₃		0.0	0.1	0.1
NO _x		76.9	292.3	369.2
SO ₂		0.0	0.1	0.1

Quelle: siehe Kapitel 20.2

Abbildung 8-4: NO_x-, NH₃- und SO₂-Emissionen des Luftverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr (gemäss Halbstreckenprinzip)

Luftschadstoff	t/a	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
NH ₃		-	-	-
NO _x		576.6	76.5	653.2
SO ₂		35.4	4.7	40.1

Quelle: Siehe Kapitel 20.2

Abbildung 8-5: NO_x- und SO₂-Emissionen des Luftverkehrs 2021 nach Flugart und Infrastrukturtyp

Luftschadstoff	Flugart	Landesflughäfen	Regionalf Flughäfen	Total
t/a				
NO _x	Business Aviation	18.01	8.01	26
	Helikopter	0.02	0.17	0
	Linien- und Charterverkehr europäisch	412.86	1.83	415
	Linien- und Charterverkehr interkontinental	186.17	-	186
	Rest General Aviation	15.80	10.27	26
SO ₂	Business Aviation	1.11	0.49	2
	Helikopter	0.00	0.01	0
	Linien- und Charterverkehr europäisch	25.33	0.11	25
	Linien- und Charterverkehr interkontinental	11.42	-	11
	Rest General Aviation	0.97	0.63	2

Quelle: Siehe Kapitel 20.2

Abbildung 8-6: NO_x-, NH₃- und SO₂-Emissionen des Schiffsverkehrs 2021

Luftschadstoff	Personen- verkehr t/a	Güter- verkehr	Total
NH ₃	0.1	0.2	0.3
NO _x	683.4	1'031.7	1'715.1
SO ₂	0.7	1.0	1.7

Quelle: Siehe Kapitel 20.2

8.4 Wertgerüst

8.4.1 Kostensätze pro Tonne Luftschadstoff

Die Grundlage für die Monetarisierung bilden die Kostensätze aus dem EU-Projekt NEEDS.²²⁰ In der NEEDS-Studie erfolgte die Monetarisierung basierend auf Ersatzkosten.

Die folgende Abbildung zeigt die Kostensätze für die Schweiz für das Jahr 2000 (in EUR₂₀₀₀/t) sowie die für die vorliegende Studie verwendeten Kostensätze in CHF für das Jahr 2021 (CHF₂₀₂₁/t). Die Umrechnung in Schweizer Franken erfolgt auf Basis des mittleren Wechselkurses des Jahres 2000. Anschliessend werden die Kostensätze vom Jahr 2000 auf das Jahr 2021 mit der Konsumentenpreisentwicklung der Schweiz fortgeschrieben. In Kapitel 20.4 wird die monetäre Aktualisierung und Übertragung von Werten detailliert beschrieben.

²²⁰ NEEDS (2008)

Abbildung 8-7: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung: Kosten pro Tonne Luftschadstoff (NO_x, NH₃, SO₂)

Kostensätze pro emittierte Tonne	EUR ₂₀₀₀ pro Tonne (Originaldaten NEEDS 2008)	CHF ₂₀₂₁ pro Tonne (angepasste Daten 2021)
NO _x	1'690	2'821
NH ₃	8'767	14'636
SO ₂	544	908

Quelle: NEEDS sowie eigene Berechnung. Die Umrechnung der Kostensätze von EUR₂₀₀₀ in CHF₂₀₂₁ ist im obigen Abschnitt beschrieben.

8.5 Vorgehen bei Differenzierungen

8.5.1 Differenzierung nach Antriebsart

Die Differenzierungen nach Antriebsart für den Strassenverkehr wird wie im Kapitel 2.3 beschrieben berechnet, d.h. über spezifische Emissionsfaktoren je Fahrzeugkategorie und Antriebsart und anhand der jeweiligen Anteile an der Fahrleistung (Kapitel 20.2.1 und Kapitel 20.1.6).

8.5.2 Differenzierung nach Kantonen

Die Differenzierung nach Kantonen für den Strassen- und Schienenverkehr wird anhand der kantonalen Anteile der hier relevanten Luftschadstoff-Emissionen berechnet. Diese beruhen im Strassenverkehr auf den kantonalen Fahrleistungsanteilen, wenn vorhanden differenziert für Autobahn, innerorts und ausserorts und den entsprechenden Emissionsfaktoren (siehe Kapitel 20.1.5). Im Schienenverkehr beruht die kantonale Differenzierung auf den Fahrleistungsanteilen je Kanton für den Personen- und Güterverkehr.

8.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

Die externen Kosten durch Biodiversitätsverluste werden im vorliegenden Bericht anhand von Kostensätzen je Tonne Luftschadstoff berechnet und sind damit eine lineare Funktion der Schadstoffemissionsmenge. Die hier berechneten Durchschnittskosten verursacht durch Biodiversitätsverluste entsprechen somit den Grenzkosten.

8.7 Ergebnisse

8.7.1 Externe Kosten

a) Überblick Gesamtverkehr

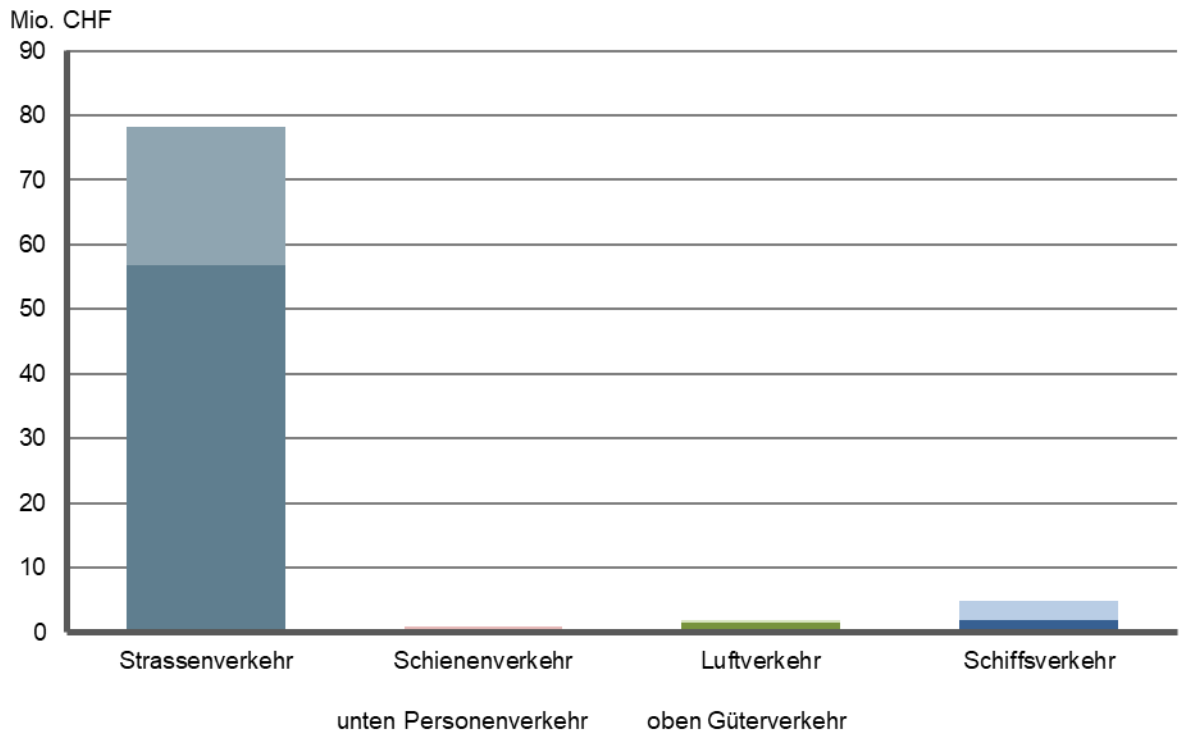
Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die gesamten externen Kosten²²¹ durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung im Jahr 2021 nach Verkehrsträgern. Die Gesamtkosten des Verkehrs betrugen 2021 **86 Mio. CHF**. Davon verursachte der Strassenverkehr 91% bzw. 78.2 Mio. CHF, der Schienenverkehr 1.2% und der Luftverkehr 2.2% und der Schiffsverkehr 5.6%. In absoluten Zahlen verursachen die letztgenannten drei Verkehrsträger zusammen weniger als 8 Mio. CHF pro Jahr an Biodiversitätsverlusten durch Luftschadstoffemissionen.

Abbildung 8-8: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung für das Jahr 2021 nach Verkehrsträgern differenziert

	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
in Mio. CHF				
Strassenverkehr	56.9	21.3	78.2	91.0%
Schienenverkehr	0.2	0.8	1.0	1.2%
Luftverkehr	1.7	0.2	1.9	2.2%
Schiffsverkehr	1.9	2.9	4.8	5.6%
Total	60.7	25.3	86.0	100.0%
in % des Totals	70.6%	29.4%	100.0%	

²²¹ Bei dieser Kostenkategorie entsprechen die externen den sozialen Kosten, da es keinen Internalisierungsbeitrag gibt. Zudem sind die externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende und aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr genau gleich hoch.

Abbildung 8-9: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung 2021



b) Strassenverkehr

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Aufteilung der Biodiversitätsverluste durch Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs auf die einzelnen Fahrzeugkategorien. 54.2 Mio. CHF bzw. 69.2% der Kosten des Strassenverkehrs werden durch den motorisierten privaten Personenverkehr verursacht (davon 52.7 Mio. CHF durch die Personenwagen). Linienbusse sind verantwortlich für 3.5% der Kosten bzw. 2.7 Mio. CHF und der Güterverkehr für 21.3 Mio. CHF (27.3%). Beim Strassenverkehr ist das Stickoxid mit knapp 85% die Hauptursache der Kosten, gefolgt vom Ammoniak (15%), während der Anteil des Schwefeldioxids bei 0.06% liegt.

Abbildung 8-10: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien sowie Luftschadstoff

in Mio. CHF	Personenverkehr									Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS
NOx	41.9	0.8	0.6	0.0	-	-	-	-	-	2.6	-	-	11.9	5.7	2.9
NH3	10.8	0.0	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	-	0.5	0.2	0.2
SO2	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	-	0.0	0.0	0.0
Total	52.7	0.8	0.7	0.0	-	-	-	-	-	2.7	-	-	12.4	5.9	3.1
in % des Gesamttotals	67.4%	1.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.5%	0.0%	0.0%	15.8%	7.5%	3.9%
Total Teilbereiche	54.2				0.0				2.7			21.3			78.2
in % des Gesamttotals	69.3%				0.0%				3.5%			27.3%			100.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

«0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «-» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt auch für alle folgenden Abbildungen.

Abbildung 8-11: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung 2021 nach Fahrzeugkategorien

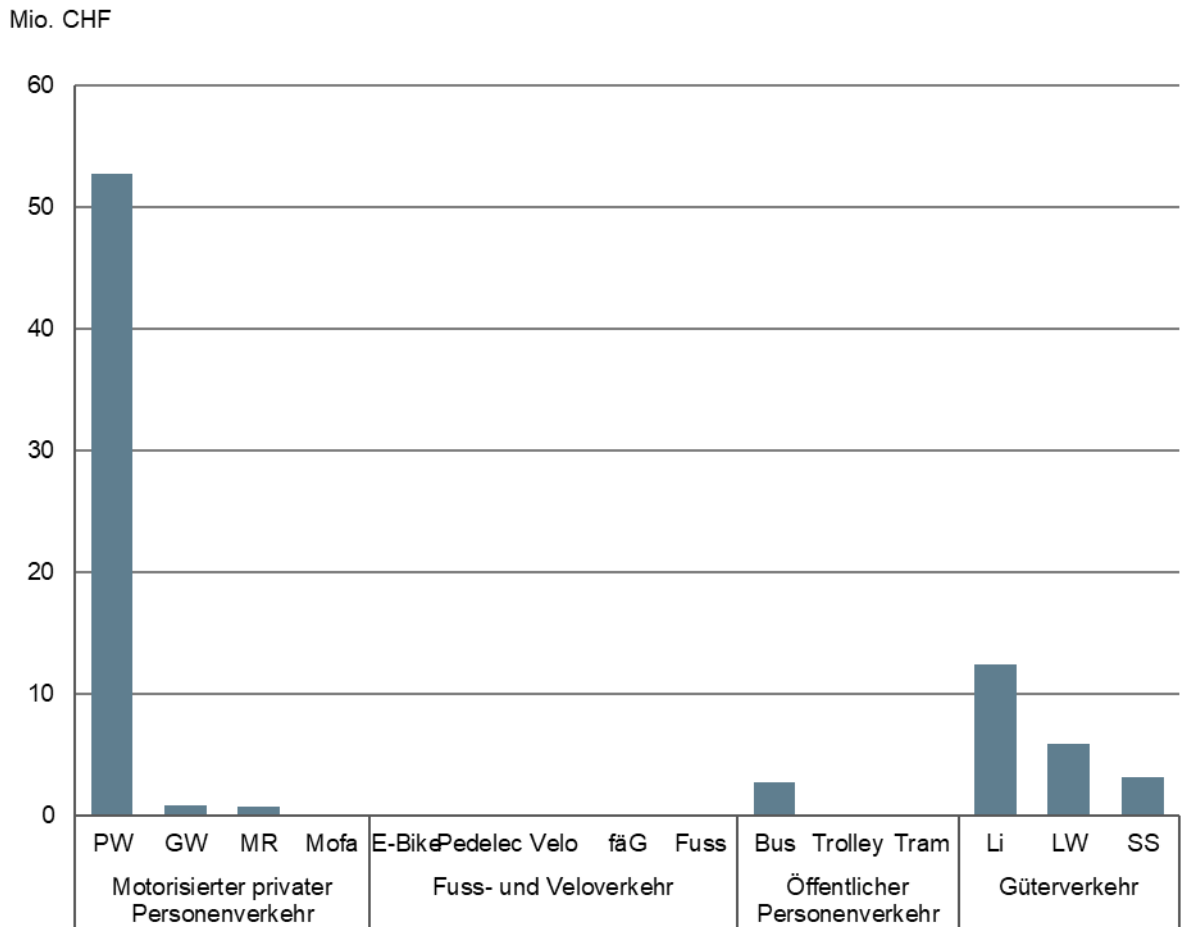


Abbildung 8-12 zeigt die externen Kosten infolge von Biodiversitätsverlusten des Strassenverkehrs differenziert nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten. 99.6% der Kosten des Strassenverkehrs

Abbildung 8-12: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten

in Mio. CHF	Motorisierter privater Personenverkehr				Personenverkehr								Güterverkehr			Gesamt- total
					Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Fossil	52.5	0.8	0.7	0.0	-	-	-	-	-	2.6	-	-	12.4	5.9	3.1	77.9
Elektrisch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rest	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	0.0	0.0	0.0	0.3
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	52.7	0.8	0.7	0.0	-	-	-	-	-	2.7	-	-	12.4	5.9	3.1	78.2
Anteil Fossil	99.6%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	95.7%	0.0%	0.0%	99.9%	99.9%	99.9%	99.6%
Anteil Elektrisch	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Anteil Rest	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	0.0%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.4%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
PW = Personenw agen, GW = Gesellschaftsw agen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeu gähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferw agen, LW = Lastw agen, SS = Sattelschlepper.																

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

werden durch fossile Fahrzeuge verursacht. Elektrofahrzeuge verursachen keine Kosten, da Emissionen dieser Luftschadstoffe durch Verbrennungsprozesse entstehen.

Abbildung 8-13 zeigt die kantonalen Anteile der externen Kosten des Strassenverkehrs infolge Biodiversitätsverluste. Den grössten Anteil der externen Kosten weist Zürich (knapp 15%) auf, gefolgt von Bern (12%) und Waadt (10.7%).

Abbildung 8-13: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung des Strassenverkehrs 2021 differenziert nach Fahrzeugkategorien und Kantone

	Personenverkehr									Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr						
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
Zürich	7.9	0.1	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.5	-	1.8	0.8	0.4	11.6
Bern	6.4	0.1	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.3	-	1.5	0.7	0.4	9.4
Luzern	2.7	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	0.6	0.3	0.2	4.0
Uri	0.4	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.1	0.1	0.8
Schwyz	1.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.3	0.1	0.1	1.7
Obwalden	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.3
Nidwalden	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.1	0.0	0.5
Glarus	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.5
Zug	0.8	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.2	0.1	0.0	1.1
Freiburg	2.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.4	0.2	0.1	2.9
Solothurn	1.8	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.4	0.3	0.2	2.9
Basel-Stadt	0.5	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.1	0.1	0.0	0.8
Basel-Landschaft	1.7	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.4	0.3	0.1	2.7
Schaffhausen	0.3	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.5
Appenzell A.Rh.	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.3
Appenzell I.Rh.	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.1
St. Gallen	4.0	0.1	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	1.1	0.4	0.2	6.1
Graubünden	1.4	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.4	0.2	0.1	2.3
Aargau	4.7	0.1	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	1.2	0.7	0.3	7.3
Thurgau	1.6	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.3	0.2	0.1	2.3
Tessin	3.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.7	0.4	0.2	4.5
Waadt	5.9	0.1	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	1.4	0.5	0.2	8.4
Wallis	1.8	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.4	0.2	0.1	2.7
Neuenburg	1.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.2	0.1	0.0	1.3
Genf	1.8	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.2	-	0.4	0.1	0.0	2.6
Jura	0.5	0.0	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.7
Total	52.7	0.8	0.7	0.0	-	-	-	-	-	2.7	-	12.4	5.9	3.1	78.2

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

c) Schienenverkehr

Der Schienenverkehr verursacht lediglich minime externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge von Luftverschmutzung. Für das Jahr 2021 sind es 1.0 Mio. CHF, wovon der grösste Teil auf den Güterverkehr entfällt (0.8 Mio. CHF). Der Grund dafür liegt darin, dass im Güterverkehr deutlich mehr Dieselloks eingesetzt werden als im Personenverkehr. Die Kosten stammen fast ausschliesslich (zu 99.9%) aus den Emissionen von Stickoxiden (NO_x).

Abbildung 8-14: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung des Schienenverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr sowie Luftschadstoff

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
NOx		0.2	0.8	1.0
NH3		0.0	0.0	0.0
SO2		0.0	0.0	0.0
Total		0.2	0.8	1.0

Abbildung 8-17 zeigt die Aufteilung der externen Kosten durch Biodiversitätsverluste nach Kantonen sowie Verkehrsart. Der Kanton Bern und Aargau weisen mit jeweils 16.2% der Gesamtkosten die höchsten Anteile auf. Die Kantone Tessin (9%), Waadt (8.2%) und Zürich (8.1%) folgen mit Anteilen knapp unter 10% der Gesamtkosten.

Abbildung 8-15: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung des Schienenverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr, sowie Kantone

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich	0.034	0.051	0.085
Bern	0.036	0.133	0.169
Luzern	0.009	0.009	0.018
Uri	0.002	0.029	0.031
Schwyz	0.006	0.036	0.041
Obwalden	0.001	0.000	0.001
Nidwalden	0.001	0.000	0.001
Glarus	0.002	0.004	0.006
Zug	0.003	0.009	0.012
Freiburg	0.008	0.008	0.016
Solothurn	0.007	0.055	0.062
Basel-Stadt	0.001	0.007	0.008
Basel-Landschaft	0.006	0.035	0.041
Schaffhausen	0.002	0.001	0.003
Appenzell A.Rh.	0.001	0.000	0.001
Appenzell I.Rh.	0.001	-	0.001
St. Gallen	0.012	0.022	0.035
Graubünden	0.010	0.039	0.049
Aargau	0.018	0.151	0.169
Thurgau	0.007	0.013	0.021
Tessin	0.007	0.087	0.094
Waadt	0.021	0.065	0.085
Wallis	0.011	0.047	0.058
Neuenburg	0.004	0.021	0.025
Genf	0.003	0.005	0.008
Jura	0.002	0.001	0.003
Total	0.2	0.8	1.0

d) Luftverkehr

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung der Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung auf den Personen- und Güterverkehr sowie die einzelnen Luftschadstoffe. Von den insgesamt 1.9 Mio. CHF werden knapp 90% durch den Linien- und Charterverkehr verursacht und 10% durch die General Aviation (inkl. Business Aviation). Gut 98% der Kosten werden durch die NO_x-Emissionen verursacht, 2% durch das SO₂.

Abbildung 8-16: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung des Luftverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr sowie Luftschadstoff (Halbstreckenprinzip)

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
NOx		1.6	0.2	1.8
NH3		-	-	-
SO2		0.0	0.0	0.0
Total		1.7	0.2	1.9

Abbildung 8-17: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung des Luftverkehrs 2021 nach Flugart und Infrastrukturtyp

	in Mio. CHF	Landesflughäfen	Regionalflughäfen	Total
Linien- und Charterverkehr interkontinental		0.5	-	0.5
Linien- und Charterverkehr europäisch		1.2	0.0	1.2
Helikopter		0.0	0.0	0.0
Business Aviation		0.1	0.0	0.1
Rest General Aviation		0.0	0.0	0.1
Total		1.8	0.1	1.9

e) Schiffsverkehr

Die externen Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftschadstoffemissionen des Schiffsverkehrs betragen im Jahr 2021 knapp 5 Mio. CHF. Davon werden 40% durch Personenschiffahrt verursacht, der Rest durch den Güterverkehr auf dem Rhein sowie den Seen (inkl. Fischer- und Arbeitsboote). Die Kosten werden fast ausschliesslich durch die NO_x-Emissionen verursacht (99.9%).

Abbildung 8-18: Externe Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftverschmutzung des Schiffsverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr sowie Luftschadstoff

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
NOx		1.9	2.9	4.8
NH3		0.0	0.0	0.0
SO2		0.0	0.0	0.0
Total		1.9	2.9	4.8

8.8 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse ist für diesen Kostenbereich nicht vorgesehen, da der Anteil der externen Kosten durch Biodiversitätsverluste an den Gesamtkosten mit 0.3% unter 10% liegt. In Bezug auf die Frage, in welcher Bandbreite die externen Kosten des Verkehrs aufgrund von Unsicherheiten schwanken, ist dieser Kostenbereich von untergeordneter Bedeutung.

8.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen grafisch und tabellarisch den Vergleich der externen Kosten durch Biodiversitätsverluste infolge Luftschadstoffemissionen für das Jahr 2021 auf Basis der aktualisierten Berechnung mit den Ergebnissen der bisherigen Berechnungsmethodik. Der Vergleich zeigt den Effekt der neuen Datengrundlagen. An der Berechnungsmethodik der externen Kosten infolge Biodiversitätsverluste wurden keine Änderungen vorgenommen. Im Zuge der Aktualisierung wurde jedoch die Fortschreibung der Kostensätze korrigiert, die in der ursprünglichen Methodik einen Fehler enthielt. Dies führt zu leicht tieferen Kostensätzen. Zusätzlich führen die aktualisierten Datengrundlagen zu leichten Veränderungen. Insbesondere im Strassenverkehr führte die Berechnung der Luftschadstoff-Emissionen mittels aktualisierter Emissionsfaktoren zu einer zusätzlichen Verringerung der Kosten von knapp 3%. Im Schienenverkehr ist eine Verschiebung des Verhältnisses zwischen Personen- und Güterverkehr zu beobachten, da für die Emissionszuordnung in der Aktualisierung nicht nur die eingesetzten Dieselloks der SBB, sondern auch die von SBB Cargo berücksichtigt wurden.

Abbildung 8-19: Vergleich der Berechnungen für die externen Kosten infolge Biodiversitätsverluste basierend auf den alten und den neuen Datengrundlagen sowie Methodik

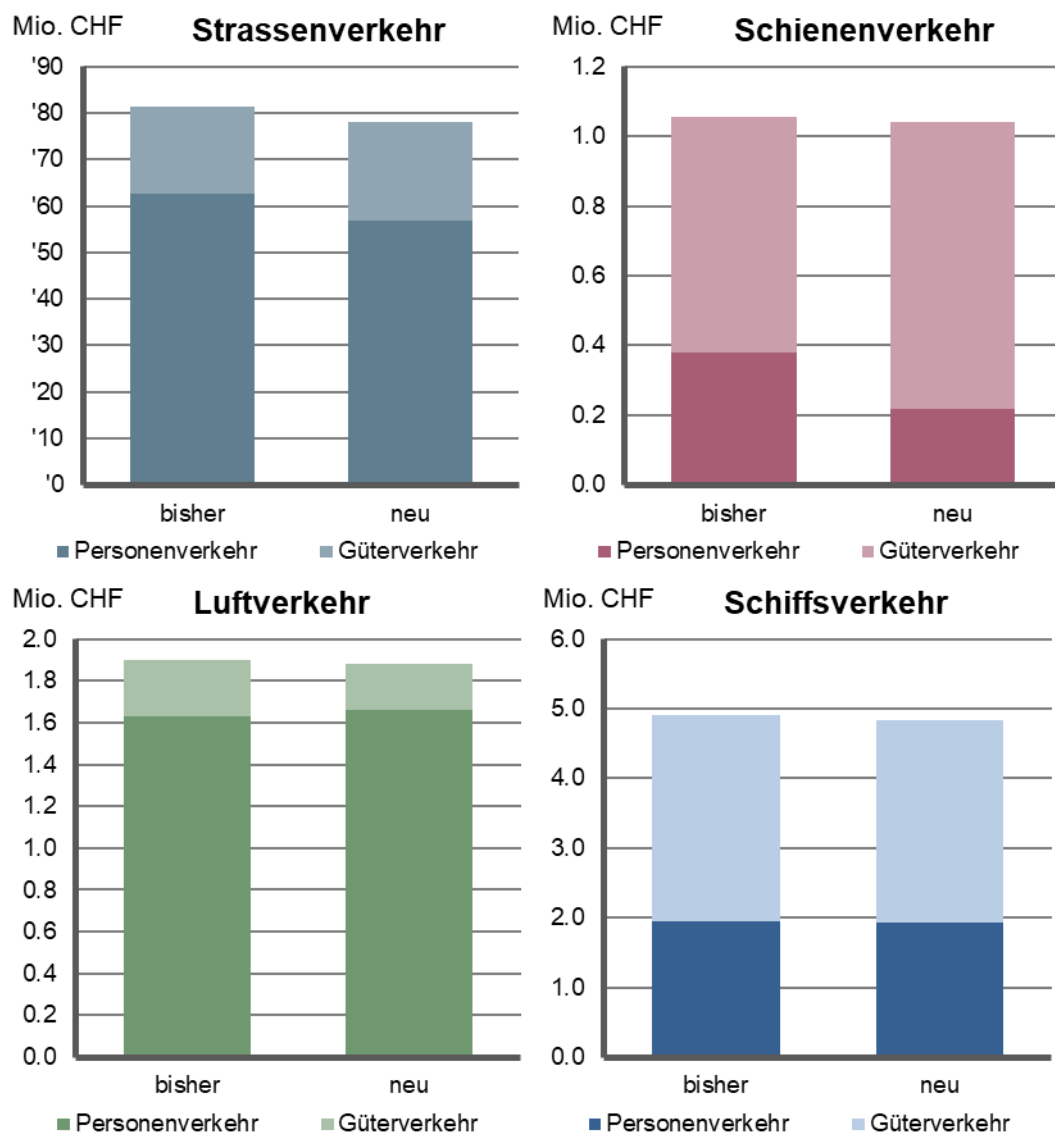


Abbildung 8-20: Vergleich der Berechnungen für die externen Kosten infolge Biodiversitätsverluste basierend auf den alten und den neuen Datengrundlagen sowie Methodik

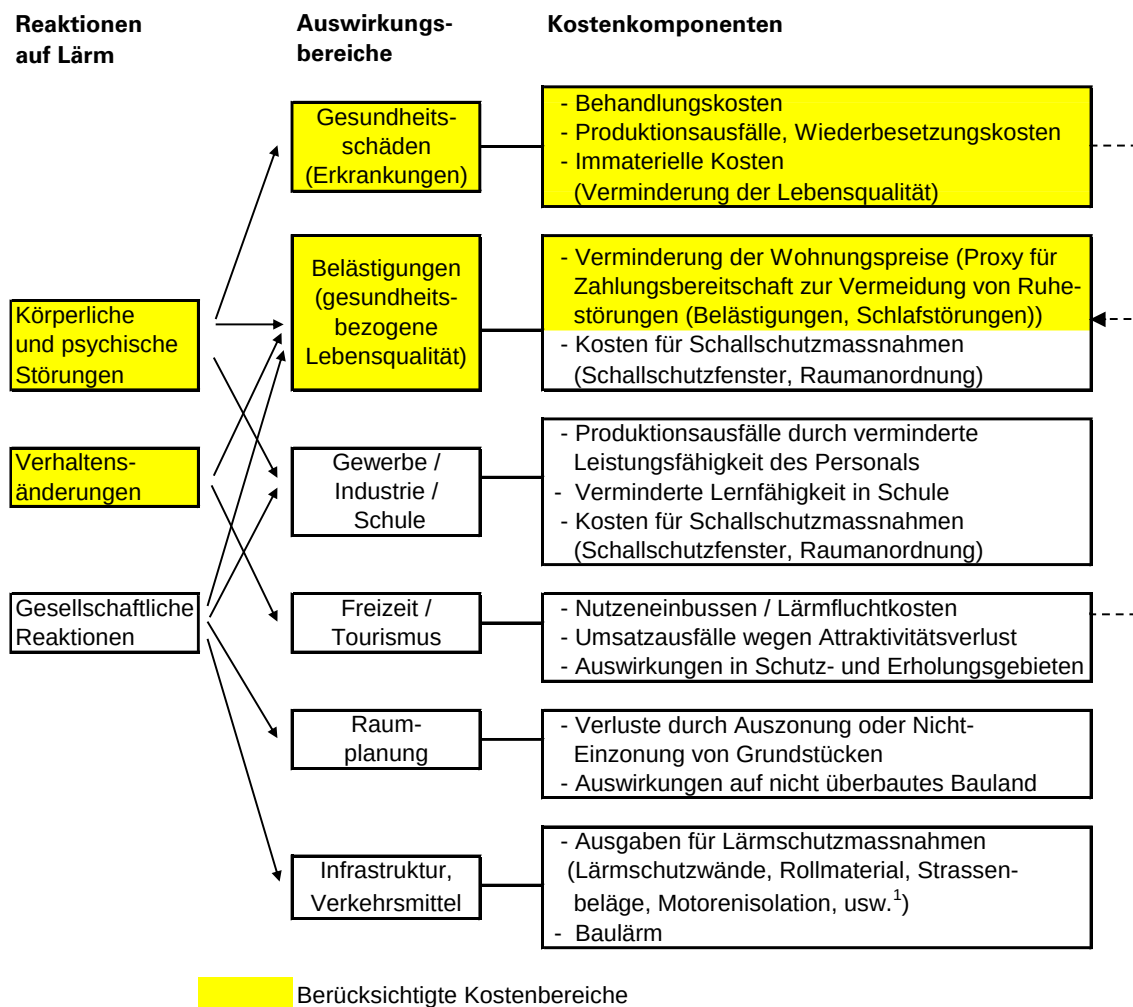
Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	62.69	18.75	81.4
Schienenverkehr	0.4	0.7	1.1
Luftverkehr	1.6	0.3	1.9
Schiffsverkehr	2.0	2.9	4.9
Total	66.7	22.6	89.3
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	56.9	21.3	78.2
Schienenverkehr	0.2	0.8	1.0
Luftverkehr	1.7	0.2	1.9
Schiffsverkehr	1.9	2.9	4.8
Total	60.7	25.3	86.0
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	-9.3%	13.7%	-4.0%
Schienenverkehr	-42.9%	22.4%	-1.2%
Luftverkehr	1.6%	-18.2%	-1.2%
Schiffsverkehr	-1.2%	-1.2%	-1.2%
Total	-8.9%	11.6%	-3.7%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	-5.8	2.6	-3.2
Schienenverkehr	-0.2	0.2	-0.0
Luftverkehr	0.0	-0.0	-0.0
Schiffsverkehr	-0.0	-0.0	-0.1
Total	-6.0	2.6	-3.3

9 Lärm

9.1 Berechnungsgegenstand

Lärm führt zu zahlreichen individuellen und gesellschaftlichen Störungen / Belästigungen, die zu Gesundheitsschäden führen können. Diese Störungen verursachen meist volkswirtschaftliche Kosten. Einen Überblick über die Verhaltensmuster und die davon betroffenen Auswirkungsbereiche ist in folgender Abbildung dargestellt. In den Berechnungen zu den Lärmkosten werden die beiden gelb markierten Kostenbereiche quantifiziert und monetarisiert:

Abbildung 9-1: Auswirkungen des Lärms und ermittelte Kosten



¹ Die Kosten an der Strasseninfrastruktur (Lärmschutzwände, Strassenbeläge) sind in der Strassenrechnung enthalten, aber nicht einzeln ausgewiesen.

Quelle: Ecomplan, Infrac (2014), Abbildung 8-1.

- **Belästigungen:** Lärm wird von den Betroffenen zum Teil bewusst als störend oder belästigend wahrgenommen. So führen zum Beispiel einzelne durchfahrende Züge oder wegfahrende Autos zu Störungen von Aktivitäten und der Kommunikation, zu Unterbrüchen des Schlafs oder zu Störungen von Ruhe und Erholung. Die Kosten dieser bewusst wahrgenommenen Einschränkung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität²²² werden oft über die Reduktion der Wohnungspreise von belärmten Wohnungen bewertet: Die grundsätzliche Überlegung dabei ist, dass Wohnungen mit einer Lärmexposition weniger stark nachgefragt werden und daher auf dem Wohnungsmarkt einen geringeren Marktwert haben, als vergleichbare Wohnungen an ruhiger Wohnlage. Der beobachtete Abschlag auf den Wohnungspreisen ist eine Näherung für die Zahlungsbereitschaft der BewohnerInnen für Ruhe.
- **Gesundheitsschäden** durch Lärmbelastung: Lärm kann neben den beschriebenen bewussten Belästigungen bei den Betroffenen auch zu gesundheitlichen Problemen führen, insbesondere zu körperlichen und psychischen Krankheiten. Drei Hauptmechanismen sind verantwortlich für die Gesundheitsschäden des Lärms: Schlafstörungen, Stresshormone und autonomes Nervensystem, die miteinander interagieren. Gesundheitliche Folgen ergeben sich dabei meist aufgrund von mittel- bis langfristig auftretenden Lärmbelastungen. Über epidemiologische Studien kann der Zusammenhang zwischen Lärmbelastungen und verschiedenen Krankheitsbildern ermittelt werden (Belastungs-Wirkungs-Beziehungen). Mit dieser Kenntnis lassen sich in der Folge die Anzahl lärmbedingter Krankheits- und Todesfälle berechnen und die damit verursachten Kosten bestimmen.

Weitere Kostenkomponenten wurden in den bisherigen Berechnungen gemäss der Darstellung in Abbildung 9-1 nicht erfasst. Dies bleibt auch in der vorliegenden Studie so.²²³

Im **Schiffsverkehr** führt der Lärm zu **vernachlässigbar kleinen Kosten**.^{224, 225} Der Schiffsverkehr wird im Folgenden deshalb nicht weiter betrachtet. Untersucht werden damit die Lärmkosten im Strassen-, Schienen- und Luftverkehr.

²²² Belästigung und Schlafstörung werden von der WHO als Auswirkungen des Lärms auf die Gesundheit betrachtet (WHO World Health Organisation (2018)), wir fassen sie jedoch unter dem Begriff «Belästigungen» zusammen, um sie gegenüber den eigentlichen Gesundheitsschäden klar abgrenzen zu können. Nur im Zusammenhang mit Erkrankungen sprechen wir von Gesundheitsschäden.

²²³ Uns sind keine Kostenbereiche bekannt, die aufgrund von neuen Datengrundlagen oder Forschungsergebnissen mit einbezogen werden müssten. Auch im aktuellen EU-Handbuch werden keine weiteren Kostenbereiche integriert (sondern nur kurz diskutiert – European Commission (2019), S. 206). Die EEA erwähnt in ihrem Lärmbericht (EEA European Environment Agency (2020) Kapitel 4 und 5) zwar neue Bereiche (unterschiedliche Auswirkungen des Lärms auf unterschiedliche soziale Schichten, Auswirkungen auf Biodiversität), diese werden aber nicht in Geldeinheiten ausgedrückt. Auftragsgemäss wird deshalb darauf verzichtet, eine tiefergehende Analyse möglicher neuer Kostenbereiche vorzunehmen.

²²⁴ IRENE; Ecosys (2013b)

²²⁵ Auch im EU-Handbuch wird der Schiffsverkehr (inkl. Schifffahrt auf dem Meer) beim Lärm vernachlässigt (European Commission (2019), S. 76). Ebenso wird in Deutschland bei der Ermittlung der Lärmkosten der Schiffsverkehr nicht berücksichtigt (UBA Umweltbundesamt (2019)).

9.2 Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen

Der Kostenbereich Lärm wurde bereits weitgehend von Ecoplan und Swiss TPH gemeinsam bearbeitet.²²⁶ Wir verzichten daher auf eine Beschreibung der Berechnungsmethodik und beschränken uns im vorliegenden Kapitel auf Erläuterungen zu den neuen Differenzierungen (Antriebsart, Raumtyp, Kantone) sowie zu den Grenzkosten.

Nach Vorliegen neuer Lärmdaten aus dem Lärmmodell sonBASE des BAFU werden die Berechnungen ausserhalb des vorliegenden Projektes fertiggestellt. Dabei ist vorgesehen, dass die im vorliegenden Bericht vorgenommenen Anpassungen aus anderen Kostenbereichen auch im Lärmbereich umgesetzt werden, wie z.B. Überlebenswahrscheinlichkeiten, Berechnungsmethodik verlorene Lebensjahre, aktualisierte Kostensätze etc.). Viele dieser Datengrundlagen werden bereits im vorliegenden Berichtsanhang (Kapitel 20) aktualisiert.

9.3 Vorgehen bei Differenzierungen

9.3.1 Differenzierung nach Antriebsart

Elektromotoren verursachen im Vergleich zu Benzin- oder Dieselmotoren beinahe keinen Lärm. Dies ist im Strassenverkehr jedoch nur bei geringen Geschwindigkeiten (bei PW gemäss BAFU bis ca. 22 km/h) relevant, da bei höheren Geschwindigkeiten – unabhängig von der Antriebsart – das Rollgeräusch dominiert.

Im neuen Strassenlärm-Emissionsmodell des Bundes sonROAD18²²⁷ können im Strassenverkehr neu Elektrofahrzeuge und fossile Fahrzeuge differenziert werden. Dies ist voraussichtlich bei den Personenwagen, den Bussen und den Lastwagen der Fall.²²⁸ Ob und falls ja, wie die Differenzierung nach Antriebsarten für die anderen Fahrzeugkategorien durchgeführt werden kann, ist nach Vorliegen des neuen sonBASE-Modells mit den Modellspezialisten zu prüfen. Zu bedenken ist allerdings, dass zwar fossil angetriebene Fahrzeuge und Elektrofahrzeuge differenziert werden können, aber nicht bekannt ist, auf welchen Strassen die Elektrofahrzeuge verkehren (an Zählstellen nicht differenziert). Es muss also voraussichtlich mit einer Annahme zum Anteil der Elektrofahrzeuge gearbeitet werden.

Im Schienenverkehr ist die Antriebsart nicht relevant für die Lärmemissionen.

9.3.2 Differenzierung nach Raumtypen

Aufgrund der Bevölkerungsdichte und der Verkehrsdichte sind die Lärmkosten in Städten höher als auf dem Land. Da das Lärmmodell sonBASE GIS-basiert ist, können die künftigen Auswertungen in sonBASE differenziert nach den drei Raumtypen vorgenommen werden. Damit können die Lärmkosten perfekt auf die drei Raumtypen aufgegliedert werden.

²²⁶ Ecoplan; Swiss TPH (2021)

²²⁷ Heutschi; Locher (2018)

²²⁸ Heutschi; Locher (2018), S. 83

9.3.3 Differenzierung nach Kantonen

Dasselbe gilt für die Differenzierung nach den Kantonen. Aufgrund der GIS-Basierung kann son-BASE differenziert nach Kantonen ausgewertet werden. Dies wurde teilweise bereits bisher so gehandhabt (Kosten der Belästigung) und muss künftig konsequent umgesetzt werden (auch bei den lärmbedingten Gesundheitskosten).

9.4 Überlegungen zu den Grenzkosten

Die **Grenzkosten** des Lärms sind **tiefere als die Durchschnittskosten**, da die Grenzkosten mit steigender Verkehrsmenge abnehmen. Denn je höher das Verkehrsvolumen ist, desto weniger nimmt der Lärm mit einem zusätzlichen Fahrzeug zu.

Zudem ist anzumerken, dass die durchschnittlichen Lärmkosten in der Schweiz berechnet werden können, Grenzkosten für die Schweiz aber nicht ermittelbar sind, da die Höhe der Grenzkosten stark von der konkreten Situation abhängt. Die folgenden Faktoren sind für die Höhe der Grenz- und Durchschnittskosten für die betrachtete Strasse relevant:

- Fahrzeugkategorien: Grosse Fahrzeuge wie Lastwagen verursachen meist höhere Lärmkosten als kleinere Fahrzeuge wie Personenwagen.
- Bevölkerungsdichte: Je mehr Personen durch den Verkehrsträger belärmt werden, desto höher sind die (marginalen) Lärmkosten.
- Tageszeit: Lärmbelastungen in der Nacht führen zu höheren Lärmkosten als die gleichen Lärmbelastungen am Tag. Auch der Abendlärm verursacht höhere Kosten als der Taglärm, da die Berechnungen gemäss Ecoplan, Swiss TPH²²⁹ auf dem L_{den} beruhen.
- Antriebsart: Elektrofahrzeuge generieren praktisch keinen Motorenlärm, dies ist jedoch vor allem bei Geschwindigkeiten unter 22 km/h relevant, bei höheren Geschwindigkeiten dominiert das Rollgeräusch.
- Zulässige Höchstgeschwindigkeit: Im Strassenverkehr ist zudem je nach Geschwindigkeit der Anteil der Fahrzeugkategorien am Gesamtlärm unterschiedlich gross.

So ist es möglich, dass die Lärmgrenzkosten in einer bestimmten Situation höher sind als die durchschnittlichen Lärmkosten in der Schweiz – aber nicht als die durchschnittlichen Lärmkosten auf derselben Strecke.

Im Schienenverkehr sind dieselben Faktoren von Bedeutung, wobei als «Fahrzeugkategorien» Personen- und Güterverkehr zu betrachten sind und die Antriebsart unbedeutend ist.

Fazit: die Grenzkosten im Lärmbereich sind ein komplexes Thema. Die Durchschnittskosten sind in viele Fällen keine gute Annäherung. Die Berechnung der Grenzkosten auf einer relevanten Differenzierungsebene würde eine eigene Studie erfordern.

²²⁹ Ecoplan; Swiss TPH (2021)

10 Klima

10.1 Berechnungsgegenstand

Verkehrsaktivitäten führen zu Emissionen von Treibhausgasen, insbesondere durch die Verbrennung von fossilen Treibstoffen wie Benzin, Diesel oder Kerosin. Diese Treibhausgasemissionen führen zu einer Veränderung des Klimas (Klimawandel). Die Folgen des Klimawandels sind vielfältig. Wissenschaftlich belegt und im sechsten Sachstandsbericht des IPCC der Vereinten Nationen²³⁰ zusammengefasst sind neben dem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur unter anderem die folgenden Effekte:

- Anstieg des Meeresspiegels,
- Beeinträchtigung der Nahrungsmittelproduktion aufgrund zunehmender Extremwetterereignisse (Dürren, Starkniederschläge, Wirbelstürme, Zunahme von Schädlingen, etc.); teilweise auch Ertragszunahme durch moderaten Temperaturanstieg,
- Zunehmende Extremwetterereignisse können überdies zu Schäden an Infrastrukturen, Unfällen von Menschen, veränderter Wasserverfügbarkeit (z.B. Wasserknappheit) und anderen Schäden führen,
- Gesundheitsschäden: direkte Wirkungen durch extreme Wetterereignisse, die das Risiko von Herz- / Kreislauferkrankungen oder Asthma erhöhen (z.B. Hitze) oder aber zu Unfällen oder Wasserverunreinigungen führen können,
- Schäden an Ökosystemen und Verminderung der biologischen Vielfalt,
- Möglichkeit von irreversiblen Änderungen (tipping points) wie z.B. dem Abschmelzen der Eisschilde,

Möglich sind überdies indirekte Folgen, u.a. durch interne und internationale Migrationsbewegungen von Menschen aufgrund verschlechterter Klima- und Lebensbedingungen. Ebenso werden nebst der Landwirtschaft verschiedene andere Wirtschaftszweige je nach Region sehr stark von den Klimaänderungen betroffen sein, z.B. der Tourismus oder die Fischerei. Die Forschung im Bereich der Quantifizierung der Folgen des Klimawandels hat sich in den letzten Jahren stark entwickelt.²³¹ Die Unsicherheiten in Bezug auf die Höhe der langfristigen Folgen und Schäden sind aber weiterhin gross. Zudem sind Umfang und Auswirkung von Anpassungsmassnahmen ebenfalls schwierig zu quantifizieren bzw. zu antizipieren.

²³⁰ IPCC (2022a)

²³¹ IPCC (2022a)

10.2 Berechnungsmethodik und wesentliche Anpassungen

Die Methodik zur Berechnung der Klimakosten haben wir überprüft und aufgrund von neusten wissenschaftlichen Erkenntnissen im Vergleich zu den Berechnungen für die Jahre 2010²³² und 2015²³³ in zwei Bereichen angepasst:

1. Wir verwenden neu einen Klimakostensatz, der auf Schadenskosten anstelle von Vermeidungskosten basiert. Die Berechnung basiert auf dem open-source GIVE-Modell (vgl. Kapitel 10.4.1).
2. Die Berechnungsmethodik der externen Klimakosten im Luftverkehr wird aktualisiert.

Bevor wir die gewählte Berechnungsmethodik in Kapitel 10.2.4 erläutern, werden die beiden wichtigsten Anpassungen erläutert.

10.2.1 Methodische Anpassung: Schadenskostensatz

Mit einem Klimakostensatz sollen klimabedingte Schäden quantifiziert werden. Die grundsätzliche Wahl der Bewertungsmethode dieser Studie ist in Kapitel 3.2.1 beschrieben. Da es keine Marktpreise für Klimaschäden gibt, werden in der Literatur entweder Schadens- oder Vermeidungskostensätze verwendet.

Vermeidungskosten können nur in Verbindung mit einem vorgegebenen Temperaturlimit oder Kohlenstoffbudget ermittelt werden. Sie ermöglichen dann z.B. die Quantifizierung der Kosten zum Erreichen solcher Ziele. Vermeidungskosten sind zudem ein Massstab für (private und öffentliche) Massnahmen und politische Instrumente zur Vermeidung von Treibhausgasen: Sie erlauben es, tatsächliche Kosten mit den (Ziel-)Vermeidungskosten zu vergleichen.

Schadenskosten sind geeignet, die Klimaschäden einer Aktivität zu quantifizieren. Sie sind insbesondere für die Internalisierung die methodisch richtige Wahl, da sie per Definition externe Kosten darstellen. Aus diesem Grund wird in dieser Studie der Schadenskostenansatz gewählt.

Eine Reihe von Studien – u.a. auch die vorhergehenden Studien zu den externen Kosten und Nutzen im Verkehr – haben in der Vergangenheit den Vermeidungskostensatz gewählt und dies mit den zu hohen Unsicherheiten der Schadenskosten begründet. Die umfassende Analyse der Studie «Climate cost modeling - analysis of damage and mitigation frameworks and guidance for political use» im Auftrag des deutschen Umweltbundesamts (UBA)²³⁴ zeigt aber, dass die Unsicherheiten für beide Ansätze hoch sind und die Ergebnisse stark von normativen Annahmen abhängen. Die Entscheidung, welcher Ansatz verwendet wird, sollte daher nicht von einem Vergleich der Unsicherheiten der Ansätze abhängen, sondern vom Anwendungsfall (siehe auch Tabelle A in INFRAS; Climate Analytics (2021), welche eine entsprechende Entscheidungshilfe enthält).

²³² Ecoplan; INFRAS (2014)

²³³ INFRAS; Ecoplan (2019)

²³⁴ INFRAS; Climate Analytics (2021)

Box: «Optimale» Schadenskosten und Wahl des Ziels

Aus ökonomischer Sicht sollten Treibhausgasemissionen so weit vermieden werden, dass bei dem jeweiligen Emissionsniveau die Grenzschadenskosten pro Tonne Treibhausgasemissionen gerade so hoch sind wie die Grenzvermeidungskosten. Dabei nehmen die Grenzschadenskosten pro Tonne Treibhausgasemissionen mit der Emissionsmenge zu, während die Grenzvermeidungskosten abnehmend sind. Das ökonomisch optimale Emissionsniveau entspricht dann dem Punkt, an dem die Vermeidung einer weiteren Tonne Treibhausgasemissionen gerade so viel kostet, wie diese Tonne Schaden verursachen würde, wenn sie emittiert würde. Dies entspricht der Kosten-Nutzen-Logik, wobei der Nutzen die vermiedenen Schadenskosten sind.

In der Praxis lässt sich dieser optimale Punkt jedoch schwer bestimmen, da die Unsicherheiten und methodischen Herausforderungen zu gross sind. Daher werden Klimaziele auf der Basis klimawissenschaftlicher Erkenntnisse abgeleitet. So wurde im Übereinkommen von Paris 2015 festgelegt, dass der globale durchschnittliche Temperaturanstieg auf deutlich unter 2°C bzw. möglichst auf 1.5°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden soll. Diese Ziele sind klimawissenschaftlich motiviert, aber letztendlich politisch festgelegt. Es ist wichtig festzuhalten, dass auch bei einer global gemittelten Erwärmung von 1.5°C oder 2°C erhebliche negative Auswirkungen durch den Klimawandel zu erwarten sind und diese bei 2°C deutlich höher sind.²³⁵ Im Klimagesetz der Schweiz ist festgelegt, dass das Ziel Netto-Null Emissionen bis 2050 erreicht werden soll.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick zu Schadenskosten und zwei wichtigen Einflussfaktoren präsentiert. Für weiterführende Informationen zu Schadenskosten (und Vermeidungskosten) sowie Referenzen zur Literatur sei auf die Übersichtsstudie INFRAS; Climate Analytics (2021) verwiesen.

Schadenskosten sind die monetarisierten Schäden des Klimawandels. Dabei werden grundsätzlich die Schäden in allen Weltregionen und betroffenen Bereiche bis in die ferne Zukunft berücksichtigt. Schadenskosten werden mit Modellen berechnet, deren Ergebnisse sich durch die Wahl der Annahmen und Modellierungsansätze signifikant unterscheiden können. Die Unterschiede resultieren aus (i) der Wahl der Szenarien und aus normativen Entscheidungen. Dies betrifft z.B. Emissionsszenarien, sozioökonomische Szenarien, die Diskontierung zukünftiger Schäden oder die Berücksichtigung von Ungleichheiten («equity weighting»). Darüber hinaus gibt es (ii) eine Reihe struktureller Elemente wie die Modellierung von Prozessen im Klimasystem sowie Annahmen über Schadensfunktionen und den Einfluss von Anpassung an den Klimawandel. Schliesslich gibt es (iii) weitere Elemente, die einen grossen Einfluss haben, aber oft nicht berücksichtigt werden. Dazu gehören Ansätze zum Umgang mit Unsicherheiten, die Möglichkeit eines katastrophalen Klimawandels oder «marktferne» Effekte, die kaum quantifiziert werden (z.B. Ökosysteme). Die Bandbreite der Ergebnisse in der Literatur ist dementsprechend gross. Diese Bandbreite kann jedoch signifikant reduziert werden, wenn die Anwenderin konkrete Vorgaben für Szenarien und

²³⁵ IPCC (2022b)

normative Entscheidungen macht und den Umgang bezüglich der weiteren Elemente so weit wie möglich definiert.

Für dieses Projekt wird das Open-Source-Modell GIVE (Greenhouse Gas Impact Value Estimator) für die Berechnung der Schadenskosten verwendet. Es wurde von Resources For the Future (RFF) explizit dafür entwickelt, die Schadenskosten zu schätzen. Ausführlichere Informationen über das GIVE-Modell und die Schadenskosten finden sich in den Links in der Fussnote.²³⁶

Das GIVE Modell wurden aus den folgenden Gründen ausgewählt:

- GIVE wurde erst kürzlich entwickelt (2022) und ist somit aktuell.
- Bei der Entwicklung wurden explizit eine Reihe von Empfehlungen berücksichtigt, die das US-Komitee National Academies of Sciences zu diesem Thema gegeben hat.²³⁷ Dies sind z.B. ein modularer Aufbau, eine geeignete Wahl von sozioökonomischen Szenarien inkl. Einbezug von deren Unsicherheiten, ein aktuelles Klimamodul, eine möglichst aktuelle Schadensfunktion, Ramsey Diskontierung.
- Der Code ist open-source verfügbar (MimiGIVE)²³⁸ und somit transparent dokumentiert, und es konnten gewisse Parameter für die Schweiz angepasst werden (BIP-Normierung für equity weighting, Value of Statistical Life VOSL, Diskontierungsparameter).
- Das Modell ist von einer renommierten Institution (RFF) und international anerkannten Autoren veröffentlicht und einschlägig publiziert (Publikation in Zeitschrift Science), so dass ein valabler Standard an Qualität und Dokumentation gewährleistet ist.
- GIVE wird auch von anderen wichtigen Behörden verwendet. So bildet es die alleinige Basis für die Berechnung der Schadenskosten der US Environmental Protection Agency (EPA). Auch das deutsche UBA wird in der Methodenkonvention zukünftig GIVE verwenden (diese Aktualisierung ist Stand August 2024 allerdings noch nicht veröffentlicht).

Im Folgenden werden zwei zentrale Einflussfaktoren der Modellierung der Social Cost of Carbon (SCC) näher beschrieben. Für eine tiefergehende Analyse dieser sowie weiterer Elemente wird wiederum auf INFRAS; Climate Analytics (2021) verwiesen.

²³⁶ - Rennert et al., 2021. RFF-Diskussionspapier mit Schwerpunkt auf den sozioökonomischen Szenarien, die in GIVE verwendet werden (<https://www.rff.org/publications/working-papers/the-social-cost-of-carbon-advances-in-long-term-probabilistic-projections-of-population-gdp-emissions-and-discount-rates/>)
 - Rennert et al., 2022 Frei verfügbare Nature-Veröffentlichung über die wichtigsten GIVE-Ergebnisse (<https://www.nature.com/articles/s41586-022-05224-9>).
 - US EPA Seite zu SCC (<https://www.epa.gov/environmental-economics/scqhg>)
 - EPA 2023: Detaillierter EPA report (https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scqhg_2023_report_final.pdf)
 - Open source Code GIVE (<https://github.com/USEPA/scqhg>)
 - RFF Erklärung zu SCC (<https://www.rff.org/topics/scc/>)
 - INFRAS; Climate Analytics (2021) Detaillierte Analyse von Infrass und Climate Analytics zu den in der Klimakostenmodellierung verwendeten Annahmen. Diese deckt sowohl Schäden als auch Vermeidungskosten ab. Sie enthält zwar nicht das GIVE-Modell, da die Studie älter ist als das Modell, aber die meisten Aspekte sind auch für das GIVE-Modell relevant (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/climate-cost-modelling>)

²³⁷ National Academies of Sciences, et al. (2017)

²³⁸ [GitHub - rffscqhg/MimiGIVE.jl](https://github.com/rffscqhg/MimiGIVE.jl)

Die **Diskontierung** bestimmt die Gewichtung zukünftiger Schäden. Die Höhe der Diskontierung ist zentral, da die grössten Klimaschäden in der Zukunft auftreten. Je höher die Diskontrate, desto weniger Gewicht wird diesen Schäden beigemessen und desto geringer sind die Schadenskosten aus heutiger Sicht. In Schadenskostenmodellen wird für die Diskontierung häufig die Ramsey-Gleichung verwendet. Gemäss dieser Gleichung ist die Diskontrate die Summe aus zwei Komponenten: Der Wachstumsdiskontierung und der reinen Zeitdiskontierung.

Die Wachstumsdiskontierung beschreibt, dass (i) zukünftige Generationen aufgrund des kontinuierlichen Wirtschaftswachstums wohlhabender sind und (ii) daher Schäden in der Zukunft geringer gewichtet werden. Dahinter steht die Annahme, dass – vereinfacht ausgedrückt – die gleichen Schäden in einem reicheren Umfeld weniger schwer wiegen. Dies wird durch den – normativ zu definierenden – Parameter «intergenerational inequality aversion» ausgedrückt.

Die reine Zeitdiskontierung wird durch die reine Zeitpräferenzrate (RZPR) bestimmt. Die reine Zeitpräferenzrate gewichtet die Wohlfahrt zukünftiger Generationen gegenüber der Wohlfahrt der heutigen Generation. Eine reine Zeitpräferenzrate grösser Null bedeutet, dass die Wohlfahrt zukünftiger Generationen geringer gewichtet wird, weil sie in der Zukunft leben. Zur Wahl der reinen Zeitpräferenzrate gibt es eine Vielzahl von Studien. Letztlich handelt es sich aber um eine normative Entscheidung.²³⁹ Der «Erfinder» der Ramsey-Gleichung, Frank Ramsey, plädierte für einen Wert von Null, welcher künftige Generationen gleich stark wie die heutige gewichten würde.

Eine weitere wichtige Rolle spielt das sogenannte «**equity weighting**». Die Folgen des Klimawandels sind global, d.h. in der Schweiz emittierte THG führen weltweit zu Schäden. Prinzipiell gleiche Schadensereignisse führen zu regional unterschiedlichen Schadenssummen, da Schäden in GIVE mit dem BIP korrelieren. Die zugrundeliegende Idee des «equity weighting» ist daher analog zur Wachstumsdiskontierung. Allerdings wird hier berücksichtigt, dass die Wirtschaftskraft der verschiedenen Weltregionen innerhalb einer Generation stark variiert. Verursacht der Klimawandel z.B. in einem armen Land einen Schaden von 1 Mio. CHF, so wird dieser Schaden bei der Berechnung der Klimakosten in einem reicheren Land im Rahmen des «equity weighting» mit mehr als 1 Mio. CHF bewertet, da ein Schaden von 1 Mio. CHF für ein reiches Land relativ gesehen weniger ins Gewicht fällt. Zudem ist GIVE so aufgebaut, dass viele Schäden mit dem BIP der Region korrelieren. So würde z.B. ein Todesfall in einem armen Land einen geringen monetären «Schaden» verursachen, weil der VOSL geringer ist. Die Normierung auf das Land, für den der Klimakostensatz ermittelt wird, ist daher von zentraler Bedeutung, um die Vergleichbarkeit zu anderen Kostenbereichen, deren Kostensätze sich ebenfalls auf die Schweiz beziehen, sicherzustellen. Für eine aktuelle Diskussion zu diesem Thema im US-Kontext und einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich relevanter Parameter wird auf die Studie von Prest et al. verwiesen.²⁴⁰

²³⁹ Aus Sicht des Autorenteam ist die Wahl des «Stern-Reviews» sinnvoll: Dieser verwendet einen Wert von 0.1%, um die Möglichkeit zu berücksichtigen, dass es keine Zukunft gibt (z.B. aufgrund eines Asteroideneinschlags oder eines Atomkriegs).

²⁴⁰ Prest; Rennels; Errickson; u. a. (2024)

10.2.2 Aktuelle Schadenskostensätze anderer Länder

Das UBA empfiehlt Stand März 2023 in der **Methodenkonvention Version 3.1** die Werte gemäss Abbildung 10-1.²⁴¹ Die Werte basieren auf Ergebnissen aus dem «Report on marginal external damage costs of greenhouse gas emissions»²⁴², welcher das Modell FUND verwendet hat. In der Studie wird Equity Weighting verwendet, wobei auf das Durchschnittseinkommen von Westeuropa normiert wurde.²⁴³ Es werden gewichtete Kostensätze mit einer Zeitpräferenzrate von 0% und von 1% dargestellt.

Abbildung 10-1: Schadenskosten in EUR₂₀₂₀/tCO₂ gemäss UBA-Methodenkonvention

Reine Zeitpräferenzrate	Equity Weighting	2020	2030	2050
0%	Ja (Westeuropa)	680	700	765
1%	Ja (Westeuropa)	195	215	250

Quelle: Methodenkonvention 3.1 (UBA (2020))

Die Ergebnisse aus dem Jahr 2023 der **US Environmental Protection Agency (EPA)**²⁴⁴ basieren auf Modellrechnungen mit GIVE. Abbildung 10-2 zeigt die Ergebnisse für drei verschiedene reine Zeitpräferenzraten und die dazugehörigen «near-term» Diskontraten. EPA 2023 verwendet kein equity weighting. Der Verzicht wird damit begründet, dass prinzipiell ein «Benefit Transfer» zwischen Regionen möglich sei und diesem Fall kein Equity Weighting nötig ist.²⁴⁵ Equity weighting würde die Werte signifikant erhöhen.

Abbildung 10-2: Schadenskosten in US\$₂₀₂₀/tCO₂ gemäss EPA 2023

Reine Zeitpräferenzrate	Equity Weighting	2020	2030	2050
0.01% (Diskontrate 1.5%)	Nein	340	380	480
0.2% (Diskontrate 2.0%)	Nein	190	230	310
0.46% (Diskontrate 2.5%)	Nein	120	140	200

Quelle: EPA (2022)

²⁴¹ UBA (2020)

²⁴² Anthoff (2007)

²⁴³ Zudem verwendet das UBA als Methode zum Umgang mit statistischen Ausreissern der Modellsimulationen in Anthoff (2007) die um 1% getrimmten Durchschnittswerte.

²⁴⁴ EPA (2023)

²⁴⁵ Bei einem Benefit Transfer werden finanzielle Mittel von Ländern mit hohem zu Ländern mit niedrigem Einkommen transferiert, um so eine finanzielle Kompensation zu erreichen. Nach einer solchen Kompensation wäre es nicht mehr erforderlich, die unterschiedlichen BIP-Level der Länder mittels Equity Weighting zu berücksichtigen. EPA 2023 führt zudem aus, dass dies dem "Kaldor-Hicks-Kriterium" entspricht, welches vereinfacht gesagt, auf derselben Annahme beruht (für eine detaillierte Erklärung siehe Fussnote 172 in EPA 2023). In der Praxis ist jedoch unwahrscheinlich, dass eine solche Kompensation zwischen Regionen stattfindet (dies gilt insbesondere für eine kurzfristige Betrachtung.).

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Unsicherheiten bei der Ermittlung von Schadenskosten des Klimawandels zwar hoch sind, aber der Schadenskostenansatz die methodisch richtige Wahl ist und auch entsprechende Ergebnisse der Literatur vorliegen. Die Herleitung des gewählten Schadenskostenansatzes für die vorliegende Berechnung wird in Kapitel 10.2.4 erläutert.

10.2.3 Methodische Anpassung: Nicht-CO₂-Emissionen im Luftverkehr

Beim Luftverkehr werden neben den CO₂-Emissionen der Triebwerke, zusätzlich die Emissionen von Stickoxiden und ultrafeinen Partikeln in Reiseflughöhe berücksichtigt.

Stickoxide verändern auf komplexe Art die Chemie in der Atmosphäre auf den typischen Flughöhen (obere Troposphäre, Tropopause und teils untere Stratosphäre) und ändern dadurch die dortige Konzentration der Treibhausgase Ozon, Methan und Wasserdampf. Bezogen auf den Indikator «Effective Radiative Forcing» (ERF)²⁴⁶ resultiert gemäss Lee et al.²⁴⁷ ein Nettoeffekt von 17.5 mW/m².²⁴⁸ Das 5–95% Konfidenzintervall beträgt 0.6–29 mW/m².

Ultrafeine Partikel in Kombination mit Schwefeldioxid und anderen Aerosolen wirken als Kondensationskeime und führen zu Kondensstreifen bzw. zu Veränderungen der natürlichen Bewölkung in den oberen Luftschichten. Gemäss Lee et al. führt dieser Effekt zu einem ERF von 57.4 mW/m².²⁴⁹ Das 5–95% Konfidenzintervall beträgt 17–98 mW/m².²⁵⁰

Weitere Klima-Effekte durch den Flugverkehr werden in Lee et al. zwar quantifiziert, sie sind aber im Vergleich wenig relevant und werden daher im Folgenden vernachlässigt.

Die grossen Konfidenzintervalle resultieren daraus, dass die Auswirkungen von Stickoxiden und ultrafeinen Partikeln klimatologisch komplex bzw. erwärmende und kühlende Wirkungen abhängig von Region, Umgebungszustand, Tageszeit, dem eingesetzten Flugmaterial etc. sind. Sie können daher nur mit grossen Unsicherheiten bestimmt werden.

Die CO₂-Emissionen des Luftverkehrs führen gemäss Lee et al. zu einem ERF von 34.3 mW/m². Das 5–95% Konfidenzintervall beträgt 28–40 mW/m². Die Unsicherheiten des ERF der CO₂-Emissionen sind im Vergleich zu den ultrafeinen Partikeln also geringer.

Alle genannten ERF-Werte wurden aus Annahmen über die Emissionen und die atmosphärische Zusammensetzung aus dem historischen, globalen Luftverkehr ermittelt und gelten für das Jahr 2018.

²⁴⁶ «Effective Radiative Forcing» (ERF) ist eine Kenngrösse zur Abschätzung des langfristigen Anstiegs der globalen Mitteltemperatur, der durch die Änderung der klimawirksamen Substanz verursacht wird. Dazu muss der spezifische ERF-Wert mit dem allgemein gültigen Klimasensitivitätsparameter multipliziert werden (für Details siehe z.B. Lee et al., 2021).

²⁴⁷ Lee; Fahey; Skowron; u. a. (2021)

²⁴⁸ Leistungsflussdichte: Milliwatt pro Quadratmeter

²⁴⁹ Lee; Fahey; Skowron; u. a. (2021)

²⁵⁰ Hohe, durch Flugzeuge angeregte Bewölkung erwärmt das Klima (durch Rückstrahlung von Wärmestrahlung der Erde nach unten). Bewölkung hat aber auch einen kühlenden Effekt (durch Rückstrahlung von Sonnenenergie in den Welt-raum). Bei hoher Bewölkung dominiert der erste Effekt, so dass es netto zu einer Erwärmung kommt. Bei niedriger natürlicher Bewölkung ist der Nettoeffekt hingegen in der Regel kühlend.

Die Emissionen von Stickoxiden und ultrafeinen Partikeln wirken nur kurzfristig (Stunden bis Wochen) nach einem Flug. Stickoxide und ultrafeine Partikel sind somit «flow pollutants», deren Wirkung nur von der aktuellen Emissionsmenge abhängt. Die CO₂-Emissionen desselben Fluges wirken dagegen über Jahrhunderte auf das Klima. CO₂ ist daher ein «stock pollutant», dessen erwärmende Wirkung sich akkumuliert. Dieser Unterschied erfordert normative Annahmen für den Vergleich dieser Emissionen. Hierzu gibt es eine Reihe von Ansätzen, die sich vor allem im betrachteten Zeithorizont, aber auch im verwendeten Indikator unterscheiden (vgl. Lee et al. 2021, Tab. 5). Allen diesen Ansätzen ist gemeinsam, dass sie einen Faktor für Nicht-CO₂-Emissionen im Luftverkehr generieren, der einem CO₂-Äquivalent pro emittiertem CO₂ in Reiseflughöhe entspricht.

In den vorangegangenen Studien zu den externen Kosten des Verkehrs wurden daher nicht die *effektiven* Nicht-CO₂-Emissionen von Flügen als Grundlage für die Berechnung von CO₂-Äquivalenten verwendet. Stattdessen wurden die CO₂-Emissionen von Flügen als Mass genommen und mit dem oben beschriebenen Faktor multipliziert, um die Wirkung von Nicht-CO₂-Emissionen zu berücksichtigen. Da aber die Wirkungen von Nicht-CO₂-Emissionen des Flugverkehrs nicht zwingend proportional zu den CO₂-Emissionen sind, werden die externen Kosten der Nicht-CO₂-Emissionen des Flugverkehrs neu direkt auf die Emissionen von ultrafeinen Partikeln und Stickoxiden in Reiseflughöhe abgestützt. Die beiden Emissionen sind wesentlicher Trigger der Nicht-CO₂-Effekte der Luftfahrt. Für die Berechnung werden daher die jährlich vom BAZL erhobenen und vom BFS publizierten klimawirksamen Emissionsmengen von ultrafeinen Partikeln und Stickoxiden auf Reiseflughöhe verwendet ²⁵¹. Diese Emissionen werden mit einem neu definierten Kostensatz pro Menge emittierter ultrafeiner Partikel- bzw. Stickoxidemissionen multipliziert. Diese Kostensätze basieren auf dem CO₂-Kostensatz sowie einem einmaligen Vergleich (für das Basisjahr 2021) des (i) ERF der CO₂-Emissionen mit (ii) den ERF für Kondensstreifen und Emissionen aus ultrafeinen Partikeln bzw. ERF der Wirkung von Stickoxiden auf Reiseflughöhe. Die konkrete Herleitung der Kostensätze ist in Kapitel 10.4.2 beschrieben.

Grundsätzlich wäre es methodisch korrekter, die Kostensätze der Nicht-CO₂-Emissionen direkt in einem dedizierten Schadenskostenmodell zu bestimmen. Nach unserem Wissensstand gibt es aktuell jedoch noch keine Modelle, die die Wirkung von Nicht-CO₂-Emissionen des Luftverkehrs bei der Quantifizierung von Schadenskosten berücksichtigen. Die CO₂-Schadenskosten fallen vor allem in der Zukunft und die Nicht-CO₂-Schadenskosten vor allem in der Gegenwart an. Die Grenzscha den sind in der Zukunft wahrscheinlich höher. Dies führt dazu, dass der gewählte Ansatz die Schäden durch Nicht-CO₂-Emissionen ceteris paribus tendenziell überschätzt.

10.2.4 Verwendete Berechnungsmethode

Ist der Kostensatz festgelegt, ist die Berechnung der Klimakosten des Verkehrs in der Schweiz mit dem vorliegenden open source GIVE-Modell rechnerisch einfach, da die Treibhausgasemissionen relativ genau bestimmt werden können (Abbildung 10-3).

²⁵¹ BFS (2022a)

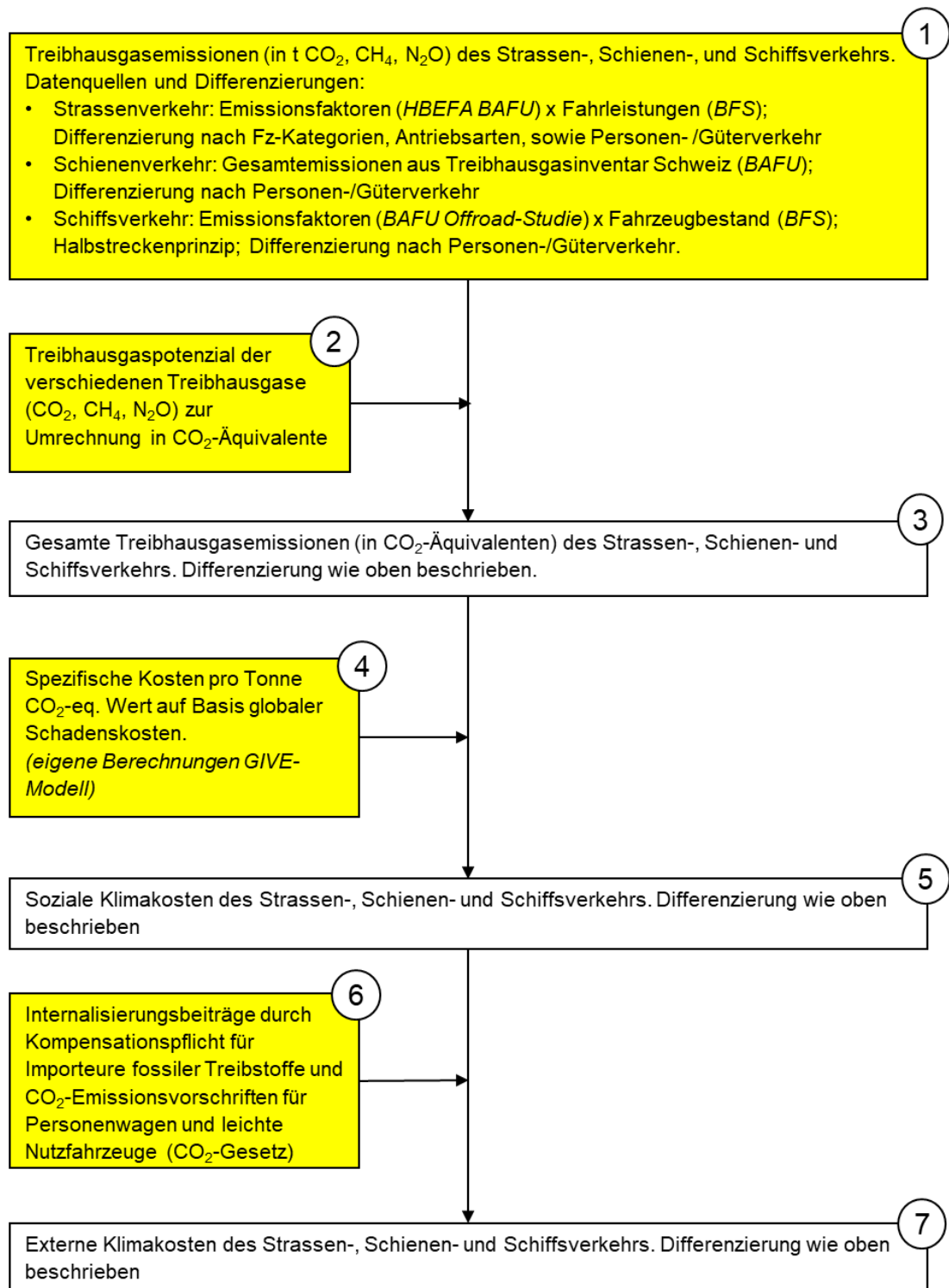
Für den Strassen-, Schienen- und Schiffsverkehr werden im Schritt 1 die Emissionsmengen der Treibhausgase Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) ermittelt. Details zur Herleitung der Emissionsmengen sowie den verwendeten Datenquellen finden sich im Kapitel 10.3. Anschliessend werden im Schritt 2 die drei Treibhausgase mit Hilfe ihrer Treibhausgaspotenziale²⁵² in CO₂-Äquivalente (3) umgerechnet. Die daraus resultierende Gesamtmenge an Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalente wird mit dem spezifischen Kostensatz pro Tonne CO₂- Äquivalente multipliziert (4). Das Ergebnis dieser Rechnung sind die sozialen Klimakosten des Strassen-, Schienen- und Schiffsverkehrs (5). Um aus den sozialen die externen Klimakosten (7) zu ermitteln, wird schliesslich der Internalisierungsbeitrag abgezogen (Schritt 6).

Die Bewertungsmethodik beim Luftverkehr unterscheidet sich von den anderen Verkehrsträgern, weil die zusätzliche Treibhauswirkung von NO_x und ultrafeinen Partikeln berücksichtigt wird (vgl. Kapitel 10.2.3 und Abbildung 10-4). Für die Ermittlung der Treibhausgaswirkung aus dem Betrieb der Flugzeuge und Helikopter werden die entsprechenden Reiseflug-CO₂ Emissionen (1) und die CO₂-Emissionen des Verkehrs auf Flughäfen (2) addiert, sowie die Emissionen von NO_x und ultrafeinen Partikeln auf Reiseflughöhe erhoben (1). Diese Emissionsmengen (3) werden schliesslich wie bei den anderen Verkehrsträgern mit dem schadstoffspezifischen Kostensatz pro Tonne (Klimakostensatz und Kostensätze für NO_x und ultrafeine Partikel wie in Kapitel 10.2.3 beschrieben) multipliziert (5). Im Ergebnis liegen die sozialen Klimakosten des Luftverkehrs, der in der Schweiz abgewickelt wird, vor. Die sozialen Kosten sind in diesem Fall identisch mit den externen Kosten.

Ein weiterer grundsätzlicher Unterschied zwischen Luft- und Schiffsverkehr und den Verkehrsträgern Strasse und Schiene ist das Halbstreckenprinzip, das angewendet wird. Dieses gewährleistet, dass auch die kontinentalen und interkontinentalen Flüge bzw. Schiffsfahrten (jeweils halbe Flug- bzw. Schiffsstrecken) einbezogen werden, was aber Vergleiche mit den anderen Verkehrsträgern erschwert.

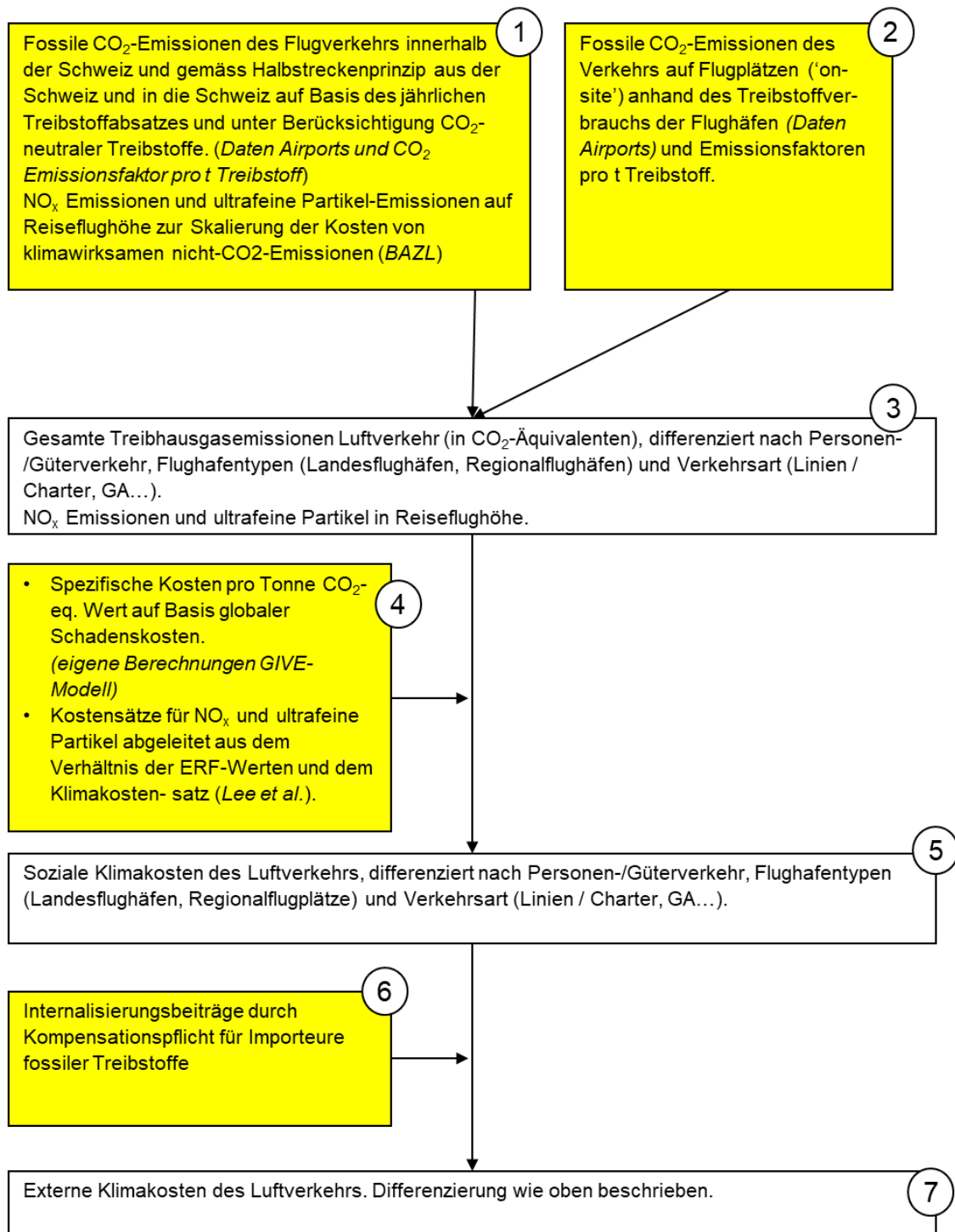
²⁵² IPCC (2022a)

Abbildung 10-3: Bewertungsmethodik Klima: Strassen-, Schienen- und Schiffsverkehr



Legende: Inputdaten Zwischen- / Endergebnisse Erläuterung der Berechnung (*Datenquellen kursiv*)

Abbildung 10-4: Bewertungsmethodik Klima: Luftverkehr



Legende: Inputdaten Zwischen- / Endergebnisse Erläuterung der Berechnung (*Datenquellen kursiv*)

10.3 Mengengerüst

Für die Berechnung des Mengengerüsts, d.h. der Menge an Treibhausgasemissionen (Kohlendioxid CO₂, Methan CH₄ und Lachgas N₂O), erfolgt das Vorgehen analog wie in den bisherigen Studien zur Berechnung der externen Kosten des Verkehrs.²⁵³ Grundsätzlich bildet das Treibhausgasinventar der Schweiz die Grundlage für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen des Verkehrs. Allerdings sind einige Anpassungen nötig, insbesondere weil das Inventar auf dem Absatzprinzip basiert, hier aber das Territorial- bzw. Halbstreckenprinzip angewendet wird. Die Anpassungen werden bei der Beschreibung der Quellen für die einzelnen Verkehrsträger jeweils erläutert. Nicht Teil dieser Kostenkategorie sind indirekte Treibhausgasemissionen bei der Stromproduktion oder der Herstellung von Treibstoffen. Diese indirekten Emissionen sind Teil des Kapitels 11 (Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse).

- Beim Strassenverkehr werden die spezifischen Emissionsfaktoren je Fahrzeugkategorie und Antriebsart aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA, Version 4.2)²⁵⁴ mit der Fahrleistung im Inland (Territorialitätsprinzip) für das Jahr 2021 multipliziert (siehe dazu Kapitel 20.2.1). Dies bedeutet, dass die Gesamtemissionen des Strassenverkehrs wie in den bisherigen Rechnungen dem Territorialitätsprinzip entsprechen und im Gegensatz zum Absatzprinzip, das im Treibhausgasinventar gilt, der Tanktourismus nicht berücksichtigt wird.
- Schienenverkehr: Für den Schienenverkehr werden die Emissionsdaten für das Jahr 2021 direkt aus dem aktuellen Schweizer Treibhausgasinventar (Common Reporting Format, CRF) verwendet.²⁵⁵ Die direkten Treibhausgasemissionen des Schienenverkehrs stammen von den Dieselloks. Für die Aufteilung der Emissionen auf den Personen- und Güterverkehr werden Daten zur Anzahl im Betrieb stehender Dieselloks bei der SBB verwendet.
- Luftverkehr: Die fossilen CO₂-Emissionen des Luftverkehrs (fossile CO₂-Triebwerkemissionen) ermittelt das BAZL jährlich anhand des Treibstoffverbrauchs nach dem Halbstreckenprinzip (siehe auch Kapitel 20.2.4). Zusätzlich werden die Treibhausgasemissionen des ‚on-site‘ Verkehrs auf Flughäfen (Busverkehr, Rangierung der Flugzeuge, Abfertigung etc.) basierend auf einer Umfrage des BAZL bei den Flughäfen ermittelt. Die Emissionsdaten von NO_x und ultrafeinen Partikeln für die Berechnung der Kosten durch Nicht-CO₂-Emissionen sind ebenfalls in Kapitel 20.2.4 beschrieben.
- Schiffsverkehr: Spezifische CO₂-Emissionensfaktoren (g CO₂ pro Schiff und Jahr) je Schiffskategorie werden anhand des Bestandes und der gesamten jährlichen CO₂ Emissionen je Schiffskategorie berechnet. Beide Werte werden in der non-road-Datenbank des BAFU ausgewiesen. Die spezifischen Emissionsfaktoren werden dann mit dem Fahrzeugbestand je Schiffskategorie aus aktuellen BFS-Statistiken multipliziert. CH₄ und N₂O werden in der non-road Datenbank nicht ausgewiesen. Für diese Emissionen wird auf Daten des Treibhausgasinventars zurückgegriffen, die mit Hilfe der CO₂-Emissionen (Inventar vs. non-road Datenbank) vom Absatzprinzip auf das Halbstreckenprinzip korrigiert werden.

²⁵³ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

²⁵⁴ INFRAS (2022)

²⁵⁵ Bundesamt für Umwelt, BAFU (2023b)

10.3.1 Treibhausgaspotenziale

Die Treibhausgaspotenziale (Global Warming Potential, GWP) werden verwendet, um die Lachgas- und Methanemissionen in CO₂-Äquivalente umzurechnen. Die Faktoren für das Treibhausgaspotenzial von Lachgas (N₂O) und Methan (CH₄) entsprechen den Werten gemäss aktuellem IPCC Bericht²⁵⁶ über einen Zeitraum von hundert Jahren (GWP-100). Dies sind (siehe IPCC 2021, WG1, Table 7.15):

- GWP-100 für Methan: 27
- GWP-100 für Lachgas: 273

Hinweis: Für eine zukünftige Berechnung ist zu überlegen, für die Umrechnung von Schadenskosten keine GWP-Werte, da diese nicht für diesen Zweck konzipiert wurden, sondern andere Faktoren zu verwenden. Dies gilt insbesondere für Methan, dessen Klimawirkung kurzfristig ist (Lebensdauer in Atmosphäre: 10 bis 15 Jahre), während CO₂ über Jahrhunderte wirkt. Lachgas hat hingegen eine ähnlich lange Wirkung (Lebensdauer in Atmosphäre: über 100 Jahre). Da die Grenzschäden in der Zukunft wahrscheinlich höher sein werden, führt die Umrechnung mit GWP-100 Werte zu einer Überschätzung der Schäden durch Methan. So gilt gemäss EPA (2022) (dortige Table ES.1):

- Die sozialen Kosten von Methan sind etwa um den Faktor 7 bis 11 höher als die sozialen Kosten von Kohlenstoff (bei kleineren Diskontierungsraten ist der Faktor niedriger). Diese Bandbreite liegen deutlich unter dem Faktor 27, so dass der GWP-100-Wert von Methan ungeeignet ist, die externen Kosten von Methanemissionen zu quantifizieren. Stattdessen wäre zu prüfen, ob ein Faktor von ca. 10 zu verwenden wäre. Da hierzu bisher nur wenige Studien vorliegen, wurden aktuell auf eine Anpassung verzichtet, wäre aber in Zukunft nochmals zu überprüfen.
- Die sozialen Kosten von Lachgas sind etwa um den Faktor 255 bis 290 höher als die sozialen Kosten von Kohlenstoff. In diesem Bereich liegt der Faktor 273, so dass der GWP-100-Wert von Lachgas zur Quantifizierung der externen Kosten von Lachgasemissionen geeignet ist.

Die folgenden Abbildungen zeigen die in der vorliegenden Studie verwendeten Treibhausgasemissionen (in Tonnen pro Jahr), sowie die daraus resultierenden Emissionen in CO₂-Äquivalenten des Strassen-, Schienen- und Schiffsverkehrs. Für den Luftverkehr werden zusätzlich die Emissionen von NO_x und ultrafeinen Partikeln auf Flughöhe dargestellt.

Abbildung 10-5: Treibhausgasemissionen des Strassenverkehrs 2021

Luftschadstoff	Personenverkehr									Güterverkehr				Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr							
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li		LW	SS
CH ₄	478	0	95	33	-	-	-	-	-	4	-	-	37	3	1	651
CO ₂	8'980'534	92'909	200'421	3'614	-	-	-	-	-	307'743	-	-	1'141'190	842'777	819'275	12'388'465
N ₂ O	210	4	4	0	-	-	-	-	-	12	-	-	41	44	51	366
CO ₂ -eq	8'749'482	92'568	203'835	4'460	-	-	-	-	-	311'463	-	-	1'115'971	855'918	834'484	12'168'180

t/a = Tonnen pro Jahr

256 IPCC (2021)

Abbildung 10-6: Treibhausgasemissionen des Schienenverkehrs 2021

Luftschadstoff	Personen- verkehr t/a	Güter- verkehr	Total
CH ₄	0.1	0.4	0.5
CO ₂	5'798.8	22'056.3	27'855.1
N ₂ O	0.3	1.1	1.4
CO₂-eq	5'888.6	22'397.9	28'286.5

t/a = Tonnen pro Jahr

Abbildung 10-7: Treibhausgasemissionen des Luftverkehrs 2021 (gemäss Halbstreckenprinzip)

Luftschadstoff	Verkehrsmittel t/a	Personen- verkehr	Güterverkehr	Total
CO ₂				
	Business Aviation	141'536	-	141'536
	Helikopter	855	672	1'527
	Linien- und Charterverkehr europäisch	952'036	90'525	1'042'562
	Linien- und Charterverkehr interkontinental	1'228'626	341'076	1'569'701
	Rest General Aviation	110'664	-	110'664
CO₂-eq		432'273	2'433'717	2'865'990
Contrails (partikel)				
	Linien- und Charterverkehr europäisch	4.15E+23	3.95E+22	4.55E+23
	Linien- und Charterverkehr interkontinental	4.33E+22	1.20E+22	5.54E+22
Contrails (partikel)		4.58E+23	5.15E+22	5.10E+23
NOx Flughöhe				
	Linien- und Charterverkehr europäisch	8'138	774	8'912
	Linien- und Charterverkehr interkontinental	849	236	1'085
NOx Flughöhe		8'987	1'010	9'997

t/a = Tonnen pro Jahr

Abbildung 10-8: Treibhausgasemissionen des Schiffsverkehrs 2021 (gemäss Halbstreckenprinzip)

Luftschadstoff	Personen- verkehr t/a	Güter- verkehr	Total
CH ₄	6.1	5.8	11.9
CO ₂	54'075.5	50'786.8	104'862.3
N ₂ O	2.0	1.8	3.8
CO₂-eq	54'814.4	51'480.8	106'295.2

t/a = Tonnen pro Jahr

10.4 Wertgerüst

10.4.1 CO₂-Kostensatz

Für die Bewertung externer Kosten wird aus methodischen Gründen neu der Schadenskostenansatz verwendet (siehe dazu Kapitel 10.2.1). Dies ist eine Anpassung gegenüber den Vorgängerstudien aus den Jahren 2010²⁵⁷ und 2015²⁵⁸, in denen der Vermeidungskostensatz verwendet wurde.

Für die Berechnung wurde das GIVE-Modell²⁵⁹ verwendet (siehe Kapitel 10.2.1). Gegenüber der Basisversion wurden folgende Anpassungen umgesetzt.

- VOSL (value of statistical life) der Schweiz²⁶⁰
- Einkommenselastizität von 0.8 gemäss Schweizer Praxis²⁶¹
- Equity weighting normiert auf das Schweizer BIP pro Kopf.
- Emissionsjahr 2021 statt 2020.

Das GIVE-Modell liefert als Output US-\$ des Jahres 2005. Dieser Wert muss mittels Value Transfer in CHF des Jahres 2021 umgerechnet werden. Der Output wurde zuerst mittels einer PPP-Währungsumrechnung in CHF des Jahres 2005 umgerechnet.²⁶² Anschliessend erfolgte eine Inflationsbereinigung von CH-2005 in CHF-2021.²⁶³

Bei der Schätzung der Schadenskosten wird als zentraler Wert eine reine Zeitpräferenzrate (PRTP) von 1 % verwendet (siehe Erklärung in Kapitel 10.2.1). Dieser Wert wird auch vom deutschen UBA für einen der beiden empfohlenen Werte verwendet. Der Wert ist als eher hoch einzuschätzen, da PRTP = 1 % bedeutet, dass beispielsweise ein Todesfall in 70 Jahren aus heutiger Sicht nur halb so hoch gewichtet wird, wie ein Todesfall heute, allein aufgrund dessen, dass der Todesfall in der Zukunft geschieht. Eine geringere PRTP würde eine Erhöhung der Social Cost of Carbon (SCC) zur Folge haben. Die Wahl von PRTP = 1 % entspricht somit dem sogenannten "at least"-Ansatz. Dabei ist zu beachten, dass die PRTP nicht mit der Diskontrate gleichzusetzen ist. Die Diskontrate ist signifikant höher, da im Rahmen der Ramsey-Gleichung neben der PRTP auch das BIP-Wachstum berücksichtigt wird. Selbst bei PRTP = 0 % ergibt sich so in der Regel eine Diskontrate von über 2 %.

²⁵⁷ Ecoplan; INFRAS (2014)

²⁵⁸ INFRAS; Ecoplan (2019)

²⁵⁹ Die Abkürzung GIVE steht für Greenhouse Gas Impact Value Estimator.

²⁶⁰ Bundesamt für Raumentwicklung, ARE (2022) bzw. Kapitel 20.5.5

²⁶¹ Bundesamt für Raumentwicklung, ARE (2022) bzw. Kapitel 20.5.5

²⁶² PPP ist Purchasing Power Parity und berücksichtigt die Kaufkraftunterschiede der Länder. Daher weicht der PPP-Wert vom reinen Wechselkurs ab. Die Währungsumrechnung PPP von USD-2005 in CHF-2005 verwendet einen Faktor von 1.69 gemäss OECD-Daten.

²⁶³ Der Inflationsfaktor gemäss CPI der Weltbank ist 1.039.

Für den zentralen Wert wird das Verfahren des Equity Weighting angewendet, wobei eine Normierung auf das Schweizer Einkommen erfolgt (siehe auch die diesbezügliche Erklärung in Kapitel 10.2.1). Die Anwendung von Equity Weighting gewährleistet, dass der SCC auf das Schweizer Einkommen kalibriert wird. Dadurch wird eine einheitliche Behandlung von Schäden unabhängig vom Ort ihres Auftretens sichergestellt. Dies gilt insbesondere auch für die "Schäden" durch monetarisierte Todesfälle. Ohne Equity Weighting hätte ein Todesfall in einem Land mit niedrigen Einkommen in GIVE eine geringere Auswirkung auf die SCC als in einem Land mit hohen Einkommen.

Für Sensitivitätsanalysen sind zusätzlich ein tiefer Wert und ein hoher Wert angegeben. Der tiefe Wert resultiert aus der Berechnung ohne Verwendung von Equity Weighting (bei einer reinen Zeitpräferenzrate $PRTP = 1\%$). Der hohe Wert resultiert aus $PRTP = 0\%$ ²⁶⁴ und der Verwendung von Equity Weighting.

Die folgende Abbildung 10-9 fasst die in der vorliegenden Studie angewandten Klimakostensätze zusammen. Dabei wurden die Werte auf der letzten Stelle gerundet, um eine Scheingenauigkeit zu vermeiden.

Abbildung 10-9: Zusammenfassung der verwendeten Klimakostensätze 2021

	Kostensätze 2021 [CHF ₂₀₂₁ /t CO ₂ äq]
Klimakostensatz – Zentraler Wert	
(GIVE-Ergebnis mit reiner Zeitpräferenzrate von 1%, mit equity weighting)	430
Klimakostensatz – Sensitivität hoch	
(GIVE-Ergebnis mit reiner Zeitpräferenzrate von 0%, mit equity weighting)	1370
Klimakostensatz – Sensitivität tief	
(GIVE-Ergebnis mit reiner Zeitpräferenzrate von 1%, ohne equity weighting)	130

Grundsätzlich ist an dieser Stelle nochmals darauf hinzuweisen, dass der Klimakostensatz von einer Reihe von Einflussfaktoren und normativen Annahmen abhängt und somit unsicher ist. Zudem ist davon auszugehen, dass das GIVE-Modell die Klimaschäden unterschätzt, weil viele Schadensbereiche nicht berücksichtigt sind (vgl. Tabelle 3.1.4 in EPA 2023).

Im vorliegenden Fall wendet das ARE einen «at least» Ansatz als Berechnungsprinzip für den zentralen Wert von 430 CHF an (siehe auch Kapitel 3.3). Das heisst, es ist davon auszugehen, dass der SCC-Wert höher ist. Wenn bei einem anderen Anwendungsfall z.B. das Vorsorgeprinzip

²⁶⁴ Diesen Wert verwendet das UBA für den anderen der beiden empfohlenen Werte und er wird auch von vielen Ökonomen und Philosophen empfohlen (unter anderen von Frank Ramsey, dem Namensgeber der Ramsey Gleichung).

zugunsten zukünftiger Generationen angewendet wird, ist daher zu überlegen, den Wert für die «Sensitivität hoch» zu verwenden.

Der verwendete Kostensatz wird auf sämtliche CO₂-Emissionen (inkl. CO₂-Äq; siehe Kapitel 10.3.1) des Referenzjahres 2021 angewandt. Für Emissionen der Folgejahre müsste im Idealfall für jedes Jahr eine neue Modellierung mit GIVE durchgeführt werden. Die erwarteten Änderungen sind allerdings gering (vermutlich ca. 1-3% Steigerung des SCC pro Jahr). Daher wird als pragmatischer Ansatz vorgeschlagen, für die Folgejahre (zumindest bis ins Jahr 2025) real denselben Wert zu verwenden wie für das Jahr 2021. Dies führt zu einer zunehmenden Unterschätzung der SCC. Dies kann mit dem at-least Ansatz erklärt werden. Die Inflation wird für die jährliche Fortschreibung (d.h. für die nominalen Werte) berücksichtigt (siehe Kapitel 20.4).

10.4.2 Kostensätze für klimawirksame Stickoxide und ultrafeine Partikel im Luftverkehr

Wie in Kapitel 10.2.3 beschrieben, sollen die Kosten der Schäden von klimawirksamen Stickoxiden (NO_x) und Kondensstreifen (ausgelöst durch ultrafeine Partikel-Emissionen) direkt auf deren Emissionen abgestützt werden. Dazu müssen entsprechende Kostensätze bestimmt werden. Als Basis werden einmalig aktuelle ERF-Werte²⁶⁵ verwendet. Für die Nicht-CO₂-Emissionen werden aufgrund der höheren Unsicherheiten die kleinsten in Lee et al. 2021 ausgewiesenen ERF-Werte verwendet werden (at least Ansatz). Für die Normierung wird der vergleichsweise robuste mittlere ERF-Wert der CO₂-Emissionen verwendet (best guess). Eine weitere Grundlage ist der CO₂-Kostensatz (siehe Kapitel 10.4.1).

Abbildung 10-10 zeigt die daraus resultierenden einmaligen ERF-Umrechnungsfaktoren. Würden für Nicht-CO₂-Emissionen ebenfalls die best guess ERF-Werte gemäss Lee et al. 2021 verwendet werden, würde sich der Kostensatz für Stickoxide um einen Faktor 29 und der Kostensatz für ultrafeine Partikel um einen Faktor 3.4 erhöhen (nicht gezeigt in Abbildung). Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen dieser höheren Kostensätze untersucht.

Abbildung 10-10: Übersicht ERF-Umrechnungsfaktoren

Luftschadstoff	ERF [mW/m ²]	ERF Umrechnungsfaktor
		[ERF/ERF _{CO2}]
CO ₂	34.3	100%
NO _x	0.6	1.75%
Ultrafeine Partikel	17	49.6%

Für die Berechnung der Kostensätze werden die aktuellen Emissionen des Jahres 2021 verwendet (wie in Kapitel 20.2 beschrieben):

²⁶⁵ Lee; Fahey; Skowron; u. a. (2021)

- CO₂-Emissionen: 2.38 Mio. tCO₂ (internationale Flüge und Inlandflüge; basiert auf den in der Schweiz getankten Treibstoffmengen (Absatzprinzip)).²⁶⁶
- Stickoxid (NO_x) -Emissionen: 9997 t (nur klimawirksam, d.h. Emissionen ab einer Flughöhe von 8000m ü. Meer)²⁶⁷
- Ultrafeine Partikel: $5.1 \cdot 10^{23}$ Partikel (nur klimawirksam, d.h. Emissionen ab einer Flughöhe von 8000m ü. Meer)

Daraus ergeben sich folgende Kostensätze:²⁶⁸

Abbildung 10-11: Übersicht über die verwendeten Nicht-CO₂-Kostensätze für die vorliegende Studie

	Kostensätze 2021	
	Zentrale Werte	Sensitivität hoch
	CHF ₂₀₂₁	CHF ₂₀₂₁
Ultrafeine Partikel	99.46 pro 10 ¹⁷ Partikel	335.80 pro 10 ¹⁷ Partikel
Stickoxide	1790.74 pro t NO _x	52'229.95 pro t NO _x

Diese Kostensätze sind anzupassen, falls dies aufgrund neuer Erkenntnisse zu den ERF-Werten erforderlich ist.

10.4.3 Internalisierungsbeiträge

Das aktuell gültige CO₂-Gesetz legt eine *Kompensationspflicht für Importeure fossiler Treibstoffe* fest. Zusätzlich enthält das Gesetz *CO₂-Emissionsvorschriften für Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge (Neuwagen)* inklusive Sanktionen für die Fahrzeugimporteure bei Nichteinhaltung der Flottenzielwerte. Beide Instrumente können gemäss umfassender Abklärung durch das ARE (im Rahmen der Studien für die Jahre 2010 und 2015²⁶⁹) als Internalisierungsbeiträge betrachtet und in die Berechnung der externen Klimakosten berücksichtigt werden.

²⁶⁶ In der Vorgängerstudie wurden nur die CO₂-Emissionen auf Reiseflughöhe als Basis für die Berechnung der externen Kosten der Nicht-CO₂-Emissionen des Flugverkehrs verwendet. Da die ERF-Werte aus Lee et al. 2021 allerdings auf Basis aller CO₂-Emissionen (d.h. inkl. Start- und Landeflug) berechnet wurden, werden hier für die Normierung ebenfalls die gesamten CO₂-Emissionen verwendet.

²⁶⁷ 8km ist die mittlere Flughöhe, ab welcher die Bildung von Kondensstreifen überhaupt möglich ist. Der Einfachheit halber werden auch die NO_x-Emissionen ab dieser Höhe eingerechnet, da die relevanten chemischen Prozesse, die zu der Erwärmung führen, primär ab dieser Höhe auftreten.

²⁶⁸ Ultrafeine Partikel: $(430 \text{ CHF} / \text{t CO}_2 * 2.38 \text{ Mio. t CO}_2) * 49.6\% / 5.1 \cdot 10^{23} \text{ Partikel} = 99.46 \text{ CHF} / 10^{17} \text{ Partikel}$
Stickoxide: $(430 \text{ CHF} / \text{t CO}_2 * 2.38 \text{ Mio. t CO}_2) * 1.75\% / 9997 \text{ t} = 1790.74 \text{ CHF} / \text{t NO}_x$

²⁶⁹ INFRAS; Ecomplan (2019)

10.5 Vorgehen bei Differenzierungen

10.5.1 Differenzierung nach Antriebsart

Je nach Antriebsart sind die Emissionsfaktoren im Strassenverkehr unterschiedlich hoch. Das Wertgerüst ist unabhängig von der Antriebsart. Wir differenzieren die Kosten für den Strassenverkehr für die drei Antriebsarten (fossil, elektrisch und Rest; vgl. Kapitel 2.3) auf Basis der spezifischen Emissionsfaktoren je Fahrzeugkategorie und den drei Antriebsarten sowie anhand der jeweiligen Anteile an der Fahrleistung (vgl. Kapitel 20.1.6 und 20.2.1).

Die Internalisierungsbeiträge für den Strassenverkehr werden anhand des Treibstoffverbrauchs der Antriebsarten aufgeteilt.

Für den Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr wird auf eine Differenzierung nach Antriebsart verzichtet.

10.5.2 Differenzierung nach Kantonen

Kapitel 2.3 beschreibt die Differenzierung nach Kantonen für den Strassen- und Schienenverkehr. Die kantonale Differenzierung im Strassen- und Schienenverkehr wird anhand der kantonalen Anteile an den Emissionen von CO₂-Äquivalenten berechnet. Diese beruhen im Strassenverkehr auf den kantonalen Fahrleistungsanteilen, wenn vorhanden differenziert für Autobahn, innerorts und ausserorts und den entsprechenden Emissionsfaktoren (siehe Kapitel 20.1.5). Im Schienenverkehr beruht die kantonale Differenzierung auf den Fahrleistungsanteilen je Kanton für den Personen- und Güterverkehr.

10.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

Die externen Klimakosten werden im vorliegenden Bericht anhand von Kostensätzen je Tonne Treibhausgasemission berechnet und sind damit eine lineare Funktion der Emissionsmenge. Die hier berechneten Durchschnittskosten von Treibhausgasen entsprechen somit den Grenzkosten.

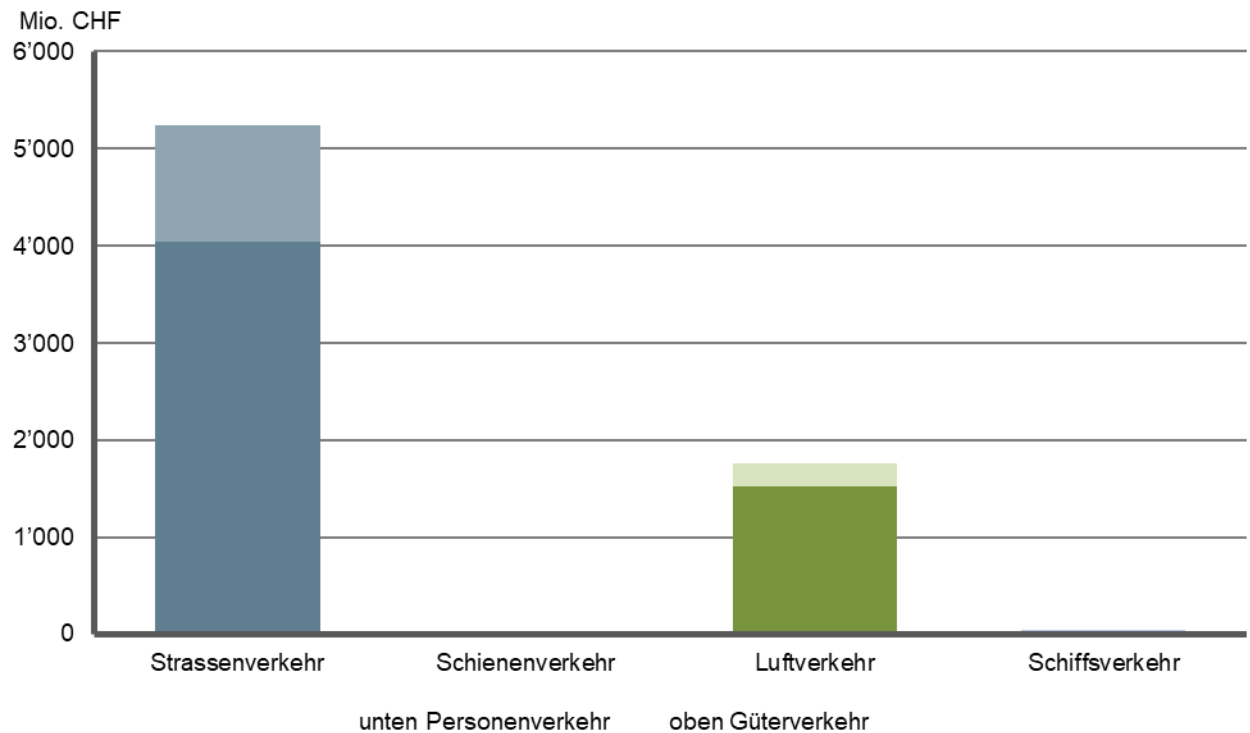
10.7 Ergebnisse

10.7.1 Externe Kosten

a) Überblick Gesamtverkehr

Abbildung 10-12 und Abbildung 10-13 zeigen die externen Klimakosten des Verkehrs 2021 nach Verkehrsträgern. Mit dem **zentralen CO₂-Kostensatz von 430 CHF/tCO₂** ergeben sich für das Jahr 2021 externe Klimakosten des Verkehrs von **7'043.7 Mio. CHF**. Rund 74% dieser Kosten entfallen auf den Strassenverkehr und knapp 25% auf den Luftverkehr. Schienen- und Schiffsverkehr verursachen sehr geringe (direkte) Klimakosten, nämlich 0.2% bzw. 0.6% des Gesamttotals.

Abbildung 10-12: Externe Klimakosten des Verkehrs 2021



Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse differenziert nach Personen- und Güterverkehr.

Abbildung 10-13: Überblick über die externen Klimakosten des Verkehrs 2021

in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr	4'044.3	1'185.7	5'229.9	74.2%
Schienenverkehr	2.5	9.4	11.9	0.2%
Luftverkehr	1'518.2	238.9	1'757.1	24.9%
Schiffsverkehr	23.1	21.7	44.8	0.6%
Total	5'588.0	1'455.7	7'043.7	100.0%
in % des Totals	79.3%	20.7%	100.0%	

b) Strassenverkehr

Die externen Klimakosten des Strassenverkehrs betragen 2021 insgesamt **5'229.9 Mio. CHF**. Die Kosten verteilen sich proportional zu den Treibhausgasemissionen auf die einzelnen Fahrzeugkategorien. 72.4% der Klimakosten des Strassenverkehrs werden durch Personenwagen verursacht, knapp 22.7% durch den Güterverkehr.

**Abbildung 10-14: Externe Klimakosten im Strassenverkehr 2021 nach Fahrzeugkategorien
(Hauptergebnis basierend auf zentralem CO₂-Kostensatz)**

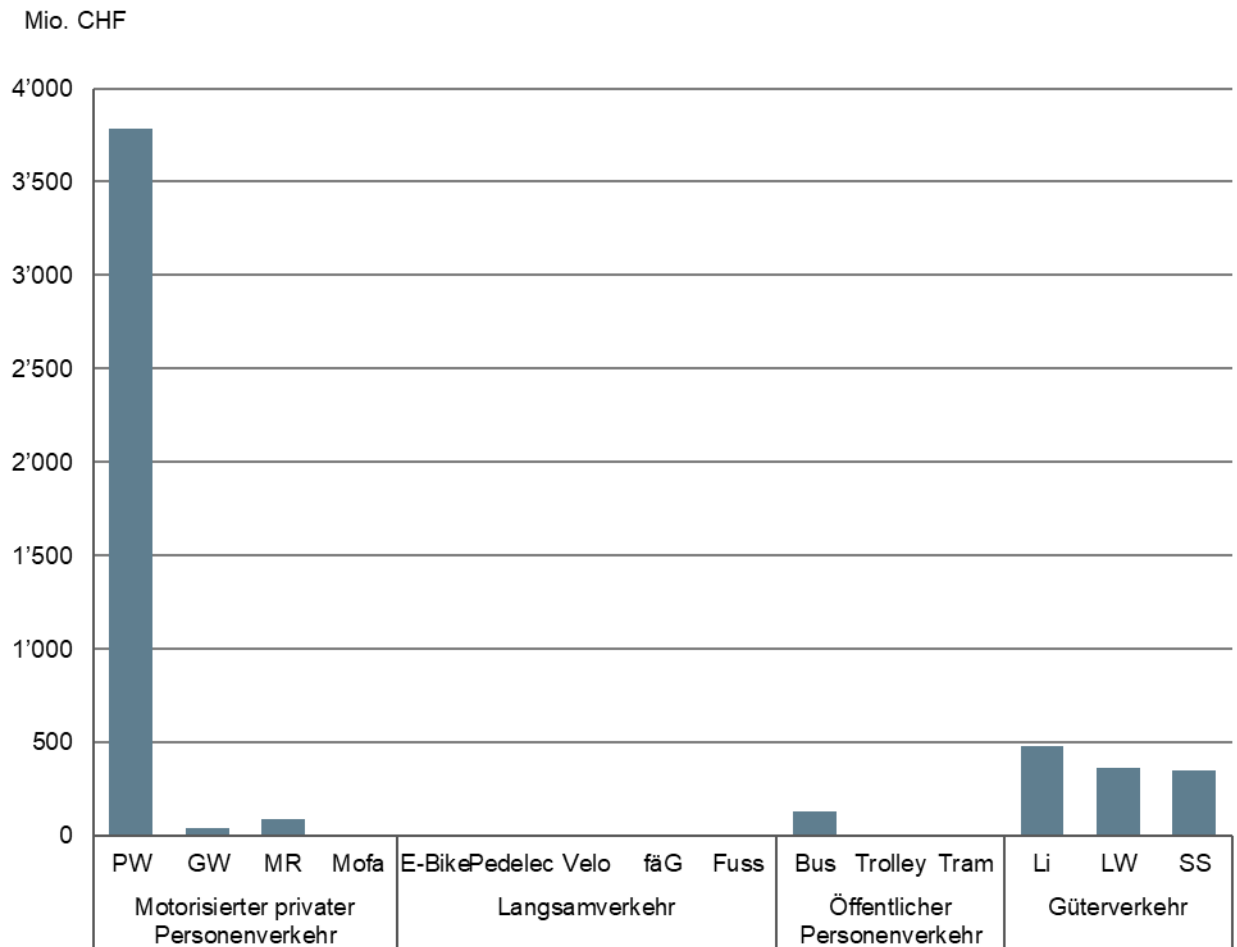


Abbildung 10-15: Externe Klimakosten im Strassenverkehr 2021 nach Fahrzeugkategorien

in Mio. CHF	Personenverkehr									Güterverkehr			Gesamt- total			
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr							
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Klimakosten	3'786.0	39.4	85.9	1.9	-	-	-	-	-	131.1	-	-	477.4	359.0	349.3	5'229.9
Total	3'786.0	39.4	85.9	1.9	-	-	-	-	-	131.1	-	-	477.4	359.0	349.3	5'229.9
in % des Gesamttotals	72.4%	0.8%	1.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.5%	0.0%	0.0%	9.1%	6.9%	6.7%	100.0%
Total Teilbereiche	3'913.1				0.0					131.1			1'185.7			5'229.9
in % des Gesamttotals	74.8%				0.0%					2.5%			22.7%			100.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

«0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «->» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt auch für alle folgenden Abbildungen.

Abbildung 10-16 zeigt die externen Klimakosten des Strassenverkehrs differenziert für die Fahrzeugkategorien und Antriebsarten. 99.6% der Kosten (5'206.9 Mio. CHF) des Strassenverkehrs werden durch fossile Fahrzeuge verursacht. Elektrofahrzeuge haben keine direkten CO₂-Emissionen und damit keine Klimakosten.

Abbildung 10-16: Externe Klimakosten im Strassenverkehr 2021 nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten

in Mio. CHF	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li		LW	SS
Fossil	3'767.3	39.4	85.9	1.9	-	-	-	-	-	129.1	-	-	476.5	358.4	348.5	5'206.9
Elektrisch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rest	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0	-	-	0.9	0.6	0.8	23.0
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	3'786.0	39.4	85.9	1.9	-	-	-	-	-	131.1	-	-	477.4	359.0	349.3	5'229.9
Anteil Fossil	99.5%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	98.4%	0.0%	0.0%	99.8%	99.8%	99.8%	99.6%
Anteil Elektrisch	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Anteil Rest	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.6%	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%	0.2%	0.4%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Abbildung 10-17 zeigt die Aufteilung der externen Klimakosten im Strassenverkehr nach Kantonen und Verkehrsmitteln. Im Kanton Zürich fallen mit einem Anteil von 14.8% die höchsten Kosten an. Darauf folgt der Kanton Bern und der Kanton Waadt mit jeweils 12% und fast 10.6% der Gesamtkosten.

Abbildung 10-17: Externe Klimakosten im Strassenverkehr 2021 nach Fahrzeugkategorien und Kantonen

in Mio. CHF	Personenverkehr									Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr					
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
Zürich	564.4	6.2	12.8	0.4	-	-	-	-	-	21.7	-	68.4	50.4	49.0	773.4
Bern	458.0	4.8	10.4	0.2	-	-	-	-	-	13.3	-	57.9	41.5	40.4	626.4
Luzern	194.2	2.1	4.4	0.1	-	-	-	-	-	8.2	-	22.5	20.3	19.7	271.5
Uri	30.9	0.6	0.7	0.0	-	-	-	-	-	1.0	-	3.8	8.3	8.1	53.4
Schwyz	85.5	0.7	1.9	0.0	-	-	-	-	-	2.3	-	9.8	6.0	5.8	112.1
Obwalden	16.3	0.2	0.4	0.0	-	-	-	-	-	0.3	-	2.1	1.0	1.0	21.2
Nidwalden	23.7	0.4	0.5	0.0	-	-	-	-	-	0.6	-	3.5	3.9	3.8	36.4
Glarus	22.5	0.3	0.5	0.0	-	-	-	-	-	0.6	-	4.1	2.5	2.4	33.0
Zug	56.5	0.4	1.3	0.0	-	-	-	-	-	2.5	-	6.5	3.3	3.2	73.7
Freiburg	144.4	1.5	3.3	0.1	-	-	-	-	-	3.8	-	16.6	14.1	13.7	197.4
Solothurn	125.9	2.0	2.9	0.1	-	-	-	-	-	4.0	-	16.7	20.9	20.3	192.7
Basel-Stadt	35.9	0.4	0.8	0.1	-	-	-	-	-	3.6	-	3.2	3.5	3.4	50.7
Basel-Landschaft	119.4	1.6	2.7	0.1	-	-	-	-	-	3.7	-	17.0	16.5	16.0	176.9
Schaffhausen	24.6	0.2	0.6	0.0	-	-	-	-	-	1.5	-	2.7	1.9	1.8	33.3
Appenzell A.Rh.	17.1	0.1	0.4	0.0	-	-	-	-	-	0.6	-	2.0	0.5	0.5	21.1
Appenzell I.Rh.	4.2	0.0	0.1	0.0	-	-	-	-	-	0.1	-	0.5	0.2	0.1	5.2
St. Gallen	285.1	3.0	6.5	0.1	-	-	-	-	-	10.2	-	41.9	27.5	26.7	401.0
Graubünden	103.7	1.3	2.4	0.0	-	-	-	-	-	5.5	-	16.9	10.9	10.6	151.3
Aargau	342.0	4.1	7.8	0.1	-	-	-	-	-	10.2	-	45.9	41.6	40.5	492.0
Thurgau	120.2	1.1	2.7	0.0	-	-	-	-	-	2.7	-	13.5	9.8	9.5	159.6
Tessin	217.5	2.2	4.9	0.1	-	-	-	-	-	6.1	-	24.8	25.0	24.3	305.0
Waadt	421.0	3.6	9.5	0.2	-	-	-	-	-	9.1	-	52.6	30.7	29.9	556.6
Wallis	134.1	1.2	3.0	0.1	-	-	-	-	-	6.6	-	17.6	9.6	9.4	181.6
Neuenburg	70.9	0.4	1.6	0.0	-	-	-	-	-	2.4	-	8.1	3.1	3.0	89.6
Genf	130.9	0.6	3.0	0.2	-	-	-	-	-	9.8	-	15.8	4.3	4.2	168.7
Jura	37.2	0.3	0.8	0.0	-	-	-	-	-	0.9	-	2.9	2.0	1.9	46.1
Total	3'786.0	39.4	85.9	1.9	-	-	-	-	-	131.1	-	477.4	359.0	349.3	5'229.9

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

c) Schienenverkehr

Die externen Klimakosten (basierend auf dem zentralen Klimakostensatz) des Schienenverkehrs sind aufgrund der tiefen Treibhausgasemissionen gering und betragen 2021 insgesamt lediglich **11.9 Mio. CHF**. Der grösste Teil (75.6 %) dieser Kosten wird durch den Güterverkehr verursacht, wo deutlich mehr Dieselloks eingesetzt werden als im Personenverkehr (Abbildung 10-18).

Abbildung 10-18: Externe Klimakosten im Schienenverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr

in Mio. CHF	Personen-verkehr	Güter-verkehr	Total
Klimakosten	2.5	9.4	11.9
Total	2.5	9.4	11.9

Abbildung 10-19 zeigt die Aufteilung der externen Klimakosten im Schienenverkehr nach Kantonen sowie Verkehrsart. Der Kanton Bern und Aargau weisen mit jeweils 16.2% der Gesamtkosten die höchsten Anteile auf. Die Kantone Tessin (9%), Waadt (8.2%) und Zürich folgen mit Anteilen knapp unter 10% der Gesamtkosten.

Abbildung 10-19: Externe Klimakosten im Schienenverkehr 2021 nach Personen- und Güterverkehr und Kantone

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich	0.4	0.6	1.0
Bern	0.4	1.5	1.9
Luzern	0.1	0.1	0.2
Uri	0.0	0.3	0.4
Schwyz	0.1	0.4	0.5
Obwalden	0.0	0.0	0.0
Nidwalden	0.0	0.0	0.0
Glarus	0.0	0.0	0.1
Zug	0.0	0.1	0.1
Freiburg	0.1	0.1	0.2
Solothurn	0.1	0.6	0.7
Basel-Stadt	0.0	0.1	0.1
Basel-Landschaft	0.1	0.4	0.5
Schaffhausen	0.0	0.0	0.0
Appenzell A.Rh.	0.0	0.0	0.0
Appenzell I.Rh.	0.0	-	0.0
St. Gallen	0.1	0.3	0.4
Graubünden	0.1	0.4	0.6
Aargau	0.2	1.7	1.9
Thurgau	0.1	0.2	0.2
Tessin	0.1	1.0	1.1
Waadt	0.2	0.7	1.0
Wallis	0.1	0.5	0.7
Neuenburg	0.1	0.2	0.3
Genf	0.0	0.1	0.1
Jura	0.0	0.0	0.0
Total	2.5	9.4	11.9

d) Luftverkehr

Die externen Klimakosten des Luftverkehrs im Jahr 2021 betragen **1'757.1 Mio. CHF**. Gut 83% der Kosten entfallen auf den Personenverkehr, der Rest auf den Güterverkehr. Die Ergebnisse basieren auf den Emissionen gemäss Halbstreckenprinzip (siehe Kapitel 2.4.1).

Abbildung 10-20: Externe Klimakosten im Luftverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Klimakosten		1'518.2	238.9	1'757.1
Total		1'518.2	238.9	1'757.1

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung der Kosten auf die einzelnen Flugarten (Linien- und Charterverkehr, Helikopter und General Aviation) und Infrastrukturtypen. Dargestellt ist das Hauptergebnis basierend auf dem zentralen CO₂-Kostensatz.

Abbildung 10-21: Externe Klimakosten im Luftverkehrs 2021 nach Flugarten und Infrastrukturtypen

	in Mio. CHF	Landesflughäfen	Regionalflughäfen	Total
Linien- und Charterverkehr interkontinental		731.6	0.3	732.0
Linien- und Charterverkehr europäisch		912.3	3.7	916.1
Helikopter		0.2	0.4	0.7
Business Aviation		51.7	9.1	60.8
Rest General Aviation		38.9	8.6	47.5
Total		1'734.8	22.2	1'757.1

e) Schiffsverkehr

Die externen Klimakosten des Schiffsverkehrs im Jahr 2021 betragen **45 Mio. CHF**. In diesen Kosten nicht enthalten ist gemäss Definition der Transportrechnung die Freizeitschifffahrt, die vernachlässigbar sein sollte. 52% der Kosten wird durch die öffentliche Personenschifffahrt verursacht, der Rest durch den Güterverkehr (Rheinschifffahrt, Güterschiffe auf Seen, Fischer- und Arbeitsboote).

Abbildung 10-22: Externe Klimakosten im Schiffsverkehr 2021 nach Personen- und Güterverkehr

	Personen-verkehr	Güter-verkehr	Total
in Mio. CHF			
Klimakosten	23.1	21.7	44.8
Total	23.1	21.7	44.8

10.7.2 Soziale Kosten

Wie im Kapitel 10.4.3 erwähnt, sieht das gültige CO₂-Gesetz eine *Kompensationspflicht für Importeure fossiler Treibstoffe* und *CO₂-Emissionsvorschriften für die Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge (Neuwagen)* – inklusive Sanktionen für Autoimporteure bei Nichteinhaltung – vor. Diese werden als Internalisierungsbeiträge in Höhe von 148.7 Mio. CHF im Jahr 2021 bei der Berechnung der externen Kosten berücksichtigt. Die gesamten **sozialen Klimakosten** des Verkehrs in der Schweiz im Jahr 2021 betragen somit **7'192.4 Mio. CHF** und sind 148.7 Mio. CHF höher als die externen Klimakosten. Unter Berücksichtigung des minimalen bzw. maximalen CO₂-Kostensatzes ergibt sich als Sensitivitätsanalyse eine Bandbreite der sozialen Klimakosten von 2.1 bis 22.4 Mrd. CHF.

Der grösste Teil der Internalisierungsbeiträge wird im Strassenverkehr aufgrund des hohen Verbrauchs an fossilen Treibstoffen und der Emissionsvorschriften für Personenwagen und leichte Nutzfahrzeuge erhoben. Die sozialen Klimakosten des Strassenverkehrs betragen 5'377 Mio. CHF und sind damit um 147 Mio. CHF höher als die externen Klimakosten. Demgegenüber liegen die sozialen Klimakosten des Schienenverkehrs nur um 0,3 Mio. CHF über den externen Kosten und betragen 12,2 Mio. CHF. Die sozialen Klimakosten des Luftverkehrs betragen 1'757.5 Mio. CHF und sind damit um 0.4 Mio. CHF höher als die externen Kosten. Die sozialen Klimakosten der Schifffahrt betragen knapp 45.7 Mio. CHF und sind damit um 0.9 Mio. CHF höher als die externen Kosten.

10.8 Sensitivitätsanalyse

10.8.1 Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten

Für die Klimakosten wird eine Sensitivitätsrechnung für einen unteren bzw. oberen CO₂-Kostensatz vorgenommen (vgl. Kapitel 10.4.1).

Abbildung 10-23: Übersicht über Inputdaten, Annahmen und Bandbreiten beim Klimakostensatz

Bereich/ Annahme	Wissensstand	Vorgehen	Kostensätze 2021
Wertgerüst			[CHF ₂₀₂₁ /t CO ₂ äq.]
Kostensatz pro Tonne CO ₂	Wissen mit Unsicherheiten	Sensitivität tief	
		reine Zeitpräferenzrate 1% und ohne equity weighting	130
		Zentraler Wert	
		reine Zeitpräferenzrate 1%	430
		Sensitivität hoch	
		reine Zeitpräferenzrate 0.0%	1'370
			[CHF ₂₀₂₁ /t NOx] / [CHF ₂₀₂₁ / 10 ¹⁷ Part.]
Kostensätze der non-CO ₂ Emissionen im Luftverkehr	Wissen mit Unsicherheiten	Zentrale Werte	
		NOx	1'791
		Ultrafeine Partikel	100
		Sensitivität hoch	
		NOx	52'230
		Ultrafeine Partikel	336

10.8.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die folgenden beiden Abbildungen stellen dar, wie sich die externen Klimakosten verändern, wenn wie in Abbildung 10-23 dargestellt, die Annahmen für den Klimakostensatz oder für die Wahl der ERF-Werte für die Berechnung der non-CO₂-Kostensätze geändert werden:

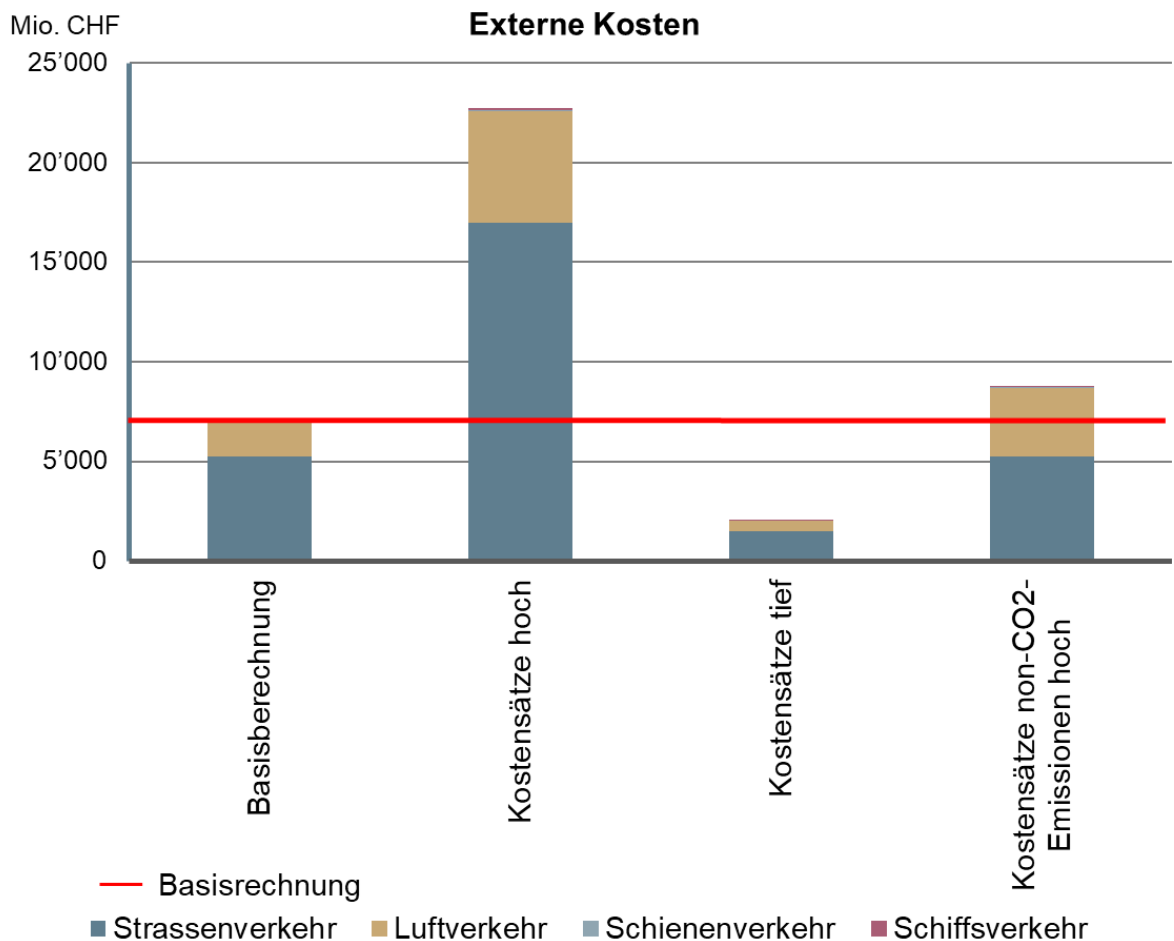
- Wird der Klimakostensatz unter der Annahme einer reinen Zeitpräferenzrate von 0.0%, aber mit dem equity weighting berechnet, resultiert ein Klimakostensatz von 1'370 CHF pro Tonne Treibhausgasemission. Dies führt zu einer Steigerung der externen Klimakosten für alle Verkehrsträger um rund 220%.
- Wird im Gegenzug der Klimakostensatz unter der Annahme von einer reinen Zeitpräferenzrate von 1% und ohne equity weighting berechnet, verringern sich die externen Kosten bei allen Verkehrsträgern um rund 70%.
- Werden die Kostensätze für die Emission von NOx und ultrafeinen Partikeln auf Flughöhe nicht mit den «at least», sondern mit den höheren «best guess» ERF-Werten berechnet, fallen die Kostensätze höher aus. Dies führt zu einer Zunahme der externen Kosten des Luftverkehrs von 97%.

Die Ergebnisse sind bei den sozialen Kosten fast identisch, da die Internalisierungsbeiträge im Umfang von 148 Mio. CHF nur rund 0.6% der sozialen Kosten betragen. Auf eine separate Darstellung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für soziale Kosten wird deshalb verzichtet.

Abbildung 10-24: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die externen Klimakosten 2021

in Mio. CHF	Strassenverkehr	Schienenverkehr	Luftverkehr	Schiffsverkehr
Basisberechnung	5'229.9	11.9	1'757.1	44.8
Kostensätze hoch	16'984.4	38.5	5'599.0	144.7
Kostensätze tief	1'478.5	3.4	530.9	12.9
Kostensätze non-CO ₂ -Emissionen hoch	5'229.9	11.9	3'466.7	44.8
Abweichung von Basisrechnung in %				
Kostensätze hoch	225%	223%	219%	223%
Kostensätze tief	-72%	-71%	-70%	-71%
Kostensätze non-CO ₂ -Emissionen hoch	0%	0%	97%	0%

Abbildung 10-25: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die externen Klimakosten 2021

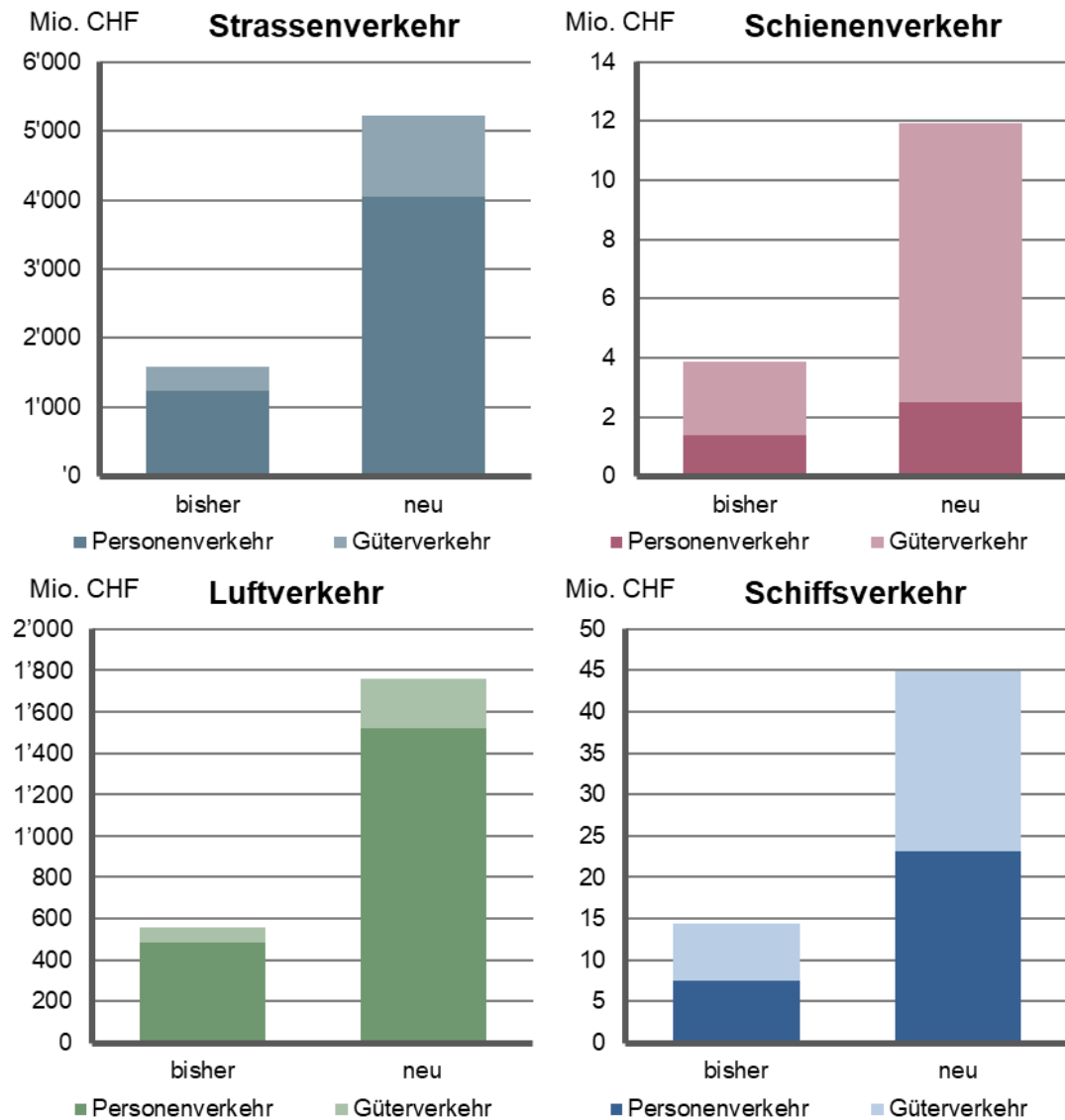


10.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen grafisch und tabellarisch den Vergleich der Klimakosten für das Jahr 2021 mit den Ergebnissen der Berechnungen ermittelt mit dem früheren Tool. Der

Vergleich zeigt den Effekt der neuen Datengrundlagen und Anpassungen in der Berechnungsmethodik.

Abbildung 10-26: Vergleich der Berechnungen der Klimakosten basierend auf der ursprünglichen und überarbeiteten Berechnungsmethodik 2021



Achtung: Die Skalen der vier Verkehrsträger sind unterschiedlich

Abbildung 10-27: Überblick und Vergleich der Berechnungen für die Klimakosten basierend auf den alten und den neuen Datengrundlagen sowie Methodik

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	1'226.60	366.20	1'592.8
Schienenverkehr	1.4	2.5	3.8
Luftverkehr	481.8	78.7	560.5
Schiffsverkehr	7.5	7.0	14.5
Total	1'717.3	454.4	2'171.6
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	4'044.3	1'185.7	5'229.9
Schienenverkehr	2.5	9.4	11.9
Luftverkehr	1'518.2	238.9	1'757.1
Schiffsverkehr	23.1	21.7	44.8
Total	5'588.0	1'455.7	7'043.7
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	229.7%	223.8%	228.3%
Schienenverkehr	78.9%	283.8%	209.9%
Luftverkehr	215.1%	203.5%	213.5%
Schiffsverkehr	209.8%	209.8%	209.8%
Total	225.4%	220.4%	224.4%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	2'817.7	819.5	3'637.1
Schienenverkehr	1.1	7.0	8.1
Luftverkehr	1'036.4	160.2	1'196.5
Schiffsverkehr	15.7	14.7	30.4
Total	3'870.8	1'001.3	4'872.1

Insgesamt führt die neue Berechnung der externen Klimakosten zu einer Steigerung um knapp 225%. Hauptgrund für diese Zunahme ist in erster Linie der Klimakostensatz der rund 196 % höher liegt. Im Gegensatz zu den sozialen Klimakosten sind die Internalisierungsbeiträge nicht von der Wahl des Klimakostensatzes abhängig und die angepasste Berechnungsmethodik führt damit zu keiner Veränderung der Internalisierungsbeiträge. Jedoch sinkt der Anteil der Internalisierungsbeiträge an den sozialen Kosten und damit liegt die Veränderung der externen Klimakosten mit der neuen Berechnungsmethodik über der Zunahme durch den höheren Klimakostensatz. Im Strassenverkehr führte die Aktualisierung der Emissionsfaktoren zudem zu einem Anstieg der CO₂-äq-Emissionen um 1.5 %. Dies trägt zusätzlich dazu bei, dass im Strassenverkehr die Veränderung über den 196% liegt. Ebenfalls grössere Erhöhungen sind zudem im Luftverkehr zu beobachten, diese sind auf die neue Berechnungsmethodik der Nicht-CO₂-Emissionen im Luftverkehr zurückzuführen.

11 Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse

11.1 Berechnungsgegenstand

Die Kosten von vor- und nachgelagerten Prozessen bewerten Umweltbelastungen und Umweltschäden, die nicht direkt bei der Verkehrsaktivität, sondern beispielsweise bei der Herstellung von Fahrzeugen, bei der Gewinnung und Aufbereitung von Treibstoffen oder dem Unterhalt von Verkehrsinfrastrukturen entstehen. Dabei wird eine Lebenszyklusperspektive eingenommen, wie dies bei «Life cycle assessments» der Fall ist. Diese Kosten bilden damit indirekte Umweltauswirkungen des Verkehrs ab. Im Gegensatz zu den direkten Umweltauswirkungen der Verkehrsaktivität können die Emissionen und Schäden von vor- und nachgelagerten Prozessen auch ausserhalb der Schweiz anfallen.

In der vorliegenden Studie zur Berechnung der externen Kosten des Verkehrs in der Schweiz werden, wie in den früheren Arbeiten²⁷⁰ folgende drei Kategorien von vor- und nachgelagerten Prozessen berücksichtigt:

1. Herstellung, Unterhalt und Entsorgung von Fahrzeugen (Verkehrsmittel).
2. Herstellung, Transport und Bereitstellung der Treibstoffe bzw. der Antriebsenergie wie z.B. Strom (Energiebereitstellung) sowie
3. Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der Verkehrsinfrastruktur (Infrastruktur).

Es werden die Effekte von Emissionen von Treibhausgasen sowie von den Luftschadstoffen Stickoxid (NO_x), Feinstaub (PM₁₀), Schwefeldioxid (SO₂) und flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan (NMVOC) monetarisiert.

Wie im Kapitel 3.1.1 erwähnt, sind die infrastrukturbedingten Kosten im Bereich vor- und nachgelagerte Prozesse eine Besonderheit. Es sind soziale Umweltkosten, wenn eine Situation "mit Verkehr" im Vergleich zur extremen Situation "ohne Verkehr" betrachtet wird, wie dies bei der Kosten und Finanzierung des Verkehrs-Statistik (KFV – totale Kosten) der Fall ist.

Diese Kosten sind dagegen grösstenteils bzw. kurzfristig und unmittelbar unabhängig von der Verkehrsmenge. Die Kosten der vor- und nachgelagerten Prozesse für die Infrastruktur (Punkt 3 oben) sollten daher nicht in Betracht gezogen werden, wenn externe Effekte mit dem Ziel der Internalisierung via Pricing einer einzelnen Fahrt im Vordergrund stehen.

11.2 Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen

Die Methodik zur Bewertung indirekter Effekte bei vor- und nachgelagerten Prozessen entspricht im Wesentlichen dem Vorgehen, das bei den früheren Studien²⁷¹ verwendet wurde. Wie für alle Kostenbereiche werden auch bei den vor- und nachgelagerten Prozessen die Kosten der Strasse

²⁷⁰ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

²⁷¹ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten differenziert ausgewiesen. Damit wird der zunehmenden Bedeutung von Elektromobilität und der in diesem Bereich stattfindenden technischen Entwicklung Rechnung getragen. Für die Monetarisierung der Schäden durch vor- und nachgelagerte Prozesse orientiert sich diese Kostenkategorie stark an der Methodik der jeweils berücksichtigten Schadenskategorien. Für die Berechnung der Klimakosten durch vor- und nachgelagerte Treibhausgasemissionen wird beispielsweise gleich vorgegangen wie bei den direkten Klimakosten.

Im Gegensatz zu den Berechnungen der externen Kosten des Verkehrs für die Jahr 2010 und 2015 werden in dieser Studie die Kosten des Fuss- und Veloverkehr als Teil des Strassenverkehrs ebenfalls mit den Emissionsfaktoren von Mobitool²⁷² berechnet, wobei diese Null betragen.

Um die ökonomischen Folgekosten für die Gesellschaft zu quantifizieren, müssten theoretisch sämtliche Prozessketten detailliert dokumentiert und die dabei anfallenden Umweltbelastungen sowie die davon betroffenen Personen bzw. Ökosysteme erfasst werden. Mit Hilfe von Belastungs-Wirkungs-Beziehungen müssten dann die entstehenden Schäden quantifiziert und schliesslich bewertet werden. Aufgrund der starken Vernetzung der Weltwirtschaft treten Umweltbelastungen häufig global auf, die Bewertung der resultierenden Schäden ist jedoch stark vom regionalen bzw. nationalen Kontext abhängig. Es ist daher kaum möglich, sämtliche Umweltbelastungen zu erfassen und verlässlich zu quantifizieren. Aus diesem Grund fokussiert der Berechnungsansatz in der vorliegenden Studie lediglich auf die wichtigsten globalen Umweltbelastungen, deren Schäden auf Basis internationaler Studien auch ohne detailliertes Wissen zur genauen Emissionsquelle grob quantifiziert werden können.

Die folgenden Berechnungen erfassen die Treibhausgasemissionen (v.a. CO₂) und die Luftschadstoffe NO_x, PM₁₀, SO₂ und NMVOC sämtlicher vor- und nachgelagerter Prozesse des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs der Schweiz im Jahr 2021. Dabei wird nicht berücksichtigt, ob diese Emissionen in der Schweiz selbst oder im Ausland emittiert werden. Diese Emissionen werden schliesslich mit den entsprechenden Kostensätzen monetarisiert. Das Vorgehen entspricht somit dem at least Ansatz, da nicht alle anfallenden Umweltbelastungen, die im ursächlichen Zusammenhang mit dem Verkehr in der Schweiz stehen, bewertet werden.

Abbildung 11-1 zeigt die angewandte Bewertungsmethodik für den Strassen- und Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr im Detail.

Als Datengrundlage dienen die Fahrleistungen und Verkehrsleistungen (1) der Strasse differenziert nach Fahrzeugkategorien und Antriebsart, diejenigen der Schiene differenziert nach Personen- und Güterverkehr, des Luftverkehrs differenziert nach Flugart und Infrastrukturtyp und des Schiffsverkehrs nach Personenverkehr, Güterverkehr Rhein und Güterverkehr Seen.

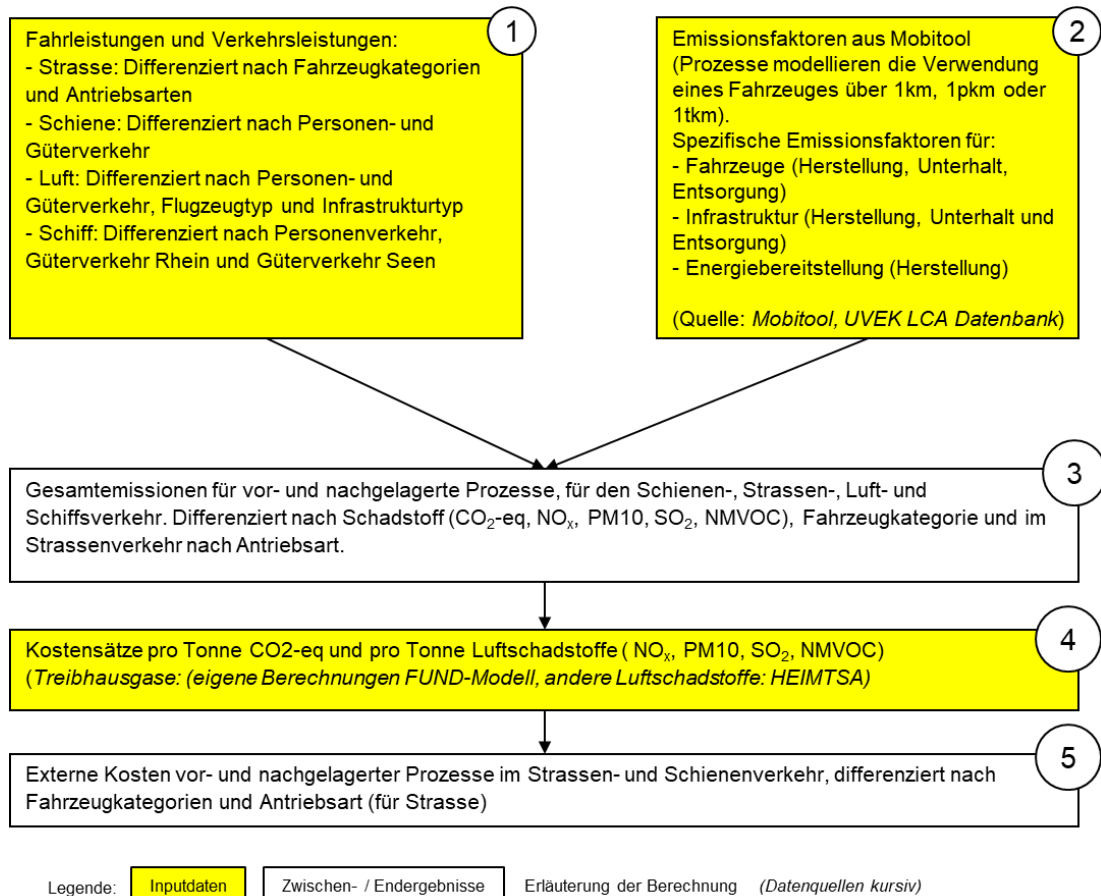
Die Emissionen der vor- und nachgelagerten Prozesse (3) werden berechnet, indem für alle hier untersuchten Fahrzeuge bzw. Verkehrsmittel spezifische Emissionsfaktoren je Fahr- oder Verkehrsleistung mit der entsprechenden Fahr- oder Verkehrsleistung multipliziert werden²⁷³ (2). Wir

²⁷² Sacchi; Bauer (2023)

²⁷³ Detaillierte Beschreibungen der LCA-Modellierungen sind im Bericht von Sacchi; Bauer (2023), in der Excel-Datei von Mobitool (www.mobitool.ch) und der UVEK-Datenbank (BAFU 2024) zu finden.

verwenden dafür jeweils differenzierte Emissionsfaktoren für die Kategorien Fahrzeuge (umfasst Herstellung, Unterhalt und Entsorgung), Infrastruktur (umfasst Herstellung, Unterhalt und Entsorgung) und Energiebereitstellung (Herstellung).

Abbildung 11-1: Bewertungsmethodik Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse aller Verkehrsträger



Addiert man sämtliche, nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten, respektive nach Personen- und Güterverkehr differenzierte Emissionen zusammen, erhält man die Gesamtemissionen für die vor- und nachgelagerten Prozesse des Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs (3). Abgedeckt sind in der vorliegenden Arbeit die Treibhausgasemissionen sowie die weiteren Luftschadstoffe NO_x , PM_{10} , SO_2 und NMVOC. Monetarisiert werden die Emissionen, indem jeder Luftschadstoff und die Treibhausgase (CO_2 -äq) mit einem spezifischen Kostensatz (4) multipliziert werden (5).

Box: Traktionsbatterien²⁷⁴

Batterien sind der Schlüssel zur Dekarbonisierung des Verkehrs. Damit verbunden sind aber auch neue Fragestellungen insbesondere zur Ökobilanz von Elektrofahrzeugen sowie der Zusammensetzung der Traktionsbatterien. Die Herstellung der Batterie verantwortet rund die Hälfte der Umweltwirkungen der Produktion eines Elektroautos. Aktuell kommen als Traktionsbatterien für Serienfahrzeuge fast ausschliesslich Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz. In diesen sind verschiedene Metalle verbaut, u.a. Lithium (Li), Kobalt (Co), Nickel (Ni), Mangan (Mn), Graphit (C) Aluminium (Al), Kupfer (Cu) und Eisen (Fe). Die Batterien sind in Entwicklung, d.h. die Zusammensetzung und Materialien werden sich verändern. Hersteller versuchen, möglichst kleine Batterien zu benutzen und deren Herstellung möglichst umweltfreundlich und sozial zu gestalten. Am Lebensende eines Elektroautos werden durch Recycling wichtige Materialien zurückgewonnen. Im Betrieb ist ein Elektroauto viermal energieeffizienter als ein vergleichbarer Verbrenner.

Die Metalle für die Herstellung einer Lithium-Ionen-Batterie werden weltweit beschafft. Mit zunehmender Elektrifizierung wird auch die Nachfrage nach diesen Metallen zunehmen. Nicht nur die Gewinnung von Rohstoffen für die Batterieproduktion hat negative Auswirkungen auf die Umwelt und die Menschen. Auch andere im Fahrzeugbau verwendete Rohstoffe sowie die Förderung und Aufbereitung von Erdöl bei fossil betriebenen Fahrzeugen haben negative Einflüsse. Umso wichtiger ist der Ausweis der *Kosten der vor- und nachgelagerten Prozesse*. Vorliegend beschränken wir uns auf die *Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen* der vor- und nachgelagerten Prozesse. Nicht berücksichtigt werden Belastungen der Böden und Gewässer durch Emissionen sowie die Landnutzung und der Wasserverbrauch. Für Elektrofahrzeuge beinhaltet dies auch die entsprechenden Emissionen, die im Rahmen der Batterieproduktion anfallen.

11.3 Mengengerüst

Die wichtigste Grundlage für die Berechnung vor- und nachgelagerter Effekte ist eine umfassende Ökoinventar-Datenbank, die Emissionen für transportspezifische Prozesse und Produkte (z.B. Fahrzeuge, Treibstoffe, Strom) und Infrastrukturen zur Verfügung stellt. In der Schweiz ist Ecoinvent²⁷⁵ die wichtigste und am besten etablierte Ökobilanzierungs-Datenbank. Sie enthält umfassende Ökobilanz-Inventardaten. Basierend auf Ecoinvent und mit zusätzlichen LCA-Datensets (entwickelt am PSI) wurde für den Verkehr die Mobitool²⁷⁶ Plattform entwickelt. Die interne UVEK-Datenbank²⁷⁷, die für Mobitool als Grundlage diente und im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt

²⁷⁴ INFRAS; EMPA (2023)

²⁷⁵ Wernet; Bauer; Steubing; u. a. (2016)

²⁷⁶ Sacchi; Bauer (2023)

²⁷⁷ BAFU (2024)

erstellt wurde, weist damit umfassende Ökobilanz-Inventardaten und bereits modellierte Prozesse spezifisch für den Verkehr auf und diente hier ebenfalls als Grundlage. Die Prozesse modellieren jeweils Emissionen, die durch den Transport von 1 Person oder 1 Tonne Material über einen Kilometer verursacht werden bzw. wenn ein Fahrzeug einen Kilometer fährt. Die Emissionsfaktoren umfassen dabei alle vor- und nachgelagerten Prozesse, sowie die direkten Emissionen dieses Transportvorgangs und weisen diese als kg pro Fahrleistung bzw. Verkehrsleistung aus. Vorliegend unterteilen wir die Emissionsfaktoren in die Kategorien Fahrzeuge, Infrastruktur und Energiebereitstellung. Die Emissionen dieser drei Kategorien wurden mittels Verkehrsleistung oder Fahrleistung der entsprechenden Fahrzeuge oder Verkehrsmittel berechnet. Die Emissionen der Energiebereitstellung im Luftverkehr weichen von dieser Berechnungsweise ab, da nicht für alle Verkehrsmittel Emissionsfaktoren pro Verkehrsleistung beziehungsweise Fahrleistung in der Mobitool-Datenbank berechnet werden konnten. Die Emissionen der Energiebereitstellung wurde basierend auf dem Treibstoffverbrauch und den Emissionsfaktoren für die Bereitstellung von Kerosin aus Ecoinvent berechnet und entsprechend dem Treibstoffverbrauch auf die Flugarten aufgeteilt. Abbildung 11-2 zeigt eine Übersicht über das Mengengerüst.

Abbildung 11-2: Mengengerüst: Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen im Jahr 2021 verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse für die vier Verkehrsträger

Verkehrsträger	Kategorien	Luftschadstoff [t/a]				
		CO ₂ -eq.	NM VOC	NO _x	PM ₁₀	SO ₂
Strassenverkehr	total	9'888'605.4	47'241.9	15'349.5	4'066.4	17'068.8
	Verkehrsmittel	4'221'955.0	6'680.2	5'633.9	2'655.1	9'580.6
	Infrastruktur	1'489'064.3	6'673.3	3'034.9	733.6	1'192.8
	Energiebereitstellung	4'177'586.1	33'888.4	6'680.7	677.7	6'295.4
Schienenverkehr	total	234'934.5	256.3	363.5	238.9	308.9
	Verkehrsmittel	86'031.8	109.9	107.0	82.1	126.8
	Infrastruktur	127'674.4	99.2	227.7	137.6	146.7
	Energiebereitstellung	21'228.4	47.2	28.8	19.3	35.3
Luftverkehr	total	948'415.5	6'824.9	1'555.8	269.8	1'563.8
	Verkehrsmittel	1'351.0	3.9	1.9	1.2	2.8
	Infrastruktur	44'932.7	90.4	62.2	8.5	78.5
	Energiebereitstellung	902'131.8	6'730.6	1'491.7	260.1	1'482.6
Schiffsverkehr	total	32'161.6	120.2	64.3	13.7	125.3
	Verkehrsmittel	2'034.7	20.4	3.2	2.8	6.6
	Infrastruktur	13'245.7	4.0	20.0	4.4	28.9
	Energiebereitstellung	16'881.2	95.9	41.1	6.5	89.7
Gesamt		11'104'116.95	54'443.31	17'333.12	4'588.81	19'066.80

11.4 Wertgerüst

Für die Monetarisierung der **Treibhausgasemissionen** aus vor- und nachgelagerten Prozessen wird der gleiche Kostensatz pro Tonne CO₂-Äquivalent verwendet wie bei den Klimakosten durch direkte Treibhausgasemissionen. Wie im Kapitel 10.4.1 beschrieben, wird für das Jahr 2021 als zentraler Wert ein globaler Schadenskostensatz von **430 CHF₂₀₂₁ pro Tonne CO₂-äq** verwendet.

Grundlage für die Monetarisierung der weiteren **Luftschadstoffe** aus vor- und nachgelagerten Prozessen bilden die Kostensätze aus dem EU-Projekt HEIMTSA²⁷⁸ und der UBA-Methodenkonvention 2.0²⁷⁹. In der HEIMTSA-Studie werden spezifische Kostensätze pro emittierter Tonne Stickoxid (NO_x), Feinstaub (PM₁₀), Schwefeldioxid (SO₂) sowie flüchtiger organischer Verbindungen (NMVOC) aus unbekannten Quellen ausgewiesen.

Eine zentrale Frage stellt sich bei der Wahl des Kostensatzes, da unklar ist, wo die Emissionen geografisch anfallen (Schweiz, Europa, restliche Welt). Wir folgen mit der Verwendung des Kostensatzes für die EU28 dem europäischen Standard (ebenfalls verwendet in der Methodenkonvention 3.1²⁸⁰ und dem EU-Handbuch²⁸¹).

Die folgende Abbildung zeigt die Kostensätze des EU Handbook für die Region EU28, die auf den Daten von HEIMTSA basieren (in EUR₂₀₁₆/t) sowie die für die vorliegende Studie verwendeten Kostensätze in CHF für das Jahr 2021 (CHF₂₀₂₁/t). Die Umrechnung in Schweizer Franken erfolgt auf Basis des mittleren Wechselkurses des Jahres 2016. Anschliessend werden die Kostensätze vom Jahr 2016 auf das Jahr 2021 auf Basis der Konsumentenpreisentwicklung der Schweiz fortgeschrieben (Landesindex der Konsumentenpreise LIK).

Abbildung 11-3: Externe bzw. soziale Kosten durch Luftschadstoffemissionen bei vor- und nachgelagerten Prozessen. Kosten pro Tonne Luftschadstoff (NO_x, PM₁₀, SO₂, NMVOC)

Kostensätze pro emittierte Tonne	EUR ₂₀₁₆ pro Tonne	CHF ₂₀₂₁ pro Tonne
	EU Handbook (basierend auf HEIMTSA)	(angepasste Daten 2021)
NO _x	12'600.00	14'074.77
PM ₁₀	22'300.00	24'910.11
SO ₂	10'900.00	12'175.79
NMVOC	1'200.00	1'340.45

Im Gegensatz zu den gängigen Kostensätzen für die Luftschadstoffemissionen des Verkehrs sind für Emissionen aus unbekannter Quelle die Kostensätze für den Feinstaub (PM₁₀) tiefer als für andere Luftschadstoffe wie z.B. den Stickoxiden. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass die Kosten der PM₁₀-Emissionen im Gegensatz zu den anderen Luftschadstoffen sehr stark vom Ort des Ausstosses abhängig sind. Da der Verkehr zu einem wesentlichen Teil in bewohnten Gebieten stattfindet und die Emissionen zudem bodennah erfolgen (Ausnahme: Luftverkehr), sind die Schadwirkungen (v.a. Gesundheitsschäden) und somit die externen Kosten pro emittierter Tonne deutlich höher als z.B. bei Kraftwerken oder Industriegebäuden, die sich grösstenteils ausserhalb

²⁷⁸ HEIMTSA (2011a)

²⁷⁹ IER, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart (2012)

²⁸⁰ UBA (2020)

²⁸¹ European Commission (2020)

bewohnter Gebiete befinden und deren PM₁₀-Emissionen dank Kaminen oft in grösserer Höhe erfolgen. Für unbekannte Emissionsquellen resultieren deshalb für Feinstaubemissionen verhältnismässig geringe Kostensätze.

11.5 Vorgehen bei Differenzierungen

11.5.1 Differenzierung nach Antriebsart

Die Differenzierung nach Antriebsarten im Strassenverkehr erfolgt, wie in Kapitel 20.1.6 beschrieben über die Fahrleistungsanteile nach den Antriebsarten und den dazugehörigen spezifischen Emissionsfaktoren für Fahrzeuge, Infrastruktur und Energiebereitstellung.

11.5.2 Differenzierung nach Kantonen

Die Differenzierung der Kosten nach Kantonen im Schienen- und Strassenverkehr wird anhand der kantonalen Anteile an der Fahrleistung berechnet.

11.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

Eine Abschätzung der Grenzkosten erweist sich für die vor- und nachgelagerten Prozesse als schwierig. Ausgehend von der Berechnungsmethodik könnten diese Kosten als Grenzkosten betrachtet werden, denn die externen Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse werden im vorliegenden Bericht basierend auf Emissionsfaktoren je Fahrleistung oder Verkehrsleistung berechnet und anhand von Kostensätzen je Tonne Luftschadstoff, respektive Treibhausgasemission monetarisiert. Sie sind damit eine lineare Funktion der Verkehrsmenge.

Im Gegensatz dazu kann argumentiert werden, dass insbesondere die infrastrukturbedingten Kosten kurzfristig und unmittelbar unabhängig von der Verkehrsmenge sind. In einer Näherung wären damit die infrastrukturbedingten Grenzkostenkosten praktisch null.

11.7 Ergebnisse

11.7.1 Externe Kosten

a) Überblick Gesamtverkehr

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die externen und sozialen Kosten der vor- und nachgelagerten Prozesse des Verkehrs für das Jahr 2021. Bei dieser Kostenkategorie entsprechen die externen den sozialen Kosten, da es keinen Internalisierungsbeitrag gibt. Die hier dargestellten Resultate umfassen dabei die Kategorien Fahrzeuge, Infrastruktur und Energiebereitstellung. Die Kosten werden für die vier Verkehrsträger getrennt ausgewiesen. Insgesamt betragen die Kosten

für die vor- und nachgelagerten Prozesse **4'775 Mio. CHF**, rund 89% davon fallen beim Strassenverkehr an, weitere 8.5% im Luftverkehr. Der Personenverkehr ist für knapp 77% der Gesamtkosten verantwortlich, der Rest entfällt auf den Güterverkehr.

Abbildung 11-4: Überblick über die Kosten verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse des Verkehrs 2021

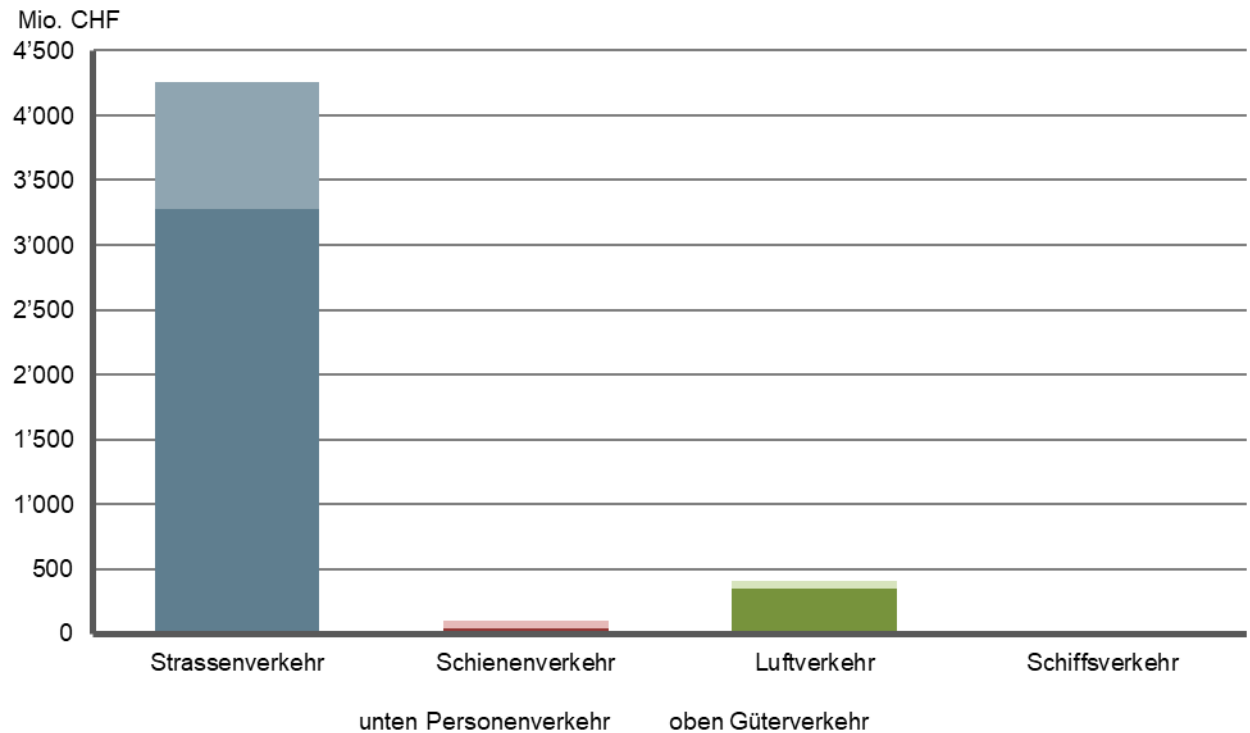


Abbildung 11-5: Überblick über die Kosten verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse des Verkehrs 2021 (Hauptergebnis basierend auf zentralem CO₂-Kostensatz)

in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr	3'276.4	976.3	4'252.7	89.1%
Schienenverkehr	47.3	53.7	101.0	2.1%
Luftverkehr	346.3	61.6	407.9	8.5%
Schiffsverkehr	2.0	11.8	13.8	0.3%
Total	3'672.0	1'103.5	4'775.4	100.0%
in % des Totals	76.9%	23.1%	100.0%	

b) Strassenverkehr

Die externen Kosten der vor- und nachgelagerten Prozesse des Strassenverkehrs betragen gesamthaft 4'253 Mio. CHF. Die Emissionen des Personenverkehrs sind dabei für ca. 77% aller Kosten aus vor- und nachgelagerten Prozessen verantwortlich, der Güterverkehr für gut 23% (vgl.

folgenden beiden Abbildungen). 72.4% der Kosten fallen bei den Personenwagen an. Knapp 43% sind auf die Emissionen verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse der Verkehrsmittel zurückzuführen, 42% der Kosten fallen durch Emissionen für die Energiebereitstellung an und 15% durch die Infrastruktur.

Abbildung 11-6: Überblick über die Kosten verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien

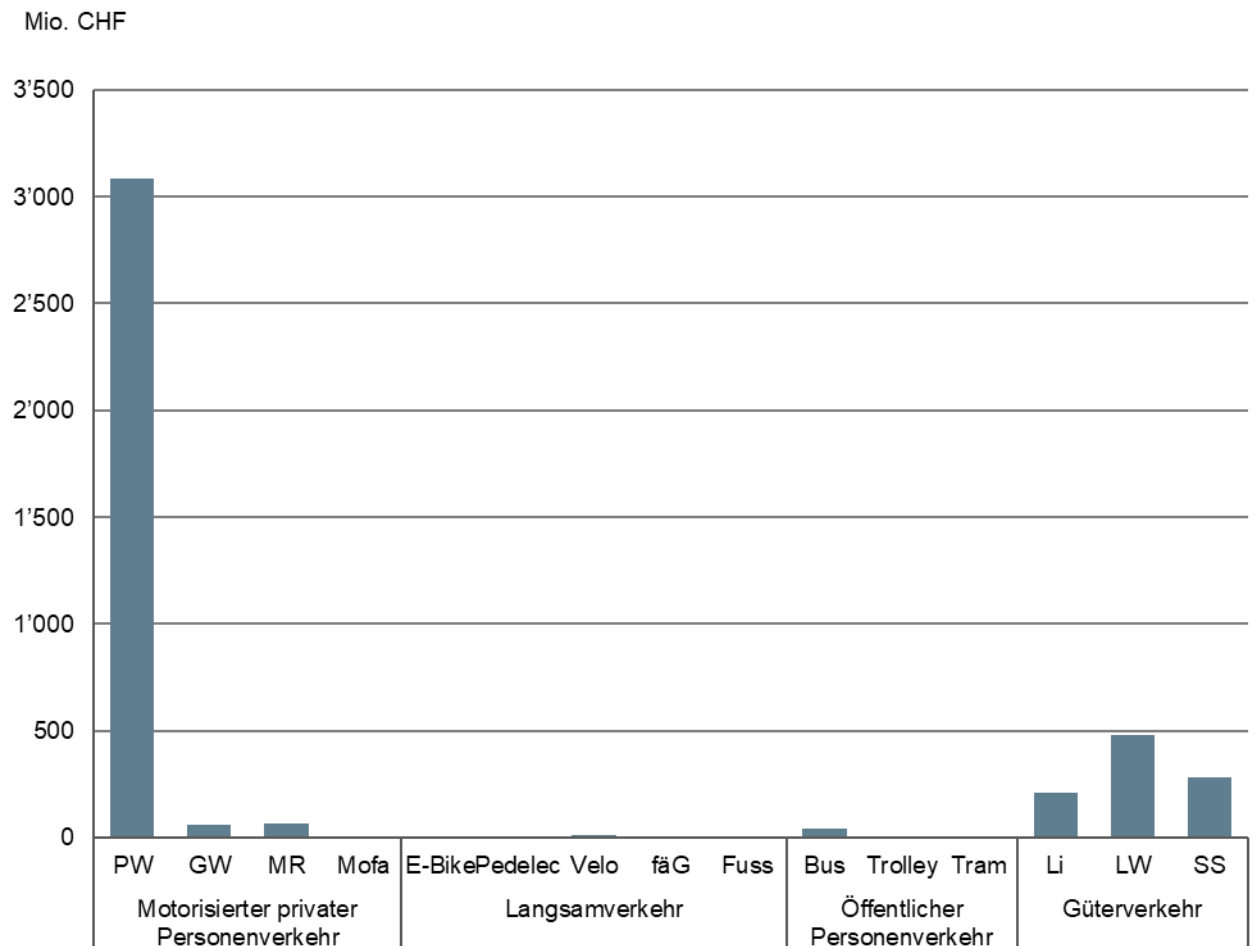


Abbildung 11-7: Überblick über die Kosten verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse des Strassenverkehrs 2021 für die Fahrzeugkategorien und unterteilt in die Kategorien Verkehrsmittel, Infrastruktur und Energiebereitstellung

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total	
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr						
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS
Verkehrsmittel	1'338.1	17.0	28.4	0.5	1.2	2.8	11.2	-	-	6.5	1.5	0.9	83.3	219.3	105.1
Infrastruktur	425.5	11.3	7.6	0.2	0.0	0.1	0.5	-	-	8.8	1.4	0.0	33.7	85.8	65.2
Energiebereitstellung	1'317.1	30.0	28.9	0.6	0.1	0.2	-	-	-	29.0	3.0	3.8	95.2	176.7	112.0
Total	3'080.6	58.3	64.9	1.4	1.3	3.1	11.7	-	-	44.4	5.9	4.7	212.2	481.8	282.4
in % des Gesamttotals	72.4%	1.4%	1.5%	0.0%	0.0%	0.1%	0.3%	0.0%	0.0%	1.0%	0.1%	0.1%	5.0%	11.3%	6.6%
Total Teilbereiche	3'205.2				16.2				55.0			976.3			
in % des Gesamttotals	75.4%				0.4%				1.3%			23.0%			

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

«0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «-» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt auch für alle folgenden Abbildungen.

Die folgende Abbildung zeigt die Kosten aus vor- und nachgelagerten Prozessen des Strassenverkehrs differenziert für die Fahrzeugkategorien und Antriebsarten. 97.5% der Kosten (4'148 Mio. CHF) des Strassenverkehrs werden durch fossile Fahrzeuge verursacht. Lediglich 1.3% entfallen auf Elektrofahrzeuge.

Abbildung 11-8: Überblick über die Kosten verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten

	Personenverkehr												Güterverkehr			Gesamt- total
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
in Mio. CHF																
Fossil	3'013.8	58.2	64.5	1.4	-	-	-	-	-	42.5	-	-	210.0	477.3	280.4	4'148.1
Elektrisch	35.6	0.1	0.4	-	1.3	3.1	-	-	-	0.9	5.9	4.7	1.3	2.7	0.7	56.8
Rest	31.2	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	-	-	0.8	1.8	1.3	36.1
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	11.7	-	-	-	-	-	-	-	-	11.7
Total	3'080.6	58.3	64.9	1.4	1.3	3.1	11.7	-	-	44.4	5.9	4.7	212.2	481.8	282.4	4'252.7
Anteil Fossil	97.8%	99.8%	99.4%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	95.7%	0.0%	0.0%	99.0%	99.1%	99.3%	97.5%
Anteil Elektrisch	1.2%	0.2%	0.6%	0.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	100.0%	100.0%	0.6%	0.6%	0.3%	1.3%
Anteil Rest	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.3%	0.0%	0.0%	0.4%	0.4%	0.5%	0.8%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung der externen Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse im Strassenverkehr differenziert nach Kantonen und Verkehrsmitteln. Die Aufteilung auf die Kantone erfolgte top-down auf Basis der Fahrzeugkilometer nach Fahrzeugkategorie. Im Kanton Zürich fallen mit einem Anteil von 14.8% die höchsten Kosten an. Darauf folgt der Kanton Bern und der Kanton Waadt mit jeweils 12% und fast 10.6% der Gesamtkosten.

Abbildung 11-9: Externe Kosten verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse im Strassenverkehr 2021 nach Fahrzeugkategorien und Kantonen

in Mio. CHF	Personenverkehr									Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
Zürich	459.3	9.2	9.7	0.3	0.3	0.7	2.3	-	-	8.3	1.9	30.4	67.6	39.6	629.5
Bern	372.6	7.2	7.9	0.2	0.2	0.4	1.4	-	-	5.1	0.5	25.7	55.7	32.6	509.3
Luzern	158.0	3.1	3.3	0.1	0.1	0.1	0.5	-	-	3.1	-	10.0	27.2	16.0	221.5
Uri	25.1	0.9	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.4	-	1.7	11.2	6.5	46.4
Schwyz	69.6	1.1	1.5	0.0	0.0	0.0	0.2	-	-	0.9	-	4.4	8.1	4.7	90.3
Obwalden	13.3	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.1	-	0.9	1.3	0.8	17.0
Nidwalden	19.3	0.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.2	-	1.6	5.2	3.1	30.4
Glarus	18.3	0.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.2	-	1.8	3.4	2.0	26.6
Zug	45.9	0.6	1.0	0.0	0.0	0.0	0.2	-	-	1.0	-	2.9	4.4	2.6	58.7
Freiburg	117.5	2.2	2.5	0.0	0.0	0.1	0.4	-	-	1.5	-	7.4	18.9	11.1	161.6
Solothurn	102.5	3.0	2.2	0.0	0.0	0.1	0.4	-	-	1.5	0.0	7.4	28.0	16.4	161.5
Basel-Stadt	29.2	0.6	0.6	0.0	0.0	0.1	0.4	-	-	1.4	0.8	1.4	4.7	2.7	41.9
Basel-Landschaft	97.1	2.4	2.0	0.0	0.0	0.1	0.4	-	-	1.4	0.5	7.5	22.1	12.9	146.7
Schaffhausen	20.0	0.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.1	-	-	0.6	-	1.2	2.5	1.5	26.7
Appenzell A.Rh.	13.9	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	-	-	0.2	-	0.9	0.6	0.4	16.5
Appenzell I.Rh.	3.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.0	-	0.2	0.2	0.1	4.1
St. Gallen	232.0	4.5	4.9	0.1	0.1	0.2	0.7	-	-	3.9	-	18.6	36.9	21.6	323.3
Graubünden	84.4	2.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.2	-	-	2.1	-	7.5	14.6	8.6	121.2
Aargau	278.3	6.0	5.9	0.1	0.1	0.2	0.8	-	-	3.9	-	20.4	55.8	32.7	404.1
Thurgau	97.8	1.6	2.1	0.0	0.0	0.1	0.3	-	-	1.1	-	6.0	13.1	7.7	129.8
Tessin	177.0	3.3	3.7	0.1	0.1	0.1	0.5	-	-	2.3	-	11.0	33.5	19.7	251.3
Waadt	342.6	5.3	7.2	0.1	0.1	0.3	1.1	-	-	3.5	0.2	23.4	41.2	24.2	449.3
Wallis	109.1	1.8	2.3	0.0	0.0	0.1	0.4	-	-	2.5	-	7.8	12.9	7.6	144.6
Neuenburg	57.7	0.6	1.2	0.0	0.0	0.1	0.2	-	-	0.9	0.0	3.6	4.2	2.5	71.1
Genf	106.5	0.9	2.2	0.1	0.1	0.3	1.1	-	-	3.8	0.7	7.0	5.8	3.4	131.8
Jura	30.3	0.4	0.6	0.0	0.0	0.0	0.1	-	-	0.3	-	1.3	2.7	1.6	37.3
Total	3'080.6	58.3	64.9	1.4	1.3	3.1	11.7	-	-	50.3	4.7	212.2	481.8	282.4	4'252.7

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

c) Schienenverkehr

Beim Schienenverkehr sind die Emissionen des Personenverkehrs für ca. 47% aller Kosten aus vor- und nachgelagerten Prozessen verantwortlich, jene des Güterverkehrs für 53%. Verkehrsmittel (37%) und Infrastruktur (54%) tragen am meisten zum Gesamtbetrag von 101 Mio. CHF bei (vgl. folgende Abbildung).

Abbildung 11-10: Externe Kosten verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse im Schienenverkehr 2021 nach Personen- und Güterverkehr und für die Kategorien Verkehrsmittel, Infrastruktur und Energiebereitstellung

in Mio. CHF	Personen-verkehr	Güter-verkehr	Total
Verkehrsmittel	9.2	27.8	37.0
Infrastruktur	32.9	22.0	54.9
Energiebereitstellung	5.2	4.0	9.1
Total	47.3	53.7	101.0

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung der Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse im Schienenverkehr nach Kantonen sowie Verkehrsart. Der Kanton Bern und Aargau weisen mit 16.4% und 13.7% der Gesamtkosten die höchsten Anteile auf. Die Kantone Zürich (10.6%), Waadt (8.7%) und Tessin (7.2%) folgen.

Abbildung 11-11: Externe Kosten verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse im Schienenverkehr 2021 nach Personen- und Güterverkehr und nach Kantonen

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich	7.4	3.3	10.7
Bern	7.9	8.7	16.5
Luzern	1.9	0.6	2.5
Uri	0.5	1.9	2.3
Schwyz	1.3	2.3	3.6
Obwalden	0.2	0.0	0.3
Nidwalden	0.2	0.0	0.2
Glarus	0.4	0.3	0.6
Zug	0.6	0.6	1.2
Freiburg	1.8	0.5	2.3
Solothurn	1.6	3.6	5.1
Basel-Stadt	0.3	0.4	0.7
Basel-Landschaft	1.3	2.3	3.6
Schaffhausen	0.4	0.0	0.5
Appenzell A.Rh.	0.3	0.0	0.3
Appenzell I.Rh.	0.1	-	0.1
St. Gallen	2.7	1.5	4.2
Graubünden	2.2	2.5	4.8
Aargau	4.0	9.8	13.8
Thurgau	1.6	0.9	2.5
Tessin	1.6	5.6	7.2
Waadt	4.5	4.2	8.8
Wallis	2.4	3.1	5.5
Neuenburg	1.0	1.4	2.3
Genf	0.6	0.3	0.9
Jura	0.5	0.1	0.5
Total	47.3	53.7	101.0

d) Luftverkehr

Die externen Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse des Luftverkehrs im Jahr 2021 betragen mit dem zentralen CO₂-Kostensatz **407.9 Mio. CHF**. Knapp 85% der Kosten entfallen auf den Personenverkehr, der Rest auf den Güterverkehr. Die Energiebereitstellung verursacht 95% der Gesamtkosten von den knapp 408 Mio. CHF.

Abbildung 11-12: Externe Kosten vor- und nachgelagerte Prozesse im Luftverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Verkehrsmittel		0.4	0.2	0.6
Infrastruktur		16.4	2.9	19.3
Energiebereitstellung		329.5	58.5	388.0
Total		346.3	61.6	407.9

Die externen Kosten der vor- und nachgelagerten Prozesse im Luftverkehr werden zu knapp 92% auf den Landesflughäfen verursacht, nur 8% auf Regionalflughäfen. Nach Flugzeugtypen differenziert verursacht der Linien- und Charterverkehr 91.5% der Kosten, die Business Aviation knapp 5%, die General Aviation (allgemeine Luftfahrt) knapp 4% und die Helikopter lediglich 0.03% der Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse.

Abbildung 11-13: Externe Kosten vor- und nachgelagerte Prozesse im Luftverkehrs 2021 nach Infrastrukturtyp

	in Mio. CHF	Landesflughäfen	Regionalflughäfen	Total
Linien- und Charterverkehr interkontinental		200.9	18.4	219.3
Linien- und Charterverkehr europäisch		140.8	12.9	153.7
Helikopter		0.1	0.0	0.1
Business Aviation		17.9	1.6	19.6
Rest General Aviation		13.8	1.3	15.1
Total		373.7	34.2	407.9

e) Schiffsverkehr

Die externen Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse des Schiffsverkehrs im Jahr 2021 betragen mit dem zentralen CO₂-Kostensatz **13.8 Mio. CHF**. Dabei sind die Emissionen des Personenverkehrs für ca. 15% aller Kosten aus vor- und nachgelagerten Prozessen verantwortlich, der Güterverkehr für die restlichen 85%. Die Energiebereitstellung trägt 52.5% der gesamthaft 13.8 Mio. CHF bei (vgl. folgende Abbildung).

Abbildung 11-14: Externe Kosten vor- und nachgelagerte Prozesse im Schiffsverkehr 2021 nach Personen- und Güterverkehr

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Verkehrsmittel		0.4	0.4	0.9
Infrastruktur		-	5.7	5.7
Energiebereitstellung		1.6	5.7	7.3
Total		2.0	11.8	13.8

11.8 Sensitivitätsanalyse

11.8.1 Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten

Bei der Ermittlung der vor- und nachgelagerten Prozesse werden verschiedene Datengrundlagen verwendet, die naturgemäss mit Unsicherheiten verbunden sind. Dabei ist insbesondere der Klimakostensatz mit Unsicherheiten behaftet. In der folgenden Sensitivitätsanalyse wird der Klimakostensatz variiert, um festzustellen, welchen Einfluss die Unsicherheiten auf die berechneten Kosten haben. Für die Sensitivitäten des Klimakostensatzes sei auf Kapitel 10.8 verwiesen.

11.8.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die folgenden beiden Abbildungen stellen dar, wie sich die externen Kosten verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse verändern, wenn zur Berechnung der hohe oder tiefe Klimakostensatz verwendet wird:

- **Sensitivität hoch:** Wird der Klimakostensatz unter der Annahme einer reinen Zeitpräferenzrate von 0.0%, aber mit dem equity weighting berechnet, resultiert ein Klimakostensatz von 1'370 CHF pro Tonne Treibhausgasemission. Dies führt zu einer Steigerung der externen Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse für alle Verkehrsträger um 219%.
- **Sensitivität tief:** Wird im Gegenzug der Klimakostensatz unter der Annahme von einer reinen Zeitpräferenzrate von 1% und ohne equity weighting berechnet, verringern sich die externen Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse bei allen Verkehrsträgern um 70%.

Abbildung 11-15: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die externen Kosten für vor- und nachgelagerte Prozesse 2021

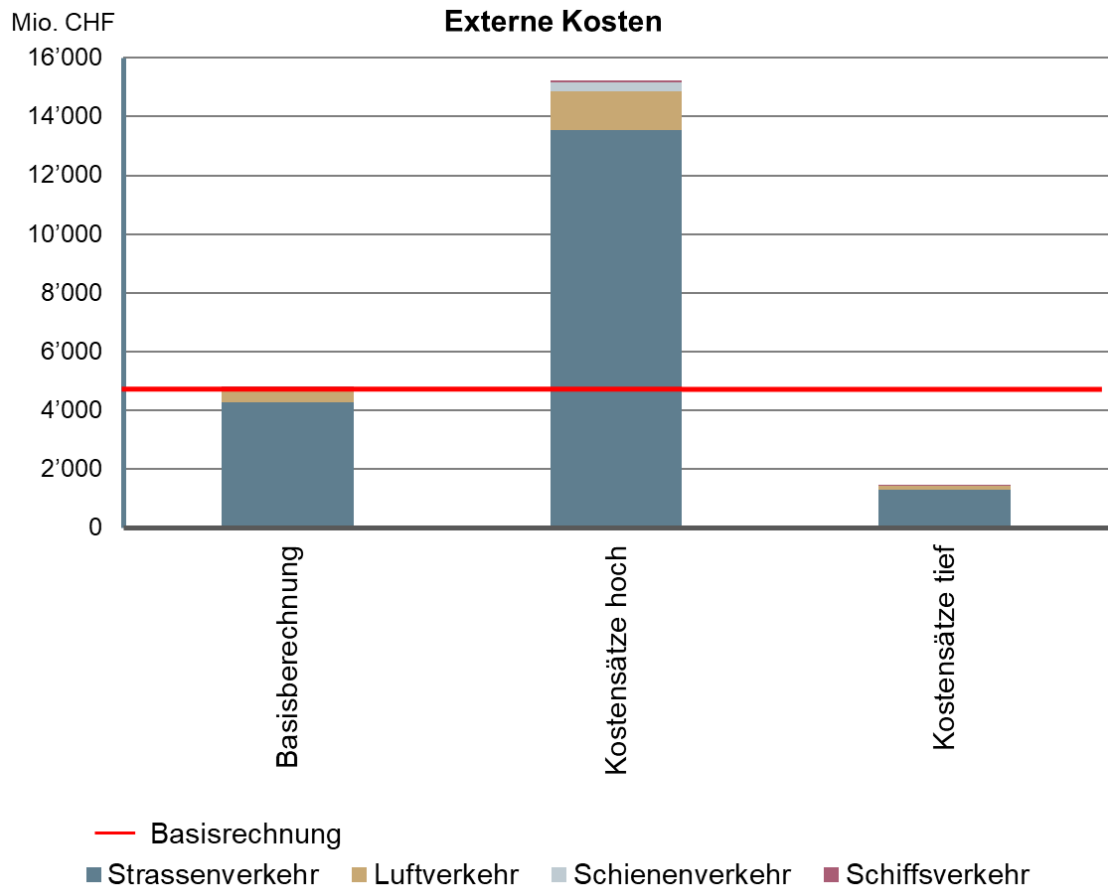


Abbildung 11-16: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die externen Kosten für vor- und nachgelagerte Prozesse 2021

in Mio. CHF	Strassenverkehr	Schienenverkehr	Luftverkehr	Schiffsverkehr
Basisberechnung	4'252.7	101.0	407.9	13.8
Kostensätze hoch	13'548.0	321.9	1'299.4	44.1
Kostensätze tief	1'286.1	30.6	123.4	4.2
Abweichung von Basisrechnung in %				
Kostensätze hoch	219%	219%	219%	219%
Kostensätze tief	-70%	-70%	-70%	-70%

11.8.3 Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen

Die vor- und nachgelagerten Prozesse ganzheitlich zu erfassen ist sehr aufwendig, da nicht immer offensichtlich ist, wie die Prozessketten genau aussehen. Deswegen wird auf vereinfachte Methoden zurückgegriffen, die zu eher konservativen Resultaten führen. Würden die vor- und nachgelagerten Prozesse vollständig disaggregiert und berechnet werden, dürften die Kosten höher ausfallen. Die Hauptgründe sind fehlende Detailinformationen, unvollständiges Erfassen der Prozessketten und fehlende Datengrundlagen. Beispiele hierfür sind:

- Es ist aufgrund der Datengrundlagen nicht möglich, sämtliche Schadstoffe und ihre Auswirkungen auf die verschiedenen Umweltbereiche zu erfassen. In der vorliegenden Analyse wurden nur CO₂, NO_x, SO₂, PM₁₀ und NMVOC berücksichtigt. Dies sind alles Luftschadstoffe oder Treibhausgase. Boden- und Gewässerschäden durch die Emission verschiedener Toxine und Schadstoffe im Rahmen der vor- und nachgelagerten Prozesse wurden nicht berücksichtigt. Diese wären aber insbesondere für die Quantifizierung der Umweltauswirkung der Batterieproduktion von Bedeutung, da die Förderung der verwendeten Metalle häufig die Umwelt stark belastet.
- Die Detailinformationen entlang der Prozessketten zur Herstellung von Treibstoffen in den roh-ölfördernden Staaten sind nicht ausreichend, um sämtliche Umweltschäden am Ort der Verarbeitung, in den Raffinerien und auf den Transportwegen zu erfassen.

Nicht abgedeckt sind auch Schäden an Natur und Landschaft, die bei der Energieproduktion (z.B. bei Wasserkraftwerken) oder anderen Vorprozessen entstehen sowie mögliche Risiken durch die Energiebereitstellung (wie z.B. Schäden durch Kernunfall oder Dammbruch), die nicht internalisiert sind.

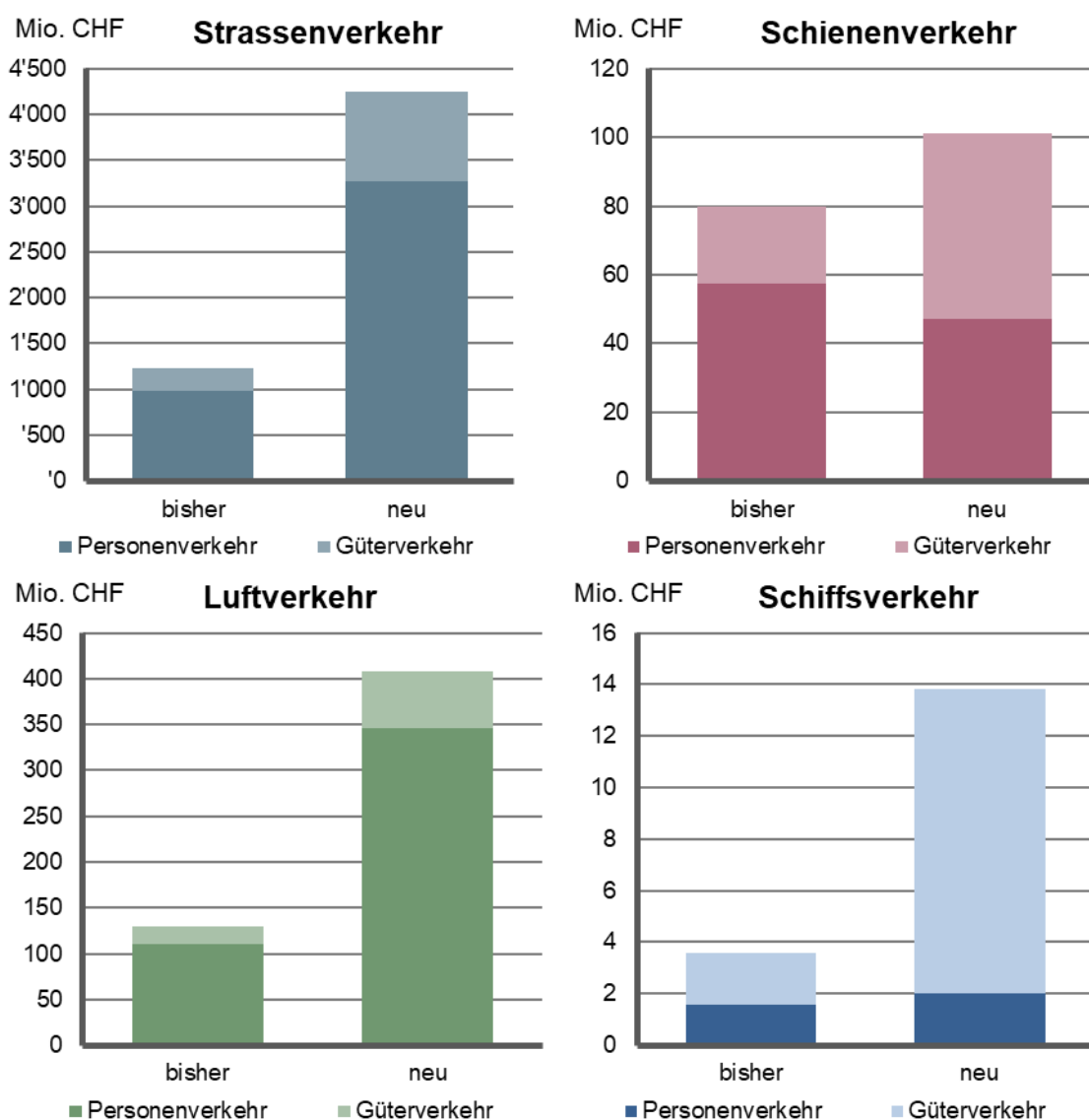
Die im vorliegenden Bericht berechneten externen Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse werden damit die tatsächlichen Kosten unterschätzen. Dies entspricht dem at-least Ansatz.

11.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen grafisch und tabellarisch den Vergleich der externen Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse für das Jahr 2021 mit den Ergebnissen der Berechnungen ermittelt mit dem früheren Tool. Unterschiede der externen Kosten verursacht durch vor- und nachgelagerte Prozesse sind einerseits darauf zurückzuführen, dass die Berechnung der Emissionen auf Emissionsfaktoren der Mobitool-UVEK Datenbank beruht anstelle von der bisher verwendeten Ecoinvent.

Andererseits führt der angepasste Klimakostensatz zu einer grundsätzlichen Erhöhung der Kosten von Treibhausgasemissionen auch bei den vor- und nachgelagerten Prozessen.

Abbildung 11-17: Vergleich der Berechnungen der externen Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse basierend auf der ursprünglichen und überarbeiteten Berechnungsmethodik 2021



Achtung: Die Skalen der vier Verkehrsträger sind unterschiedlich

Abbildung 11-18: Überblick und Vergleich der Berechnungen für die externen Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse basierend auf den alten und den neuen Datengrundlagen sowie Methodik

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	980.16	247.25	1'227.4
Schienenverkehr	57.5	22.3	79.8
Luftverkehr	111.0	19.0	130.0
Schiffsverkehr	1.6	2.0	3.6
Total	1'150.3	290.5	1'440.8
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	3'276.4	976.3	4'252.7
Schienenverkehr	47.3	53.7	101.0
Luftverkehr	346.3	61.6	407.9
Schiffsverkehr	2.0	11.8	13.8
Total	3'672.0	1'103.5	4'775.4
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	234.3%	294.9%	246.5%
Schienenverkehr	-17.8%	141.4%	26.7%
Luftverkehr	211.9%	224.2%	213.7%
Schiffsverkehr	28.1%	485.3%	285.2%
Total	219.2%	279.8%	231.4%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	2'296.2	729.0	3'025.3
Schienenverkehr	-10.2	31.5	21.3
Luftverkehr	235.2	42.6	277.9
Schiffsverkehr	0.4	9.8	10.2
Total	2'521.7	812.9	3'334.6

12 Natur und Landschaft

12.1 Berechnungsgegenstand

12.1.1 Einleitung und Begriffe

Der Verkehr hat sehr vielfältige Auswirkungen auf die Natur und die Landschaft. Im vorliegenden Kapitel werden die Auswirkungen des Verkehrs auf folgende Allgemeingüter betrachtet:

- **Natur:** Im Zweckartikel des Bundesgesetzes über den Natur- und Heimatschutz (NHG, SR 451, Art. 1) werden in Bezug auf den Naturschutz folgende Allgemeingüter genannt:
 - das heimatliche Landschafts- und Ortsbild, die geschichtlichen Stätten sowie die Natur- und Kulturdenkmäler des Landes zu schonen, zu schützen sowie ihre Erhaltung und Pflege zu fördern;
 - die einheimische Tier- und Pflanzenwelt sowie ihre biologische Vielfalt und ihren natürlichen Lebensraum zu schützen.
- **Biodiversität:** Biodiversität umfasst die verschiedenen Lebensformen (Arten von Tieren, Pflanzen, Pilzen, Bakterien), die unterschiedlichen Lebensräume, in denen Arten leben (Ökosysteme wie der Wald oder Gewässer), sowie die genetische Vielfalt innerhalb der Arten (z.B. Unterarten, Sorten und Rassen).²⁸²
- **Landschaft:** Landschaft umfasst den gesamten Raum wie die Menschen ihn wahrnehmen und erleben. Sie ist mit ihren natürlichen und kulturellen Werten sowohl Lebensraum für Tiere und Pflanzen (siehe Biodiversität) als auch Wohn-, Arbeits-, Erholungs-, Bewegungs-, Kultur- und Wirtschaftsraum für den Menschen. Landschaften sind dynamische Wirkungsgefüge und entwickeln sich aufgrund natürlicher Faktoren und durch die menschliche Nutzung und Gestaltung stetig weiter.²⁸³

Fazit: Unter Natur und Landschaft werden vier Ebenen von Allgemeingütern zusammengefasst:

- Landschaft umfasst den gesamten Raum, der auf Grund natürlicher und kultureller Faktoren entstanden ist und geformt wird.
- Der Begriff der Natur umfasst die drei Ebenen der Biodiversität:
 - Alle Lebensräume (Ökosysteme), die von Arten genutzt werden,
 - Die Gesamtheit der Arten (Pflanzen, Tiere, Pilze und Bakterien) sowie
 - Die Gesamtheit der Variationen innerhalb der einzelnen Arten.

Die Kosten für Natur und Landschaft sind verkehrsbedingte soziale Umweltkosten, wenn die Situation "mit Verkehr" im Vergleich zur extremen Situation "ohne Verkehr" betrachtet wird, wie dies bei der KfV-Statistik der Fall ist (totale Kosten).

²⁸² BAFU (2010)

²⁸³ BAFU (2020, S. 50)

Diese Kosten sind dagegen unveränderlich, wenn sich die Verkehrsmenge im Vergleich zur aktuellen Situation nur geringfügig ändert. Sie sollten daher nicht in Betracht gezogen werden, wenn die Problematik das grenzkostenbasierte Pricing einer einzelnen Fahrt ist.

12.1.2 Betrachtungsrahmen

Aus dem komplexen Wirkungsgefüge Natur und Landschaft wurden in den bisherigen Arbeiten zu den externen Kosten des Verkehrs der Schweiz zwei Wirkungsketten quantifiziert und monetarisiert: Habitatverluste und Habitatfragmentierungen.²⁸⁴ Die wichtigste direkte negative Umweltfolge von Habitatverlusten und Habitatfragmentierungen ist die Beeinträchtigung der Biodiversität.

- **Habitatverluste:** Verkehrssystem führt durch ihren Flächenbedarf zu einem Verlust an natürlichen Ökosystemen, die Lebensräume für Pflanzen und Tiere darstellen. Durch diesen Flächenverbrauch gehen wertvolle Habitate verloren, was zu einer Verminderung der Biodiversität führt.
- **Habitatfragmentierungen:** Verkehrssystem kann zusätzlich sehr oft eine Zerschneidungs- bzw. Trennwirkung für tierische Lebewesen haben. Diese Trennwirkung schränkt den Lebensraum (Habitate) von Arten stark ein und Populationen innerhalb der Art werden isoliert. Beides erschwert, dass Arten stabile Populationen bilden können, und hindert Arten daran, neue oder verwaiste Lebensräume zu besetzen. Dies führt generell zu einer Beeinträchtigung der Biodiversität. Von Habitatfragmentierungen durch Verkehrswege betroffen sind sowohl grössere Säugetiere (z.B. Wildtiere wie Reh, Feldhase, Dachs, Igel) als auch Kleintiere wie Amphibien oder Bachlebewesen. Besonders ausgeprägt sind Zerschneidungseffekte bei grossen Verkehrsinfrastrukturen wie Autobahnen oder grossen Schieneninfrastrukturen.

12.2 Bewertungsmethodik

12.2.1 Relevante Ursache-Wirkungsketten und methodische Entwicklungen

Die ersten umfassenden Studien zu den Berechnungen der externen Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft stellten die Wirkungsketten des Verkehrs auf die Biodiversität ausführlich dar.²⁸⁵ Aus heutiger Sicht kann festgehalten werden, dass die damals identifizierten zentralen Ursache-Wirkungsketten immer noch gelten.

Im Bericht Externe Effekte des Verkehrs 2010²⁸⁶ wurden weitere Wirkungen bzw. Schadensbereiche identifiziert und auf ihre Relevanz sowie der Möglichkeit zur Monetarisierung beurteilt. Diese Prüfung wird immer noch als gültig eingeschätzt. Auf eine Monetarisierung weiterer Schadensbereiche, wie z.B. Kosten durch Lichtimmissionen und invasive Neophyten, wird daher im Kostenbereich Natur und Landschaft verzichtet.

²⁸⁴ Ecoplan; INFRAS (2008); (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

²⁸⁵ Econcept; Nateco (2004); Ökoskop (1998)

²⁸⁶ Ecoplan; INFRAS (2014)

Die Habitatverluste werden sowohl für innerorts als auch ausserorts ermittelt. Denn grundsätzlich führen Verkehrswege innerhalb und ausserhalb des Siedlungsgebietes aufgrund des damit verbundenen Flächenverbrauchs zu Habitatverlusten. Bei den Habitatverlusten innerorts stehen nur die grossen Verkehrsinfrastrukturen, d.h. die höherklassigen Strassen²⁸⁷ sowie Schienen im Vordergrund.

Die Habitatfragmentierungen werden nur für *ausserorts* berechnet. Aus ökologischer Sicht gibt es zwar auch durch Strassen innerorts Habitatfragmentierungen, wobei diese hauptsächlich für Kleintiere (Bachlebewesen, Amphibien) relevant sind. Allerdings gibt es innerorts eine Reihe weiterer Ursachen für Fragmentierungen, die nicht mit dem Verkehr zusammenhängen, insbesondere die restliche Siedlungsfläche. Aus diesem Grund sowie aufgrund der geringen Relevanz wird im Rahmen dieser Studie auf eine Quantifizierung der Habitatfragmentierungen innerorts verzichtet. Die Berechnung der Habitatfragmentierungen beschränkt sich deshalb wie bisher auf die Infrastrukturen ausserorts.

Sowohl innerorts als auch ausserorts werden nur jene Infrastrukturkosten berücksichtigt, die nach dem Zeitraum zwischen 1950 und 1960 angefallen sind. Die vor diesem Zeitraum erstellten Verkehrsinfrastrukturen werden als Bestandteil des Referenzzustandes angesehen und fliessen nicht in die Kostenberechnungen ein.²⁸⁸ Der Referenzzustand zwischen 1950 und 1960 wird wie folgt begründet: Ein wichtiger Meilenstein im Naturschutz ist das Natur- und Heimatschutzgesetz NHG von 1966. Darin wird festgelegt, dass der damalige Artenbestand der Schweiz erhalten bleiben soll. Dieser widerspiegelt die Fünfzigerjahre. Das NHG kann auch als inhärente Referenz für die Kulturlandschaft von etwa 1950 bis 1960 angesehen werden. Der verwendete Referenzzustand kann als gesetzlich verankert angesehen werden und ist damit als Grundlage für die Kostenberechnungen politisch abgesichert. Die gleiche Zeitperiode ist auch die Referenz für die Roten Listen geschützter und seltener Tier- und Pflanzenarten. Diese Listen werden beispielsweise als Kriterium für die Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Projekten beigezogen.

Auch die neueren Untersuchungen und politischen Entwicklungen erlauben es nicht, auf einen neuen, besser begründbaren und breiter abgestützten Referenzzustand zurückzugreifen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Annahmen von 2004 bezüglich Referenzzustand immer noch Gültigkeit haben, beispielsweise auf Grund der impliziten Verwendung in der Biodiversitätsstrategie. Die implizite Verankerung des Naturzustandes 1950-1960 (z.B. Artenbestand) im Natur- und Heimatschutzgesetz NHG macht diesen Zeitraum für die vorliegende Berechnung zum zweckmässigsten Referenzzustand.

Neben den Kosten durch Habitatverluste und Habitatfragmentierungen ist das Themenfeld Kosten infolge Beeinträchtigung von Ökosystemen bzw. Ökosystemleistungen in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus gekommen und in verschiedenen Forschungsarbeiten bearbeitet worden. Beispielsweise hat das deutsche Umweltbundesamt (UBA) im Rahmen der Aktualisierung der Methodenkonvention 3.1²⁸⁹ zur Schätzung von Umweltkosten eine grosse, unveröffentlichte Metastudie

²⁸⁷ 3. Klass-Strassen und Quartierstrassen werden nicht berücksichtigt.

²⁸⁸ Die Festlegung eines Referenzzustandes ist im Vergleich zu den anderen Kostenbereichen nicht üblich.

²⁸⁹ UBA (2020)

zu diesem Thema erarbeiten lassen. Die Arbeiten haben gezeigt, dass es eine grosse Zahl neuer Forschungsarbeiten zum Thema gibt, die allerdings sehr oft räumlich und thematisch sehr eng gefasst sind (z.B. auf ein konkretes Gewässer, ein konkretes Ökosystem) und deshalb kaum verallgemeinert werden können. Die Kostensätze für Schäden durch Flächenverbrauch und Zerschneidung von der Methodenkonvention 3.1 des UBA basieren auf dem Wiederherstellungs- bzw. Ersatzkostenansatz der Schweizer Studien.²⁹⁰

Die konkreten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge der Schweizer Methode (also: welche und wie grosse Biotopflächen werden pro Meter Verkehrsinfrastruktur verbaut) sind zwar alt und basieren primär auf den Luftbildanalysen aus der Grundlagenstudie²⁹¹, welche 2004 publiziert wurde, es gibt aber noch keine neue etablierte Methode, die angewendet werden kann. Aufgrund der grossen Relevanz der Kostenkategorie ist hier in Zukunft eine umfassende Aktualisierung unbedingt vorzunehmen. Im aktuellen Projekt ist eine solche Aktualisierung aus Aufwandgründen nicht realisierbar.

12.2.2 Bewertungsmethodik

Die Berechnung der externen Kosten infolge von Habitatverlusten und Habitatfragmentierungen basiert auf der umfassenden Basisstudie von Econcept und Nateco.²⁹² Dabei wird der Ersatzkostenansatz angewandt. Bei den Habitatverlusten wurde in jener Studie berechnet, was es kosten würde, die verlorenen Biotop- bzw. Ökosystemflächen anderswo wieder herzustellen. Dabei sind Kosten für Landerwerb, Instandstellung und Pflege ermittelt und in Jahreskosten umgerechnet worden. Bei den Habitatfragmentierungen wurden in der Basisstudie die Kosten berechnet, die für die Erstellung von Defragmentierungsbauwerken (Überführungen, Unterführungen, Durchlässe) notwendig sind.

Wie oben beschrieben ist eine vollständige Aktualisierung sämtlicher in der Basisstudie ermittelten Daten und Analyse im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich. Insbesondere die damals durchgeführte Analyse von Luftbildern (1950/60 vs. 1990/2000) war aufwendig. Im Rahmen jener Luftbildanalyse wurde einerseits ermittelt, welche und wie grosse Biotoptypen (Habitate) seit 1950/60 durch Verkehrsinfrastrukturen verschwunden sind. Andererseits wurde analysiert, ob die untersuchten Verkehrswege Lebensräume für bestimmte Tiergruppen zerschneiden und wie viele solche Fragmentierungen es gibt. Weil die umfangreiche Luftbildanalyse im Rahmen dieser Studie nicht wiederholt werden konnte, werden die Daten aus den vorgängigen Studien²⁹³ wiederverwendet. Es wäre aber grundsätzlich sinnvoll, die Analyse im Rahmen einer Studie zu aktualisieren.

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Bewertungsmethodik im Rahmen der vorliegenden Studie für die beiden Schadensarten Habitatverluste und Habitatfragmentierungen.

²⁹⁰ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

²⁹¹ Econcept; Nateco (2004)

²⁹² Econcept; Nateco (2004)

²⁹³ Econcept; Nateco (2004); Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

Der erste und zentrale Arbeitsschritt besteht darin, das Mengengerüst der betroffenen Verkehrsinfrastruktur zu aktualisieren. Mit Hilfe von GIS-basierten Daten wird die aktuelle Länge der Verkehrsinfrastrukturen im Strassen-, und Schienenverkehr ermittelt. Sämtliche Daten werden nach Region (Mittelland, Jura, Voralpen, Alpen) differenziert erhoben. Diese Daten bilden sowohl für die Habitatverluste als auch die -fragmentierungen die Grundlage. Für den Schiffs- und Luftverkehr werden die Flächendaten aus dem Projekt «Integration des Schiffsverkehrs in die Transportrechnung»²⁹⁴ und «Integration des Luftverkehrs in die Transportrechnung»²⁹⁵ verwendet.

Die Infrastrukturdaten im Referenzzustand 1950/60 müssen im Rahmen der vorliegenden Neuberechnung nicht mehr ermittelt werden. Diese Daten wurden in der Basisstudie umfassend (auf Basis von Luftbildern) ermittelt und mit dem Zustand 2000 verglichen. Diese Informationen stecken somit bereits in den Kosten pro Bauwerk bzw. Biotope, die in den vorgängigen Studien berechnet wurden. Mit den Kosten für Habitatverluste und Habitatfragmentierungen (1) und den Infrastruktur-längen aus dem Jahr 2000 (2) können die Ersatzkosten pro Länge Verkehrsinfrastruktur berechnet werden (3). Auf Basis der Längen bzw. Flächen der Verkehrsinfrastrukturen lassen sich dann die Kosten berechnen (4).

Im Schritt 5 werden schliesslich die bereits durchgeführten Ersatzmassnahmen angerechnet. Dies sind einerseits ökologische Ersatzmassnahmen, welche die Habitatverluste vermindern, sowie andererseits bereits realisierte Defragmentierungsbauwerke. Auf diese Weise resultieren die Gesamtkosten für Habitatverluste bzw. -fragmentierungen für den Strassen-, Schienen- und Luftverkehr (6). Im letzten Schritt werden diese Gesamtkosten pro Verkehrsträger schliesslich auf die Fahrzeugkategorien und die Kantone aufgeteilt. Die Allokation erfolgt hauptsächlich auf Basis der gewichteten Fahrleistung (7), mit Hilfe derer die externen Kosten durch Habitatverluste und -fragmentierungen pro Fahrzeugkategorie ermittelt werden (8).

Für den Luft- und Schiffsverkehr werden nur die Habitatverluste ermittelt. Habitatfragmentierungen dürfte es beim Luftverkehr bei den grossen Flughäfen zwar auch geben, deren Relevanz ist allerdings eher gering und das Ausmass schwierig aus den Grundlagendaten des Strassen- und Schienenverkehrs abzuleiten. Beim Schiffsverkehr sind Habitatfragmentierungen kaum von Relevanz (Ausnahme künstliche Kanäle, die in der Schweiz jedoch kaum von Bedeutung sind). In der Studie zur Integration des Schiffsverkehrs in die Transportrechnung²⁹⁶ wurde zusätzlich noch eine grobe Abschätzung der Schäden infolge Erosionseffekte durch den Schiffsverkehr vorgenommen. Diese wird in der vorliegenden Studie allerdings nicht berücksichtigt, weil a) die Unsicherheit der Berechnung sehr gross ist, b) die Relevanz gering ist (im Bereich von 1 Mio. CHF), und c) weil dadurch die methodische Vergleichbarkeit mit den anderen Verkehrsträgern gewährleistet ist.²⁹⁷

²⁹⁴ IRENE; Ecosys (2013a)

²⁹⁵ INFRAS; Ecoplan (2012b)

²⁹⁶ IRENE; Ecosys (2013a)

²⁹⁷ Denn für die anderen Verkehrsträger werden die Erosionseffekte nicht berücksichtigt.

Abbildung 12-1: Bewertungsmethodik Kosten im Bereich Natur und Landschaft: Habitatverluste

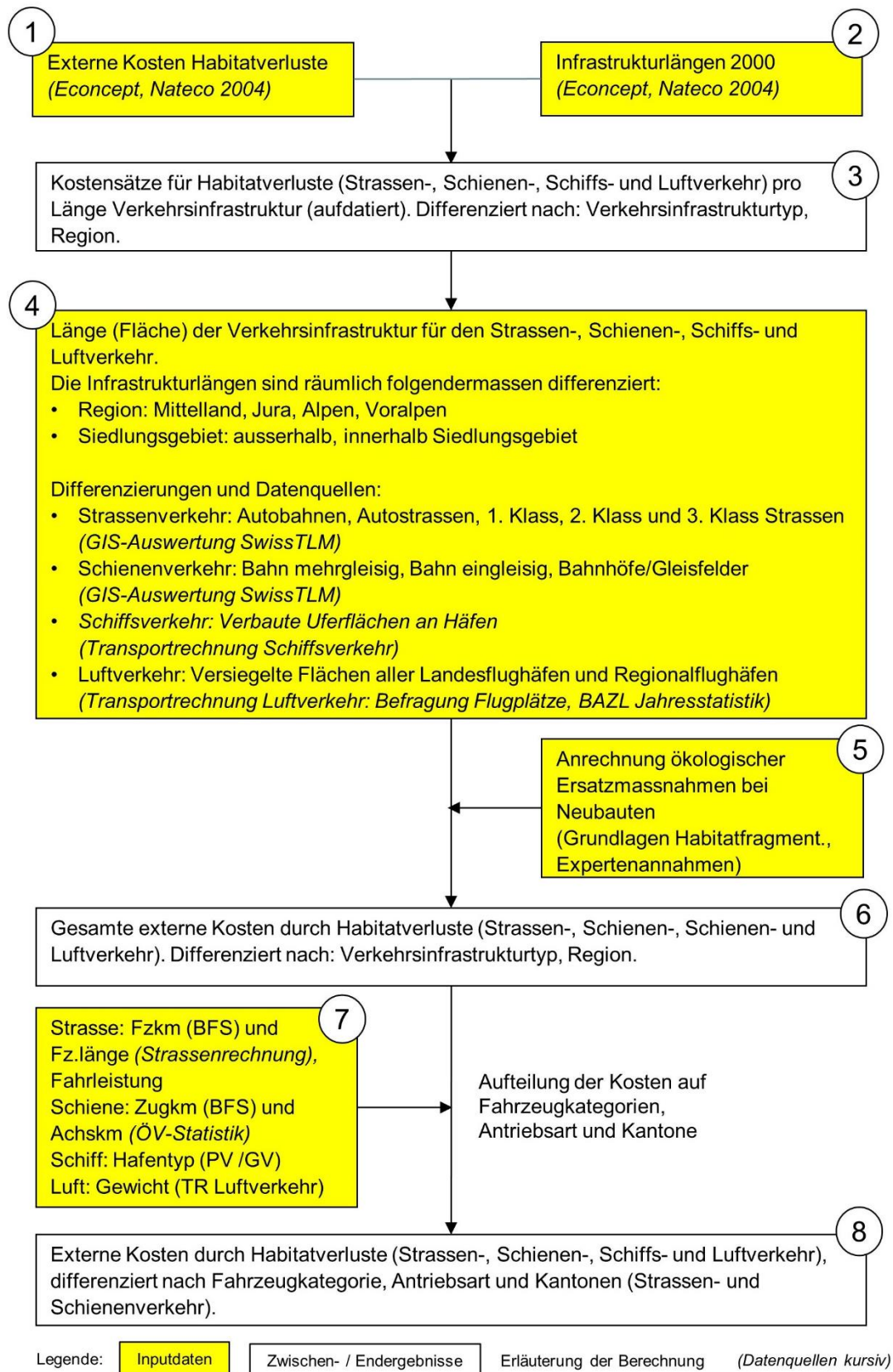
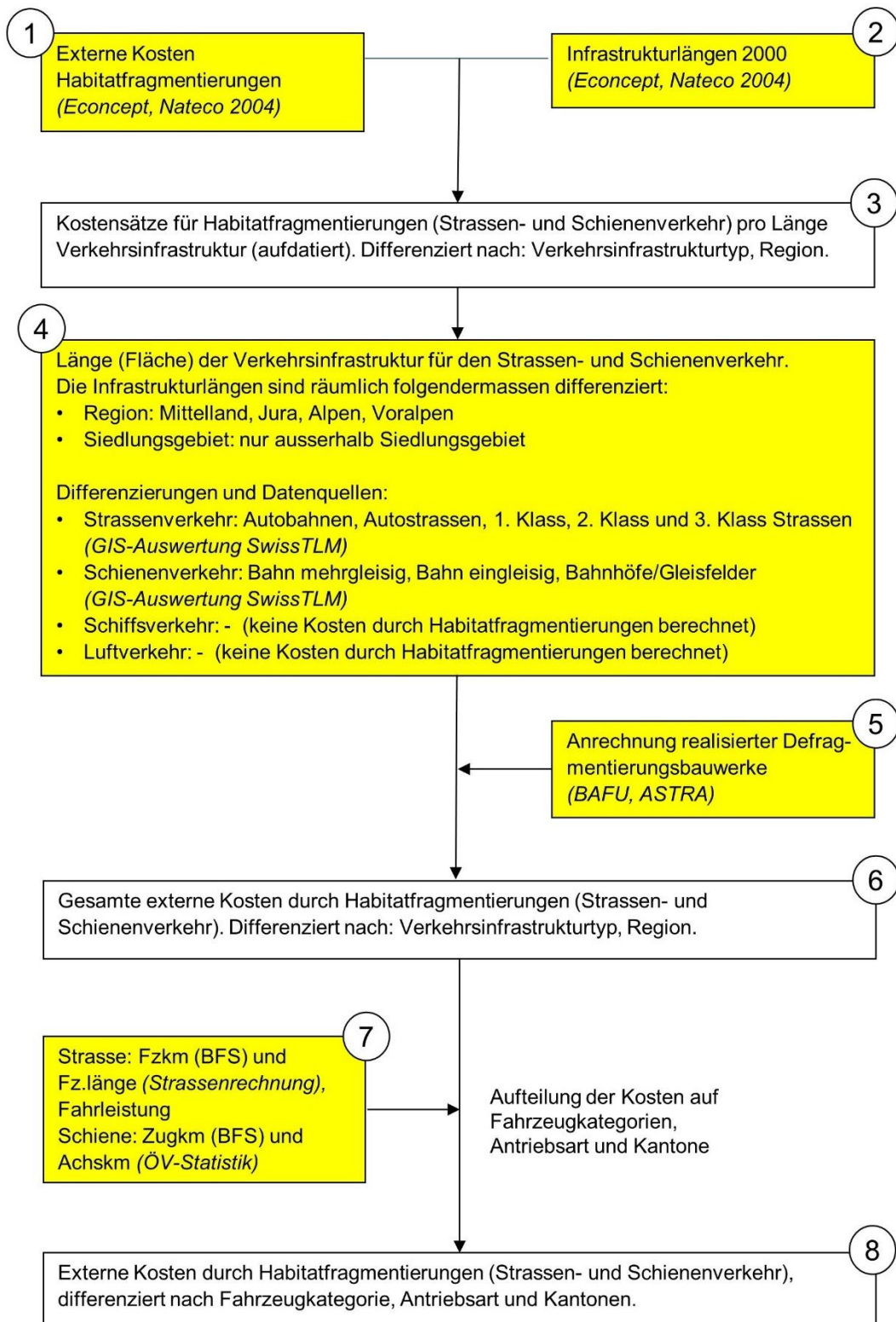


Abbildung 12-2: Bewertungsmethodik Kosten im Bereich Natur und Landschaft: Habitatfragmentierungen



Legende: Inputdaten Zwischen- / Endergebnisse Erläuterung der Berechnung (Datenquellen kursiv)

Nicht zusätzlich berücksichtigt werden in den vorliegenden Berechnungen allfällige positive Wirkungen auf die Biodiversität im Zusammenhang mit Verkehrsinfrastrukturen. Solche Effekte können beispielsweise grosse Biotopflächen (z.B. Magerwiesen) auf Flughäfen oder lange Korridore für Fauna und Flora entlang Strassen und Schienen haben. Auch wenn diese Effekte positiv zu würdigen sind, dürfte ihre Gesamtwirkung auf die Biodiversität verglichen mit dem ursprünglichen Referenzzustand (kein Verkehr) maximal ausgeglichen sein, d.h. sie können die negativen Wirkungen der neuen Infrastrukturen höchstens wett machen. Zusätzliche Flächen rund um die eigentlichen Verkehrsinfrastrukturen werden bei der Berechnung der Habitatverluste (Teil der externen Kosten) explizit nicht berücksichtigt.²⁹⁸ Ausserdem stehen Daten zur Quantifizierung allfälliger positiver Auswirkungen auf die Biodiversität durch Verkehrsinfrastrukturen nicht zur Verfügung.

Box: Ökologischer Ausgleich/Ersatzmassnahmen auf Flughäfen²⁹⁹

Flughäfen verfügen häufig über Flächen mit einer interessanten Biodiversität. Flughäfen können mit Geldern aus ihrem allgemeinen (also nicht zweckgebundenen) Budget Massnahmen zur Förderung der Biodiversität auf Flächen, die von der Luftfahrt nicht direkt genutzt werden und sich für eine naturnahe Gestaltung eignen, tätigen. Insofern diese Massnahmen die Situation der Biodiversität im Vergleich zum Referenzzustand (ohne Flughafen) verbessern, wären sie Kandidaten für eine Betrachtung als Internalisierungsbetrag. Entsprechende Datengrundlagen sind aber nicht vorhanden. Die Ausgleich- und Ersatzmassnahmen werden also in den Berechnungen dieser Studie nicht berücksichtigt. Für den interessierten Leser und die interessierte Leserin hier eine kurze Beschreibung der Massnahmen:

Grundsätzlich wird zwischen *ökologischem Ausgleich* und *Wiederherstellungs- bzw. Ersatzmassnahmen* unterschieden. Diese Instrumente leiten sich aus dem Natur- und Heimatschutzgesetz (NHG), Sachplan Infrastruktur der Luftfahrt (SIL, Konzeptteil) und Landschaftskonzept Schweiz (LKS) ab.

Mit den ökologischen Ausgleichsflächen soll ein Beitrag zur Verbesserung der ökologischen Situation und zur Förderung der Biodiversität auf Luftfahrtinfrastrukturen geleistet werden. Die Massnahmen sollen in erster Priorität freiwillig auf dem Flughafen realisiert werden und orientieren sich an einem Richtwert von 12% der Gesamtfläche des Flughafenperimeters.

Die Wiederherstellungs- und Ersatzmassnahmen stehen in direktem Zusammenhang mit einem Bauvorhaben. Werden durch den Bau von Luftfahrtinfrastrukturen schutzwürdige Lebensräume beeinträchtigt, müssen Ersatzmassnahmen getroffen werden.

²⁹⁸ Eine Überschätzung der Kosten würde nur dann vorliegen, wenn die Verkehrsinfrastruktur zu einer Verbesserung der Biodiversität im Vergleich zum Zustand «ohne Verkehr» führen würde.

²⁹⁹ BAFU; BAZL (2019)

Eine quantitative Schätzung dieser Effekte ist im Moment aus zwei Gründen schwierig. Einerseits fehlt eine flächendeckende Erfassung des Standes der Umsetzung und andererseits ist eine Bestimmung des Kostensatzes nicht ohne zusätzliche Studien möglich.

12.3 Mengengerüst

12.3.1 Längen (Flächen) Verkehrsinfrastrukturen

Die Länge der Verkehrsinfrastrukturen ist der zentrale Inputparameter für die Berechnung der Kosten infolge der Habitatverluste und -fragmentierungen. Die Infrastrukturlängen von Strasse und Schiene wurden mittels GIS-Daten neu erhoben.

Abbildung 12-3: Länge Strasseninfrastruktur ausserhalb und innerhalb des Siedlungsgebiets gemäss GIS-Auswertungen 2021 (TLM)³⁰⁰

Strassentyp	Strassenlänge ausserhalb Siedlung (in km)				
	Mittelland	Jura	Voraplen	Alpen	Total
Autobahn	877	149	278	234	1'539
Autostrasse	64	37	51	67	219
Total Autobahn/-strasse	940	186	330	302	1'758
1. Klass Strasse	3'451	767	1'114	1'210	6'544
2. Klass Strasse	6'874	1'590	2'045	2'598	13'106
3. Klass Strasse	10'945	4'258	7'738	4'467	27'408
Total 1.-3.Klass Strassen	21'270	6'616	10'897	8'275	47'058
Total alle Strassen	22'211	6'802	11'227	8'577	48'816

Strassentyp	Strassenlänge innerhalb Siedlung (in km)				
	Mittelland	Jura	Voraplen	Alpen	Total
Autobahn	147	25	33	25	229
Autostrasse	12	4	5	5	26
Total Autobahn/-strasse	159	28	38	30	256
1. Klass Strasse	4'368	505	712	599	6'183
2. Klass Strasse	12'595	2'014	2'310	1'757	18'676
3. Klass Strasse	7'984	1'314	2'497	2'263	14'057
Total 1.-3.Klass Strassen	24'946	3'833	5'519	4'618	38'916
Total alle Strassen	25'105	3'861	5'556	4'649	39'172

Die Infrastrukturlängen und -flächen für Strasse und Schiene wurden – analog dem Vorgehen für die Aktualisierung 2015 – differenziert nach Infrastrukturtyp (Verkehrsträger, Netzhierarchiestufe), biogeografischer Region (Mittelland, Jura, Voralpen, Alpen) und der Lage inner- bzw. ausserhalb des Siedlungsgebietes aus dem aktuellen Geobasisdatensatz «SwissTLM» der Swisstopo herge-

³⁰⁰ Gemäss BFS (2023c) gab es 2021 rund 1'984 km nationale Autobahnen und Autostrassen. Die restlichen 30 km der Autobahnen und Autostrassen in Abbildung 12-3 sind kantonale Autobahnen und Autostrassen.

leitet (TLM: Topografisches Landschaftsmodell). Dafür werden die Datenebenen der Infrastruktur-netze mittels Geoprocessing-Software mit denjenigen der Grossräume und des Siedlungsgebietes verschnitten und die resultierenden Längen nach den genannten Kriterien summiert.

Generell ist darauf hinzuweisen, dass die jeweils aktuell verfügbaren Geodaten keinen schweizweit einheitlichen Zeitstand darstellen. Sie bilden je nach Gebiet zeitlich unterschiedliche Zustände ab, weil die Datensätze in ca. 6-jährigen Zyklen nachgeführt werden.³⁰¹

Abbildung 12-4: Länge Schieneninfrastruktur ausserhalb und innerhalb Siedlungsgebiet gemäss GIS Auswertungen 2021 (TLM)

Schiene	Schienenlänge ausserhalb Siedlung (in km)				
	Mittelland	Jura	Voraplen	Alpen	Total
Bahn eingleisig	853	358	604	495	2'311
Bahn mehrgleisig & Gleisfelder	749	104	259	323	1'435
Total Schienen	1'602	463	863	818	3'745

Schiene	Schienenlänge innerhalb Siedlung (in km)				
	Mittelland	Jura	Voraplen	Alpen	Total
Bahn eingleisig	813	85	147	55	1'100
Bahn mehrgleisig & Gleisfelder	664	71	122	110	967
Total Schienen	1'477	156	269	166	2'067

Eine umfassende Aktualisierung der Infrastrukturlängen und -flächen beim Schiffs- bzw. Luftverkehr wird nicht vorgenommen. Beim Luftverkehr wurden die Flächen vom Flughafen Zürich, Basel und Genf aktualisiert. Für die restlichen Flughäfen wird auf das Mengengerüst aus dem Projekt «Integration des Luftverkehrs in die Transportrechnung»³⁰² zurückgegriffen. In diesem Projekt wurde die versiegelte Fläche der Flughäfen durch eine Umfrage bei den Flughäfen (für alle grossen Flughäfen) ermittelt. Gemäss Definition der Transportrechnung werden nur die Landes- und Regionalflughäfen abgedeckt, nicht aber die Flugfelder und Heliports. Die folgende Abbildung zeigt die Fläche der entsprechenden Luftverkehrsinfrastruktur in der Schweiz.

Abbildung 12-5: Flächen Luftverkehrsinfrastruktur 2021

	Fläche in ha (10'000 m ²)
Landesflughäfen	835.1
Regionalflugplätze	98.1
Alle Luftverkehr	933.2

³⁰¹ swisstopo (2023)

³⁰² INFRAS; Ecoplan (2012a)

Beim Schiffsverkehr wurde auf das Mengengerüst aus dem Projekt «Integration des Schiffsverkehrs in die Transportrechnung»³⁰³ zurückgegriffen. In diesem Projekt wurde die durch Hafenanlagen sowie Bootswerften und -häuser verbaute Uferfläche ermittelt.³⁰⁴ Für die Personenschiffahrt resultiert demnach ein Flächenverbrauch von 25.3 ha und für die Güterschiffahrt ein Verbrauch von 132.3 ha.³⁰⁵

12.3.2 Allokation auf die Fahrzeugkategorien

Die Allokation der Kosten durch Habitatverluste und Habitatfragmentierungen auf die einzelnen Fahrzeugkategorien wird auf Basis folgender Grundlagen vorgenommen:

- **Strassenverkehr:**

- *Habitatverluste:* Die Kosten durch Habitatverluste werden grundsätzlich auf Basis der nach Fahrzeuglängen gewichteten Fahrzeugkilometer auf die Fahrzeugkategorien zugeordnet. Aus der BFS-Studie zum Anteil der schwerverkehrsbedingten Kosten der Strasseninfrastruktur³⁰⁶ ist jedoch bekannt, dass ein Teil der dimensionsbedingten Faktoren der Strasse direkt den breiten Fahrzeugen zugeordnet werden können.³⁰⁷ Da es sich beim Flächenverbrauch um ein dimensionsbedingtes Element handelt, können diese Allokationsfaktoren für die vorliegende Studie verwendet werden. Die restlichen, nicht direkt durch den Schwerverkehr bedingten Kosten werden auf Basis der nach Fahrzeuglängen gewichteten Fahrzeugkilometer den Fahrzeugkategorien zugerechnet.³⁰⁸ Dem Fuss- und Veloverkehr werden für die Verkehrsinfrastrukturen innerorts ebenfalls ein Teil der Kosten zugeordnet. Dabei werden die im Rahmen der Transportrechnung Langsamverkehr ausgewiesenen Anrechnungsquoten verwendet.³⁰⁹ Für die Aufteilung auf die Fahrzeugkategorien Fuss-, Veloverkehr und fäG werden ebenfalls die Ergebnisse der gleichen Studie verwendet.
- *Habitatfragmentierungen:* Die Kosten durch Habitatfragmentierungen sind im Gegensatz zu den Habitatverlusten nicht direkt dimensionsbedingt und erfolgen deshalb wie bisher auf Basis der nach Fahrzeuglängen gewichteten Fahrzeugkilometer.³¹⁰ Da die Habitatfragmentierungen für Strassen nur ausserhalb der Siedlungen berechnet werden, fallen für den Fuss- und Veloverkehr gemäss KfV-Statistik (früher: Transportrechnung) Langsamverkehr keine Kosten an.

³⁰³ IRENE; Ecosys (2013a)

³⁰⁴ Die befestigten Ufer (u.a des Rheins) werden hier nicht in die dem Schiffsverkehr zugewiesenen Flächen einbezogen, da die Datengrundlagen derzeit keine ausreichend soliden Berechnungen zulassen.

³⁰⁵ IRENE; Ecosys (2013a)

³⁰⁶ INFRAS; SNZ; Ecoplan (2013)

³⁰⁷ Gemäss INFRAS; SNZ; Ecoplan (2013, S. 41) beträgt der Anteil der breiten Fahrzeuge bei dimensionsbedingte Faktoren bei Nationalstrassen 7.7%, bei Kantons- und Gemeindestrassen 9.5%. Zu den breiten Fahrzeugen gehören Gesellschaftswagen (Car), Bus, Trolleybus, Lastwagen und Sattelschlepper.

³⁰⁸ BFS (2022b)

³⁰⁹ Demnach beträgt der Anteil des Fuss- und Veloverkehrs abzüglich der verkehrsfremden Nutzungen bei den Kantonsstrassen 9% und bei den Gemeindestrassen 27% (Ecoplan, ISMPZ 2013, S. 48).

³¹⁰ BFS (2022b)

- **Schienenverkehr:** Die Allokation der Kosten auf den Personen- und Güterverkehr erfolgt sowohl für die Habitatverluste als auch die Habitatfragmentierungen auf Basis der Achskilometer.³¹¹
- **Luftverkehr:** Die Allokation der Kosten auf den Personen- und Güterverkehr erfolgt auf Basis des Gewichts.³¹²
- **Schiffsverkehr:** Die Flächenangaben liegen differenziert nach Personen- und Güterverkehr vor, so dass die Kostenberechnung separat durchgeführt werden kann.

12.3.3 Anrechnung von Ersatzmassnahmen

Seit Einführung der UVP-Pflicht bei neuen Verkehrsinfrastrukturen werden zum Teil ökologische Ersatzmassnahmen durchgeführt. Weil die Berechnung der externen Kosten durch Habitatverluste und Habitatfragmentierungen auf Kenngrössen aus dem Jahr 2000 beruht, müssen in der Zwischenzeit realisierte Ersatzmassnahmen wie ökologische Ausgleichsmassnahmen oder Defragmentierungsbauwerke (Über-, Unterführungen für Tiere) berücksichtigt werden. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

- **Habitatfragmentierungen:** Von den gesamten Kosten werden die zwischen 2000 und 2021 realisierten Defragmentierungsbauwerke (v.a. Wildtierüber- und Wildtierunterführungen) subtrahiert. Gemäss den Daten aus der Vorgängerstudie und eigener GIS-Auswertung der Daten des BAFU sind in diesem Zeitraum 54 Wildtierpassagen entstanden, davon 46 bei Strassen- und 8 bei Schieneninfrastrukturen.³¹³
- **Habitatverluste:** Bei den Habitatverlusten ist die bottom-up Herleitung der realisierten Ersatzmassnahmen und deren Wert schwierig. Deshalb wird bei den Habitatverlusten ausserhalb des Siedlungsgebiets jeweils der gleiche prozentuale Abschlagfaktor wie bei den Habitatfragmentierungen angewendet.

12.4 Wertgerüst

Das Wertgerüst für die Berechnung der Kosten durch Habitatverluste und Habitatfragmentierungen besteht aus Ersatzkosten (siehe dazu auch die Box unten) mit den folgenden Kostensätzen:

- **Habitatverluste:** Spezifische Ersatzkosten pro Infrastrukturlänge für die Wiederherstellung der verlorenen Biotope.
- **Habitatfragmentierungen:** Spezifische Ersatzkosten pro Infrastrukturlänge für Erstellung und Unterhalt von Defragmentierungsbauwerken.

³¹¹ Ecoplan; INFRAS (2008)

³¹² INFRAS; Ecoplan (2012b)

³¹³ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/oekologische-infrastruktur/wildtierpassagen.html>

Die Kostensätze für 2000 aus der Basisstudie³¹⁴ wurden mit der Entwicklung des Tiefbaupreisindex fortgeschrieben. Zusätzlich war eine Korrektur der Kostensätze nötig, um Faktorpreise auszuweisen und nicht wie in der Basisstudie Preise inklusive Mehrwertsteuer.

Die folgende Abbildung zeigt die spezifischen Kostensätze für die Habitatverluste und Habitatfragmentierungen pro Infrastrukturlänge differenziert nach Infrastrukturtyp. Die Kostensätze für den Luftverkehr sind in der Basisstudie³¹⁵ noch nicht ermittelt worden. Für die versiegelte Fläche des Luftverkehrs werden deshalb die Kostensätze der Autobahnen/Autostrassen verwendet. Weil das Mengengerüst beim Luftverkehr jedoch als Flächenangaben vorliegt und beim Strassenverkehr als Längen, müssen für den Luftverkehr Kostensätze pro Flächeneinheit abgeleitet werden. Dazu wird der Kostensatz der Autobahnen durch die mittlere Breite der Autobahnen geteilt. Daraus resultiert ein Kostensatz für die Habitatverluste von 1.3 CHF pro m² und Jahr.

Abbildung 12-6: Spezifische Kostensätze für Habitatverluste und Habitatfragmentierungen in CHF pro Meter (bzw. m²) für das Jahr 2021³¹⁶

Infrastrukturtyp	Einheit	Habitatverluste	Habitatfragmentierungen
Autobahn/-strasse	CHF/(m*a)	34.4	169.5
1.Klass-Strasse	CHF/(m*a)	6.0	23.4
2.Klass-Strasse	CHF/(m*a)	7.7	5.0
3.Klass-Strasse	CHF/(m*a)	4.2	3.0
Schiene total	CHF/(m*a)	12.4	21.3
Luftverkehr	CHF/(m ² *a)	1.3	-
Schiffsverkehr	CHF/(m ² *a)	3.5	-

Box: Abschreibungsdauer und zukünftige Kosten

Die Berechnung der externen Kosten im Bereich Natur und Landschaft beruht auf dem Ersatzkostenansatz. Die Idee dahinter ist, die potenziellen Kosten für Ersatzmassnahmen zur Wiederherstellung des Zustands ohne Schaden als Proxy für die tatsächlichen Schäden zu verwenden. Um aus Investitionskosten jährliche Kosten (Annuitäten) abzuleiten, muss eine adäquate Abschreibungsdauer (Lebensdauer) sowie ein entsprechender Diskontsatz (in der Basisstudie wurde ein Diskontsatz von 3% angenommen) verwendet werden. Für die Habitatverluste wurde von der Basisstudie³¹⁷ eine Abschreibungsdauer von 30 Jahren für die Ersatzinvestitionen bei den Habitat-

³¹⁴ Econcept; Nateco (2004)

³¹⁵ Econcept; Nateco (2004)

³¹⁶ Für die Berechnung wurden nach Regionen differenzierte Kostensätze verwendet.

³¹⁷ Econcept; Nateco (2004)

verlusten sowie eine Dauer von 80 Jahren für Investitionen in Defragmentierungsbauwerke verwendet.³¹⁸ Nun stellt sich die Frage, ob die Kosten durch Habitatverluste aufgrund dieser Abschreibungssauer nach 30 Jahren sozusagen abbezahlt sind und dann entfallen. Aus unserer Sicht ist diese Frage zu verneinen. Der Berechnungsansatz über die theoretischen jährlichen Ersatzkosten dient als Annäherung für die Ermittlung der tatsächlichen, jährlichen externen Kosten. Diese Kosten können entsprechend nicht im eigentlichen Sinne abbezahlt werden, sondern bleiben ein Proxy für die jährlichen Schadenskosten und somit dauerhaft relevant. Dazu kommt, dass in der Logik der Abschreibung die Abschreibungsdauer eine Lebensdauer widerspiegelt. Entsprechend wäre, rein theoretisch, nach Ende der Abschreibungsdauer eine Erneuerungsinvestition nötig, was entsprechend weiterhin zu fortdauernden jährlichen (Abschreibungs-)Kosten führt.

12.5 Vorgehen bei Differenzierungen

12.5.1 Differenzierung nach Antriebsart

Die Differenzierungen nach Antriebsart für den Strassenverkehr werden anhand der Anteile der Fahrleistungen vorgenommen (vgl. Anhang A, Kapitel 20.1.6).

12.5.2 Differenzierung nach Kantonen

Die kantonale Differenzierung im Strassen- und Schienenverkehr wird anhand der Fahrleistungsanteile je Kanton vorgenommen (vgl. Anhang A, Kapitel 20.1.5).

12.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

In erster Näherung sind die kurzfristigen Grenzkosten im Bereich Natur und Landschaft praktisch null. Eine höhere Verkehrsnachfrage führt kurzfristig bzw. unmittelbar zu keiner Veränderung der Habitatverluste. Sie verändern sich aber bei Neu- oder Ausbauten wegen Mehrverkehr. Bei den Habitatfragmentierungen gilt dies weitgehend auch, weil diese kurzfristig bzw. unmittelbar nicht von einer zusätzlichen kleinen (marginalen) Verkehrsmenge auf einer Infrastruktur beeinflusst werden. Für die Habitatfragmentierung sind andere Aspekte relevanter, z.B. ob eine Infrastruktur mit Zäunen, Wänden o.ä. abgetrennt ist sowie weitere Charakteristika der Infrastruktur (Breite, Anzahl Spuren etc.). Einen kleinen Einfluss hat aber auch die Verkehrsmenge. Dieser Anteil kann als Grenzkosten betrachtet werden, dürfte aber kaum zu bestimmen sein.

Differenzierte Durchschnittskosten, oder langfristige Grenzkosten, sind grundsätzlich relevant für die Differenzierungen nach Infrastrukturen und Raumtyp. In diesen Aspekten unterscheiden sich die Kosten erheblich (z.B. Stadt, Intermediär, Land). Eine Ermittlung dieser Kosten scheint grundsätzlich machbar, dürfte aber schwierig und aufwändig sein. Auf eine Berechnung von langfristigen Grenzkosten wird im vorliegenden Bericht grundsätzlich verzichtet (vgl. Kapitel 3.4.2).

³¹⁸ Bei einer sehr langen Abschreibungsdauer wie 80 oder 100 Jahre sind die Annuitäten stark von den Zinskosten dominiert, d.h. die Jahreskosten ähnlich hoch wie bei einer unendlichen Lebens- bzw. Abschreibungsdauer.

12.7 Ergebnisse

12.7.1 Externe Kosten

a) Überblick Gesamtverkehr

Die Abbildung 12-7 und Abbildung 12-8 zeigen die gesamten externen bzw. sozialen Kosten im Bereich Natur und Landschaft im Jahr 2021 nach Verkehrsträgern. Bei dieser Kostenkategorie entsprechen die externen den sozialen Kosten, da es keinen Internalisierungsbeitrag gibt. Die Minderung der Schäden bzw. Internalisierung durch Defragmentierungsbauwerke oder ökologische Ersatzmassnahmen sind bereits subtrahiert, d.h. in den Zahlen berücksichtigt. Zudem sind die externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende und aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr genau gleich hoch.

Die gesamten externen Kosten des Bereiches Natur und Landschaft im Verkehr betrugen 2021 1'118 Mio. CHF. Davon sind 87% bzw. 971 Mio. CHF auf den Strassenverkehr zurückzuführen, 12% (134 Mio. CHF) auf den Schienenverkehr und je 0.7% und 0.5% auf den Luft- und Schiffsverkehr. Rund 60% der Kosten entfallen auf die Habitatfragmentierungen. Die Habitatverluste tragen rund 40% zu den Gesamtkosten bei. 81% der Kosten werden durch den Personenverkehr verursacht, 19% durch den Güterverkehr.

Abbildung 12-7: Überblick über die externen Kosten im Bereich Natur und Landschaft (Habitatfragmentierungen und Habitatverluste) 2021

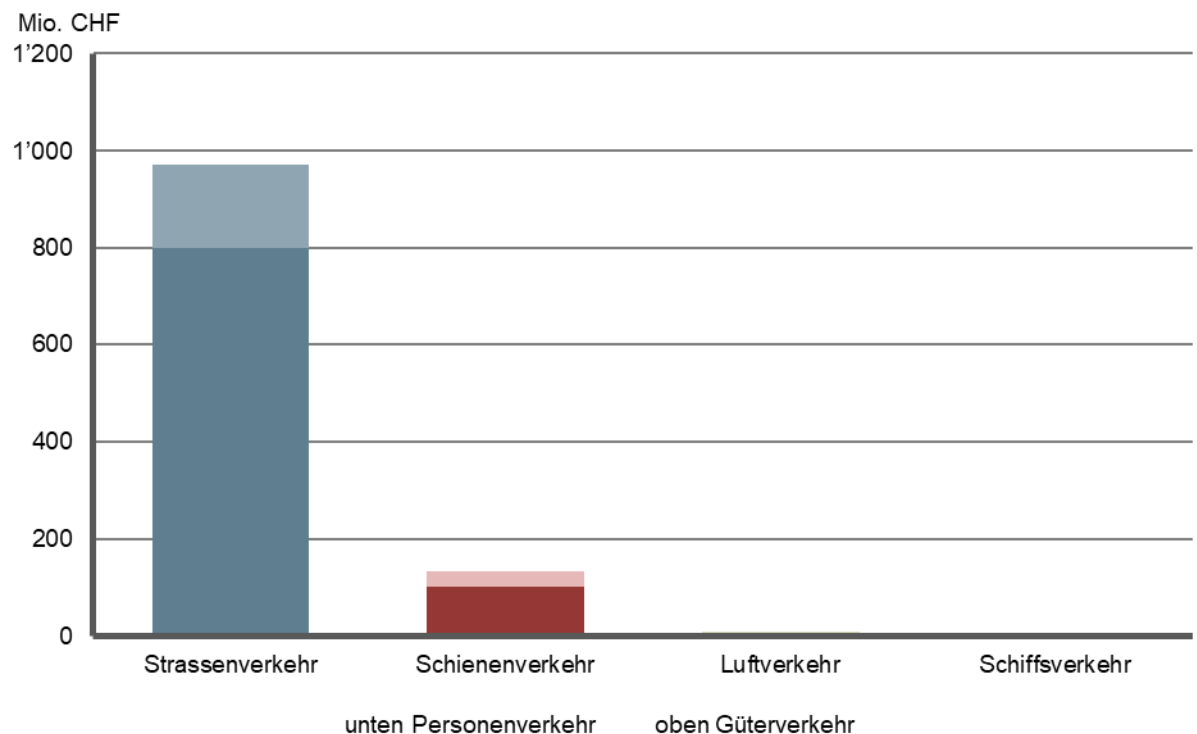


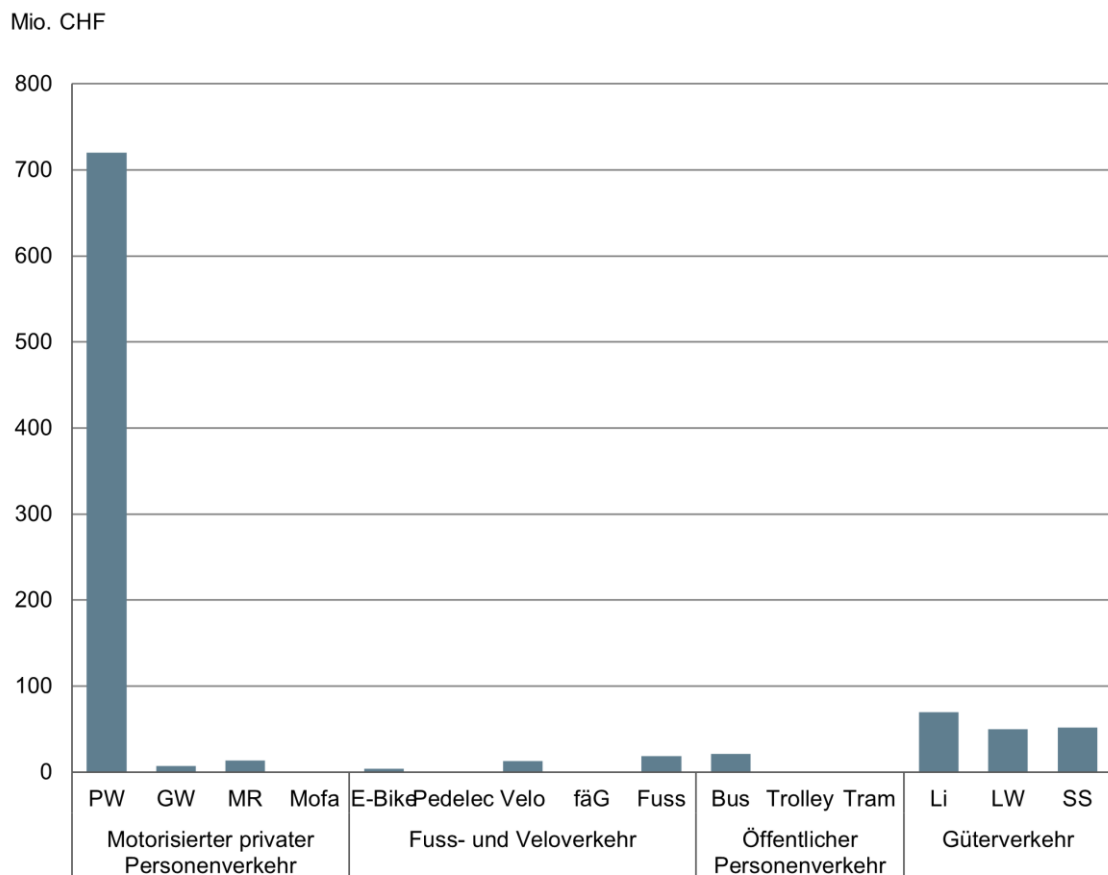
Abbildung 12-8: Überblick über die externen Kosten im Bereich Natur und Landschaft (Habitatfragmentierungen und Habitatverluste) 2021

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr		800.1	171.3	971.4	86.9%
Schienenverkehr		101.2	32.3	133.5	11.9%
Luftverkehr		6.6	0.8	7.3	0.7%
Schiffsverkehr		0.9	4.6	5.4	0.5%
Total		908.8	208.9	1'117.7	100.0%
in % des Totals		81.3%	18.7%	100.0%	

b) Strassenverkehr

Die Abbildung 12-9 und Abbildung 12-10 zeigen die Aufteilung der durch den Strassenverkehr verursachten Kosten im Bereich Natur und Landschaft auf die einzelnen Fahrzeugkategorien. 76% der Kosten (740 Mio. CHF) des Strassenverkehrs entfallen auf den motorisierten privaten Perso-

Abbildung 12-9: Externe Kosten im Bereich Natur und Landschaft (Habitatfragmentierungen und Habitatverluste) 2021 nach Fahrzeugkategorien



nenverkehr, wobei die Personenwagen 74% der Gesamtkosten des Strassenverkehrs verursachen. Auf den Fuss- und Veloverkehr entfallen 4% der Kosten (37 Mio. CHF), der öffentliche Personenverkehr verursacht 2% (knapp 23 Mio. CHF) und der Güterverkehr 18% (171 Mio. CHF) der Kosten. Beim Strassenverkehr entfallen 60% der Kosten auf die Habitatfragmentierungen, während 40% durch die Habitatverluste verursacht werden.

Abbildung 12-10: Externe Kosten des Strassenverkehrs im Bereich Natur und Landschaft 2021 nach Fahrzeugkategorien sowie Kostenelementen

in Mio. CHF	Motorisierter privater Personenverkehr				Personenverkehr					Öffentlicher Personenverkehr			Güterverkehr			Gesamttotal
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Habitatfragmentierungen	456.5	3.8	8.5	-	-	-	-	-	-	5.1	-	-	45.2	29.6	33.3	582.0
Habitatverluste	263.7	3.1	4.9	0.1	4.3	0.6	12.8	0.4	18.5	15.8	1.0	1.0	24.3	20.4	18.5	389.4
Total	720.1	6.9	13.4	0.1	4.3	0.6	12.8	0.4	18.5	20.9	1.0	1.0	69.5	49.9	51.8	971.4
in % des Gesamttotal	74.1%	0.7%	1.4%	0.0%	0.4%	0.1%	1.3%	0.0%	1.9%	2.2%	0.1%	0.1%	7.2%	5.1%	5.3%	100.0%
Total Teilbereiche	740.6				36.5					22.9			171.3			971.4
in % des Gesamttotal	76.2%				3.8%					2.4%			17.6%			100.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

«0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «-» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt auch für alle folgenden Abbildungen.

Die Abbildung 12-11 zeigt die Aufteilung der Kosten im Bereich Natur und Landschaft für den Strassenverkehr differenziert nach den einzelnen Fahrzeugkategorien und Antriebsarten. 94 % der Kosten (915 Mio. CHF) des Strassenverkehrs werden durch fossile Fahrzeuge verursacht. Im Vergleich zu den meisten anderen Kostenbereichen ist der Kostenanteil der fossilen Fahrzeuge geringer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass beim Kostenbereich Natur und Landschaft der Anteil der Kosten für Fuss- und Veloverkehr (Muskelkraft) höher ist als in den meisten anderen Kostenbereichen.

Abbildung 12-11: Externe Kosten im Bereich Natur und Landschaft (Habitatfragmentierungen und Habitatverluste) 2021 nach Antriebsart

in Mio. CHF	Motorisierter privater Personenverkehr				Personenverkehr					Öffentlicher Personenverkehr			Güterverkehr			Gesamttotal
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Fossil	704.5	6.9	13.3	0.1	-	-	-	-	-	20.1	-	-	68.8	49.7	51.5	915.1
Elektrisch	8.2	0.0	0.1	-	4.3	0.6	-	-	-	0.3	1.0	1.0	0.5	0.1	0.1	16.2
Rest	7.3	-	-	-	-	-	-	-	-	0.4	-	-	0.3	0.2	0.2	8.4
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	12.8	0.4	18.5	-	-	-	-	-	-	31.7
Total	720.1	6.9	13.4	0.1	4.3	0.6	12.8	0.4	18.5	20.9	1.0	1.0	69.5	49.9	51.8	971.4
Anteil Fossil	97.8%	99.9%	99.4%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	96.4%	0.0%	0.0%	99.0%	99.4%	99.4%	94.2%
Anteil Elektrisch	1.1%	0.1%	0.6%	0.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.6%	100.0%	100.0%	0.7%	0.2%	0.2%	1.7%
Anteil Rest	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.4%	0.4%	0.9%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	3.3%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

In der Abbildung 12-12 werden die externen Kosten im Bereich Natur und Landschaft nach Kantonen und Verkehrsmittel aufgezeigt. Im Kanton Zürich fallen mit 15% der Gesamtkosten am meisten Kosten an. Darauf folgt der Kanton Bern und der Kanton Waadt mit 12% bzw. 11% der Gesamtkosten. Diese drei Kantone sind auch die Kantone mit dem längsten Strassennetz in der Schweiz.

Abbildung 12-12: Externe Kosten im Bereich Natur und Landschaft (Habitatfragmentierungen und Habitatverluste) 2021 nach Kantonen

in Mio. CHF	Personenverkehr									Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr		Li	LW		SS	
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram				
Zürich	107.4	1.1	2.0	0.0	0.9	0.1	2.5	0.1	3.5	3.6	0.4	10.0	7.9	6.4	145.9
Bern	87.1	0.9	1.6	0.0	0.5	0.1	1.5	0.0	2.0	2.2	0.1	8.4	6.1	5.7	116.3
Luzern	36.9	0.4	0.7	0.0	0.2	0.0	0.5	0.0	0.7	1.4	-	3.3	2.7	3.1	49.9
Uri	5.9	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	-	0.5	0.8	1.6	9.3
Schwyz	16.3	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.3	0.4	-	1.4	0.9	0.8	20.7
Obwalden	3.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	-	0.3	0.2	0.1	3.9
Nidwalden	4.5	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	-	0.5	0.4	0.6	6.5
Glarus	4.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	-	0.6	0.4	0.3	6.0
Zug	10.7	0.1	0.2	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.3	0.4	-	0.9	0.5	0.4	13.9
Freiburg	27.5	0.3	0.5	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.5	0.6	-	2.4	1.9	2.1	36.4
Solothurn	23.9	0.4	0.4	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.5	0.7	0.0	2.4	2.6	3.3	34.9
Basel-Stadt	6.8	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.6	0.6	0.2	0.5	0.5	0.5	10.4
Basel-Landschaft	22.7	0.3	0.4	0.0	0.1	0.0	0.5	0.0	0.6	0.6	0.1	2.5	2.1	2.6	32.5
Schaffhausen	4.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.3	-	0.4	0.3	0.3	6.3
Appenzell A.Rh.	3.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	-	0.3	0.1	0.0	4.0
Appenzell I.Rh.	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	0.1	0.0	0.0	1.0
St. Gallen	54.2	0.5	1.0	0.0	0.2	0.0	0.7	0.0	1.0	1.7	-	6.1	3.8	4.0	73.4
Graubünden	19.7	0.2	0.4	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.4	0.9	-	2.5	1.7	1.4	27.5
Aargau	65.1	0.7	1.2	0.0	0.3	0.0	0.9	0.0	1.3	1.7	-	6.7	5.1	6.6	89.6
Thurgau	22.9	0.2	0.4	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.5	0.5	-	2.0	1.4	1.4	29.6
Tessin	41.4	0.4	0.8	0.0	0.2	0.0	0.5	0.0	0.9	1.0	-	3.6	2.8	4.2	55.8
Waadt	80.1	0.6	1.5	0.0	0.4	0.1	1.2	0.0	1.9	1.5	0.1	7.7	4.5	4.2	103.8
Wallis	25.5	0.2	0.5	0.0	0.1	0.0	0.4	0.0	0.7	1.1	-	2.6	1.5	1.2	33.9
Neuenburg	13.5	0.1	0.3	0.0	0.1	0.0	0.2	0.0	0.5	0.4	0.0	1.2	0.5	0.3	17.1
Genf	24.9	0.1	0.5	0.0	0.4	0.1	1.2	0.0	1.6	1.6	0.1	2.3	0.8	0.5	34.1
Jura	7.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	-	0.4	0.3	0.2	8.7
Total	720.1	6.9	13.4	0.1	4.3	0.6	12.8	0.4	18.5	21.9	1.0	69.5	49.9	51.8	971.4

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

c) Schienenverkehr

Die Kosten für den Schienenverkehr betragen im Jahr 2021 134 Mio. CHF. Davon können 76% dem Personenverkehr und 24% dem Güterverkehr zugeordnet werden.

Abbildung 12-13: Externe Kosten des Schienenverkehrs im Bereich Natur und Landschaft 2021 nach Personen- und Güterverkehr sowie Kostenelementen

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Habitatfragmentierungen		59.4	19.0	78.4
Habitatverluste		41.8	13.3	55.2
Total		101.2	32.3	133.5

Die Abbildung 12-14 zeigt die Aufteilung der externen Kosten im Bereich Natur und Landschaft nach Kantonen sowie Verkehrsart für den Schienenverkehr. Im Kanton Bern fallen mit 16.5% der

Abbildung 12-14: Externe Kosten im Bereich Natur und Landschaft (Habitatfragmentierungen und Habitatverluste) 2021 nach Kantonen

	in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich	15.8	2.0		17.8
Bern	16.9	5.2		22.1
Luzern	4.2	0.4		4.5
Uri	1.0	1.1		2.1
Schwyz	2.8	1.4		4.2
Obwalden	0.5	0.0		0.5
Nidwalden	0.3	0.0		0.3
Glarus	0.8	0.2		0.9
Zug	1.2	0.3		1.6
Freiburg	3.9	0.3		4.2
Solothurn	3.3	2.1		5.5
Basel-Stadt	0.7	0.3		0.9
Basel-Landschaft	2.8	1.4		4.2
Schaffhausen	0.9	0.0		0.9
Appenzell A.Rh.	0.6	0.0		0.6
Appenzell I.Rh.	0.3	-		0.3
St. Gallen	5.8	0.9		6.7
Graubünden	4.7	1.5		6.3
Aargau	8.5	5.9		14.4
Thurgau	3.5	0.5		4.0
Tessin	3.4	3.4		6.8
Waadt	9.7	2.5		12.3
Wallis	5.2	1.9		7.0
Neuenburg	2.1	0.8		2.9
Genf	1.3	0.2		1.5
Jura	1.0	0.0		1.1
Total	101.2	32.3		133.5

Gesamtkosten am meisten Kosten an. Darauf folgt der Kanton Zürich und der Kanton Aargau mit 13.3% bzw. 10.8% der Gesamtkosten. Im Kanton Bern sind die hohen Kosten sowohl auf den Güterverkehr als auch auf den Personenverkehr zurückzuführen. Im Kanton Aargau sind die hohen Kosten vor allem auf den Güterverkehr zurückzuführen, während im Kanton Zürich die hohen Kosten hauptsächlich durch den Personenverkehr bedingt sind.

d) Luftverkehr

Der Luftverkehr verursacht im Vergleich zum Strassen- und Schienenverkehr tiefe Kosten für Natur und Landschaft, weil sein Flächenbedarf verhältnismässig gering ist. Habitatfragmentierungen wurden für den Luftverkehr keine ermittelt (siehe Kapitel 12.2.2), die Habitatverluste betragen im Jahr 2021 7.3 Mio. CHF, wovon knapp 90% dem Personenverkehr zuzuordnen sind.

Abbildung 12-15: Externe Kosten des Luftverkehrs im Bereich Natur und Landschaft 2021 nach Personen- und Güterverkehr sowie Kostenelementen

	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
in Mio. CHF			
Habitatfragmentierungen	-	-	-
Habitatverluste	6.6	0.8	7.3
Total	6.6	0.8	7.3

Der grösste Teil der Kosten (97%) fallen beim Linien- und Charterverkehr an. Etwa 81% der Kosten sind den Landesflughäfen zuzuschreiben und knapp 19% den Regionalf Flughäfen.

Abbildung 12-16: Externe Kosten des Luftverkehrs im Bereich Natur und Landschaft 2021 nach Flugarten und Infrastrukturtyp

	Landesflughäfen	Regionalf Flughäfen	Total
in Mio. CHF			
Linien- und Charterverkehr interkontinental	0.7	0.2	0.9
Linien- und Charterverkehr europäisch	5.1	1.2	6.2
Helikopter	0.0	0.0	0.0
Business Aviation	0.0	0.0	0.1
Rest General Aviation	0.1	0.0	0.1
Total	6.0	1.4	7.3

e) Schiffsverkehr

Der Schiffsverkehr verursacht ebenfalls geringe Kosten für Natur und Landschaft im Vergleich zu den Verkehrsträgern Strasse und Schiene. Relevant sind primär die Hafenanlegestellen, die zu Habitatverlusten im Umfang von 5.4 Mio. CHF führen. Habitatfragmentierungen wurden für den

Schiffverkehr keine ermittelt (siehe Kapitel 12.2.2). Von diesen Kosten ist der grösste Teil (rund 84%) dem Güterverkehr zuzuordnen.

Abbildung 12-17: Externe Kosten des Schiffsverkehrs im Bereich Natur und Landschaft 2021 nach Personen- und Güterverkehr sowie Kostenelementen

	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
in Mio. CHF			
Habitatfragmentierungen	-	-	-
Habitatverluste	0.9	4.6	5.4
Total	0.9	4.6	5.4

12.8 Sensitivitätsanalyse

12.8.1 Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten

Bei der Ermittlung der externen Kosten im Bereich Natur und Landschaft werden Daten verwendet, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Vor allem die Ersatzkostensätze weisen Unsicherheiten auf, da sie einerseits auf einer älteren Studie³¹⁹ basieren und andererseits einen grossen Einfluss auf das Ergebnis haben. In der folgenden Abbildung werden die Unsicherheiten der Ersatzkostensätze dargestellt. Im anschliessenden Abschnitt wird dann untersucht, wie sensitiv die Ergebnisse auf Veränderungen dieser Annahmen reagieren.

Abbildung 12-18: Übersicht über Inputdaten, Annahmen und Bandbreiten bei den Kosten für Natur und Landschaft

Bereich / Annahme	Wissenstand (vgl. Kapitel 3.3.1)	Vorgehen in Basis- berechnung	Bandbreite Sensitivitäts- analyse
Wertgerüst			
Ersatzkosten Habitatfragmentierungen	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	± 20%
Ersatzkosten Habitatverluste	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	± 20%

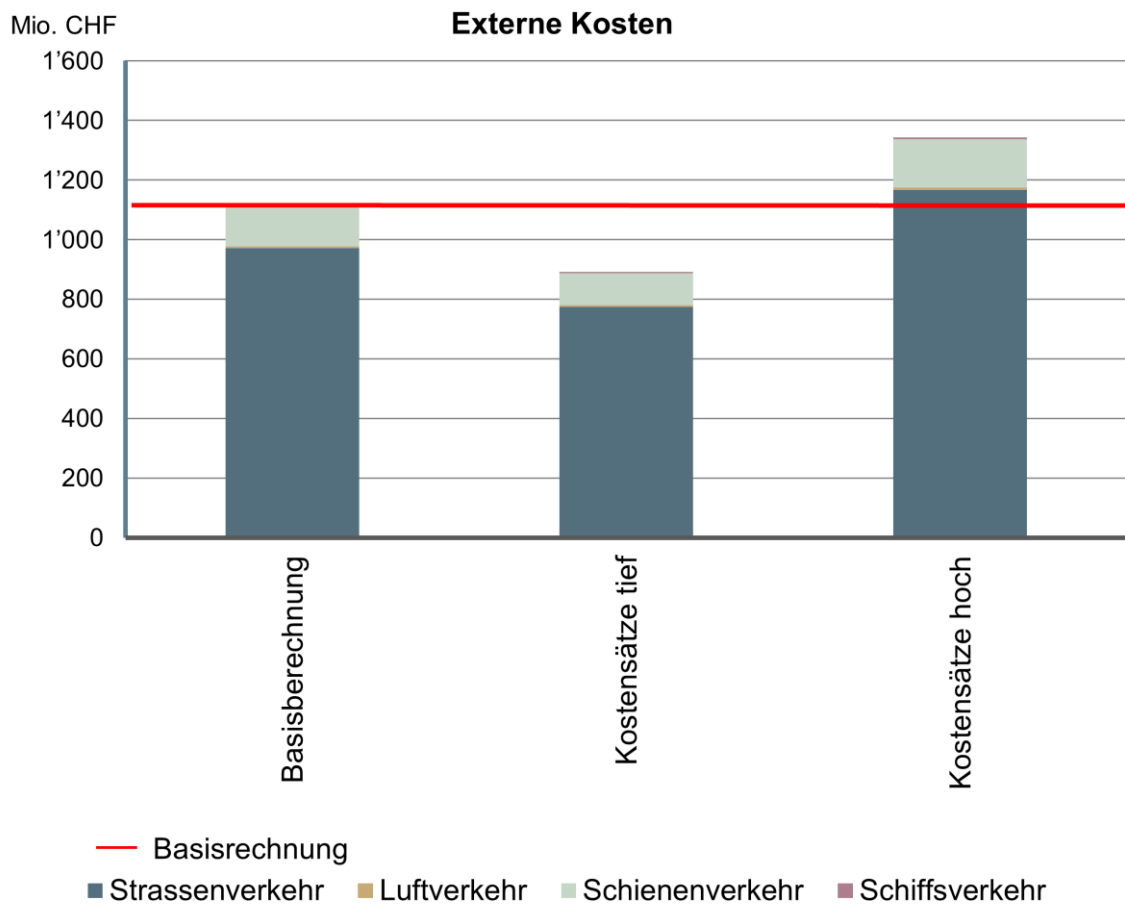
12.8.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen, wie sich die externen Kosten für Natur und Landschaft verändern, wenn, wie in Abbildung 12-18 dargestellt, die Kostensätze für Habitatverluste und Habitatfragmentierungen angepasst werden. Die Ergebnisse sind für alle Verkehrsträger entweder um 20% niedriger oder um 20% höher.

³¹⁹ Econcept; Nateco (2004)

Abbildung 12-19: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die externen Kosten für Natur und Landschaft 2021

in Mio. CHF	Strassenverkehr	Schienenverkehr	Luftverkehr	Schiffsverkehr
Basisberechnung	971.4	133.5	7.3	5.4
Kostensätze tief	775.7	106.5	5.9	4.3
Kostensätze hoch	1'167.0	160.6	8.8	6.5
Abweichung von Basisrechnung in %				
Kostensätze tief	-20%	-20%	-20%	-20%
Kostensätze hoch	20%	20%	20%	20%

Abbildung 12-20: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die externen Kosten für Natur und Landschaft 2021

12.8.3 Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen

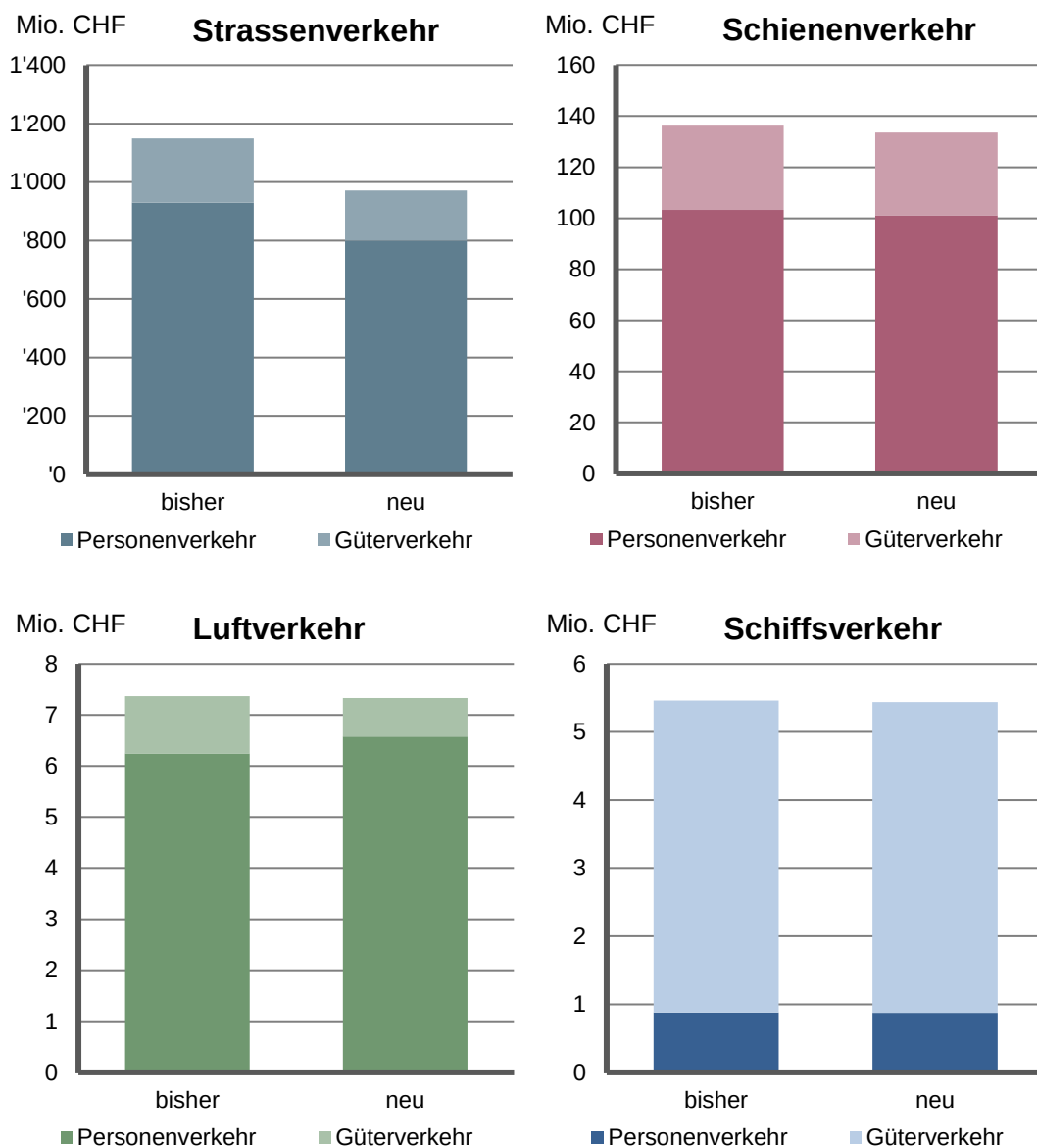
Die Kosten für Natur und Landschaft werden – vereinbar mit dem at-least Ansatz – insgesamt unterschätzt. Denn die vorliegende Berechnung der Kosten deckt lediglich die Folgen der Habitatverluste und der Habitatfragmentierung ab. Daneben gibt es im Bereich Natur und Landschaft je-

doch eine Reihe weiterer Schadwirkungen, die im Rahmen der vorliegenden Studie nicht monetarisiert werden konnten, z.B. durch Lichtimmissionen, Eintrag von Streusalz in die Umwelt, eine Habitatdegradierung oder invasive Neophyten.

12.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Die Abbildung 12-21 und Abbildung 12-22 zeigen grafisch und tabellarisch den Vergleich der Kosten im Bereich Natur und Landschaft 2021 mit den Ergebnissen der Berechnungen mit früheren Berechnungsmethodik. Der Vergleich zeigt den Effekt der neuen Datengrundlagen.

Abbildung 12-21: Überblick und Vergleich der Berechnungen für die externen Kosten im Bereich Natur und Landschaft basierend auf den alten und den neuen Datengrundlagen sowie Methodik



Achtung: Die Skalen der vier Verkehrsträger sind unterschiedlich

Insgesamt sind die externen Kosten im Bereich Natur und Landschaft aufgrund der neuen Datengrundlagen um 14% gesunken. Hauptgrund für diese Abnahme ist die neue GIS-Auswertung für die Ermittlung der Streckenlängen. Gemäss den neuen GIS-Daten ist die Länge der Autobahnen und Autostrassen um ca. 50% geringer als bei einer Berechnung mit den alten Datengrundlagen. Dies liegt einerseits daran, dass die alten Datengrundlagen mit den Wachstumsraten 2015-2021 aus BFS-Daten berechnet wurden, ohne zu berücksichtigen, dass in der Zwischenzeit 400 km Kantonsstrassen zu Nationalstrassen umklassiert wurden.³²⁰ Andererseits wurden in den alten Datengrundlagen zu viele Streckenlängen den Autostrassen und Autobahnen zugeordnet.

Die Unterschiede in den Berechnungen für den Schienenverkehr sind ebenfalls auf die neuen GIS-Auswertungen zurückzuführen. Die aktualisierte GIS-Analyse zeigt eine deutliche Zunahme der eingleisigen Bahngleise innerorts im Mittelland. Da der Kostensatz für eingleisige Bahngleise im Mittelland gemäss der Grundstudie negativ ist, führt diese Zunahme an Bahngleisen zu geringeren Gesamtkosten.³²¹

Die marginale Veränderung im Luft- und Schiffsverkehr ist ein Ergebnis leicht angepasster Preisindizes (Jahresdurchschnitt Preisindex Tiefbau anstatt Oktober) zur Fortschreibung der Kostensätze.

³²⁰ Siehe [Infrastruktur und Streckenlänge | Bundesamt für Statistik \(admin.ch\)](#). Um eine Überschätzung aufgrund des Definitionsänderung zu vermeiden, hat das ARE in seinen früheren Publikationen die Strassenlänge seit 2018 konstant gehalten.

³²¹ Gemäss der Grundlagenstudie bedeutet ein negatives Vorzeichen ein Flächengewinn. So haben die Biototypen Moore und Sümpfe entlang den Bahngleisen seit den 1950er/60er Jahren bis zum Verfassen der Grundstudie zugenommen haben.

Abbildung 12-22: Überblick und Vergleich der Berechnungen für die Kosten im Bereich Natur und Landschaft mit der alten und der neuen Datengrundlagen

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	929.99	219.56	1'149.6
Schienenverkehr	103.3	32.9	136.2
Luftverkehr	6.2	1.1	7.4
Schiffsverkehr	0.9	4.6	5.5
Total	1'040.4	258.2	1'298.6
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	800.1	171.3	971.4
Schienenverkehr	101.2	32.3	133.5
Luftverkehr	6.6	0.8	7.3
Schiffsverkehr	0.9	4.6	5.4
Total	908.8	208.9	1'117.7
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	-14.0%	-22.0%	-15.5%
Schienenverkehr	-2.0%	-2.0%	-2.0%
Luftverkehr	5.3%	-32.6%	-0.5%
Schiffsverkehr	-0.5%	-0.5%	-0.5%
Total	-12.7%	-19.1%	-13.9%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	-129.9	-48.3	-178.2
Schienenverkehr	-2.0	-0.7	-2.7
Luftverkehr	0.3	-0.4	-0.0
Schiffsverkehr	-0.0	-0.0	-0.0
Total	-131.6	-49.3	-180.9

13 Bodenschäden durch toxische Stoffe

13.1 Berechnungsgegenstand

Die wichtigsten Umweltwirkungen des Verkehrs auf den Boden umfassen die Bodenverschmutzung entlang von Verkehrswegen durch Schwermetalle und PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) sowie die Bodenversauerung und Überdüngung des Bodens durch Stickstoffeintrag. Weiter verursacht der Bau von Verkehrswegen Bodenschäden und bei Unfällen und Lecks kann es zu Bodenbelastungen kommen.³²²

Die Überdüngung und Versauerung von Böden sind in der Schweiz hauptsächlich bei Waldböden ein Problem. Diese Schadensaspekte wurden bereits im Kapitel 7 behandelt. Bei Bodenverschmutzungen, die beim Bau von Strassen und Schienen sowie durch Lecks und Unfälle entstehen, handelt es sich grundsätzlich um private Kosten, die vom Verursacher getragen werden müssen. Selbstverständlich ist dies in der Praxis nicht immer der Fall, z.B. wenn Schäden nicht entdeckt werden. Das Ausmass dieser unbemerkten, nicht vom Verursacher getragenen Schäden lässt sich jedoch nicht quantifizieren, ist aber voraussichtlich gering. Somit bleibt die Bodenverschmutzung entlang von Verkehrswegen durch die Emission von Schwermetallen und PAK als relevanter Kostenaspekt.

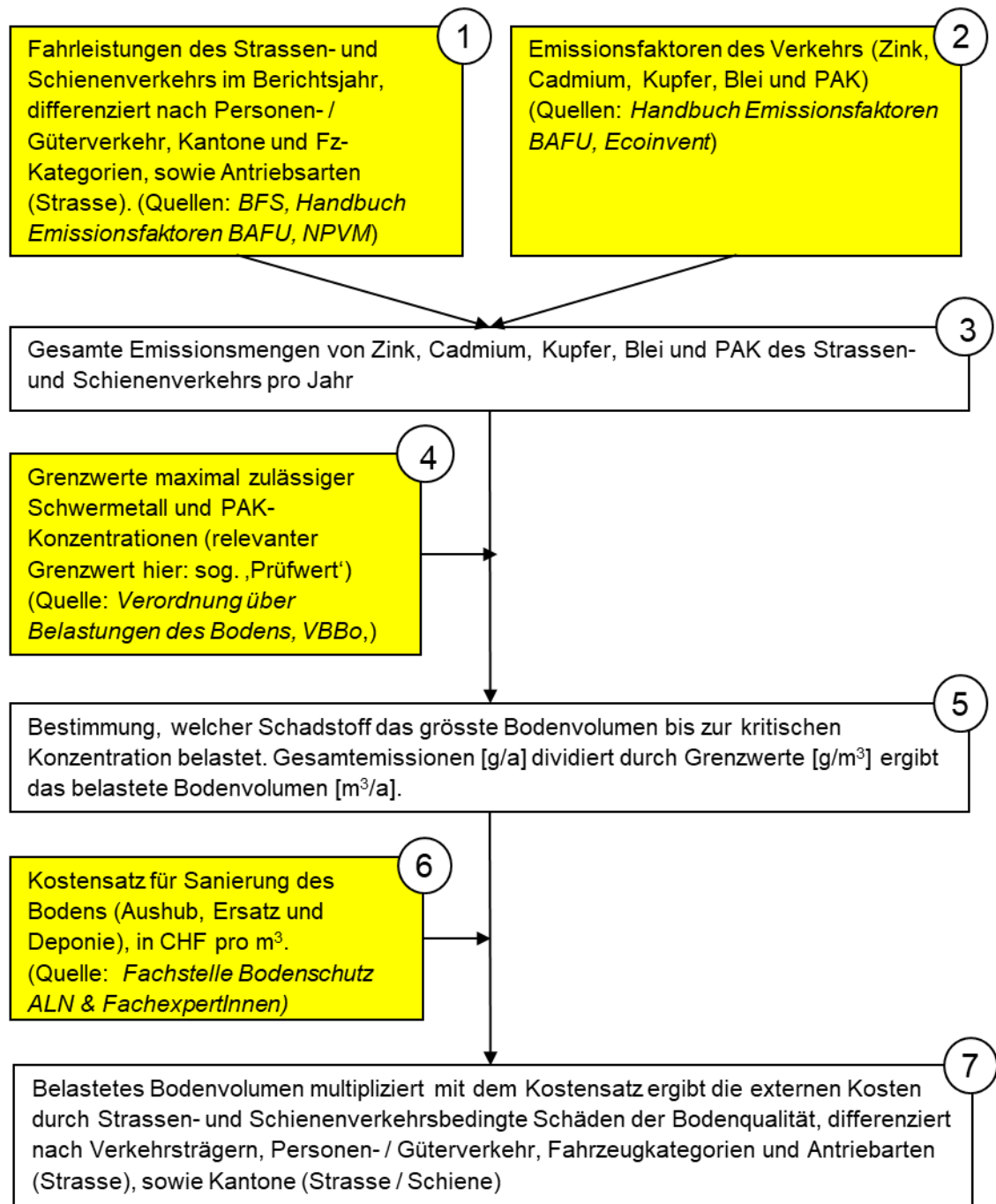
13.2 Bewertungsmethodik

Die Bewertung der Bodenschäden anhand des Reparaturkostenansatzes – wie sie bereits in den früheren Studien für die Berechnung der externen Kosten des Verkehrs in den Jahren 2010 und 2015 verwendet wurde – stellt noch immer den einzigen verwendbaren Bewertungsansatz dar. Die Verwendung des **Reparaturkostenansatzes** ist im vorliegenden Fall als praktikable Alternative zur Schadenskostenberechnung zu empfehlen, weil Belastungs-Wirkungs-Beziehungen grösstenteils fehlen und damit die Schadenskosten nicht verlässlich bestimmt werden können.

In der vorliegenden Studie werden die Bodenschäden mit dem Reparaturkostenansatz anhand der Sanierungskosten für mit Schwermetallen bzw. PAK verschmutzte Böden berechnet. Diese Berechnungsmethodik basiert auf der Überlegung, dass Böden mit einer Schadstoffbelastung oberhalb eines bestimmten Grenzwertes nicht mehr langfristig fruchtbar sind (Richtwert) und gar eine potenzielle oder erwiesene Gefährdung für Pflanzen, Tiere sowie allenfalls auch Menschen darstellen (Prüf- bzw. Sanierungswert). Abbildung 13-1 zeigt das Vorgehen bei der Quantifizierung der aktuellen, jährlichen verkehrsbedingten Schäden an der Bodenqualität.

³²² Die Schäden durch den Einsatz von chemischen Hilfsmitteln im Verkehr (Herbizide bzw. Streusalz) werden nicht berücksichtigt. Die Gründe dafür sind der Mangel an Daten, die angenommene geringe Bedeutung und die Schwierigkeit an der Feststellung des Anteils, der extern und dem Verkehr als Verursacher zuzuschreiben ist (vs. Wetter, Strasseninstandhaltungskosten). Siehe Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2006), S.106-107.

Abbildung 13-1: Bewertungsmethodik Bodenschäden durch toxische Stoffe



Legende: Inputdaten Zwischen- / Endergebnisse Erläuterung der Berechnung (Datenquellen kursiv)

Die wichtigste Inputgrösse bilden die jährlich emittierten Mengen an Schwermetallen und PAK (3). Diese Gesamtemissionen werden durch Multiplikation von Aktivitätsdaten (1) – vorliegend die

Fahrleistungen – mit den zugehörigen Emissionsfaktoren (2) berechnet. Wenn diese Emissionsmengen den Grenzwerten für die maximal zulässigen Schwermetall- bzw. PAK-Konzentrationen (4) gegenübergestellt werden, kann das Volumen des Bodens berechnet werden, das durch diese Emissionsmenge jährlich bis zu einem bestimmten Grenzwert verschmutzt wird (5). Dieses belastete Bodenvolumen bildet die Basis der jährlichen Sanierungskosten. Um die jährlichen Sanierungskosten zu berechnen, muss dieses verschmutzte Bodenvolumen daher mit einem Kostensatz für den Aushub, den Ersatz und die Entsorgung (6) des belasteten Bodenvolumens multipliziert werden. Diese Berechnungen werden für die wichtigsten Schwermetalle (Zink, Cadmium, Blei, Kupfer) sowie PAK vorgenommen. Die Schadenskosten (7) für die einzelnen Schadstoffe werden jedoch nicht addiert, weil angenommen wird, dass die entsprechenden Belastungen auf denselben Bodenflächen anfallen. Dies ist insofern realistisch, als dass z.B. beim Strassenverkehr die Schwermetalle zum allergrössten Teil aus dem Abrieb von Reifen und Strassenbelag stammen und damit die verschiedenen Stoffe in etwa an denselben Stellen auftreten. Somit muss ein Boden nur einmal saniert werden, auch wenn er unterschiedliche Schadstoffe enthält. Am Ende ist für die Kostenberechnung also jener Stoff relevant, der jährlich das grösste Bodenvolumen bis zur kritischen Konzentration (Grenzwert) belastet und damit die grössten externen Kosten verursacht.

13.3 Mengengerüst

13.3.1 Emissionen von Schwermetallen und PAK

Für die jährlichen Emissionsmengen von Schwermetallen (Zink (Zn), Cadmium (Cd), Kupfer (Cu), Blei (Pb)) und PAK aus dem Strassen- und Schienenverkehr gibt es verschiedene Datengrundlagen: Für den Strassenverkehr wurden – soweit vorhanden – die Emissionsfaktoren aus dem Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA) sowie die Fahrleistungen differenziert nach Fahrzeugkategorie und Antriebskategorie, wie im Anhang Kapitel 20.2 beschrieben, verwendet. Ergänzend werden Emissionsfaktoren für Kupfer und PAK aus der Ökobilanz-Datenbank Ecoinvent (v.3.10) beigezogen. Für den Schienenverkehr werden ebenfalls Emissionsfaktoren aus der Ecoinvent-Datenbank und aus Studien des deutschen Eisenbahn-Bundesamtes³²³ verwendet sowie jährliche Schwermetallemissionen aus der Studie «Diffuse release of environmental hazards by railways» der EAWAG.³²⁴ Die Werte der EAWAG Studie waren schon Grundlage für die Aktualisierung der externen Kosten im Jahr 2008³²⁵. Die Werte aus Ecoinvent bildeten bereits für die Berechnung der Kosten des Jahres 2000 die Grundlage.

³²³ Eisenbahn Bundesamt, EBA (2006)

³²⁴ Burkhardt; Rossi; Boller (2008)

³²⁵

Ecoplan; INFRAS (2008)

Wie bereits in den Studien für die Berechnungen der externen Kosten des Verkehrs für die Jahre 2010³²⁶ und 2015³²⁷ wurde auch in der aktuellen Studie auf eine Berechnung der Kosten für den Luft- und Schiffsverkehr aus Relevanzgründen verzichtet.

Abbildung 13-2: Jährliche Emissionsmengen von Schwermetallen und PAK in Böden durch den Strassen- und Schienenverkehr

Verkehrsträger		Luftschadstoff [t/a]				
		Cd	Cu	PAK	Pb	Zn
Strassenverkehr	total	0.0826	0.2777	0.0897	0.1306	304.0255
	Personenverkehr	0.0565	0.1760	0.0577	0.0982	159.8839
	Güterverkehr	0.0260	0.1017	0.0320	0.0357	144.1715
Schienenverkehr	total	0.0026	34.8450	0.0097	0.1995	25.8823
	Personenverkehr	0.0023	30.7500	0.0066	0.1374	22.8406
	Güterverkehr	0.0003	4.0950	0.0031	0.0621	3.0417
Gesamt		0.09	35.12	0.10	0.33	329.94

13.3.2 Grenzwerte

Die verschiedenen Grenzwerte (Richt-, Prüf- und Sanierungswerte) von Schwermetallen und PAK in Böden sind in der eidgenössischen Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) festgehalten und in der Abbildung 13-3 dargestellt und haben sich seit 2000 nicht verändert.

Abbildung 13-3: Grenzwerte von Schwermetallen und PAK in Böden [mg/kg]

Schadstoff	Richtwert	Prüfwert*	Sanierungswert**
Cadmium (Cd)	0.8	2	30
Zink (Zn)	150	300	2'000
Blei (Pb)	50	200	2'000
Kupfer (Cu)	40	150	1'000
PAK (Summe der 16 Leitsubstanzen)	1	20	100

Die Werte geben die Totalgehalte der Schadstoffe an. Die Werte sind in mg/kg Trockensubstanz (für Böden bis 15% Humus) bzw. in mg/dm³ Boden (für Böden über 15% Humus) angegeben.

* Werte für den Nahrungs- bzw. Futterpflanzenanbau

** Werte für die Landwirtschaft

Quelle: Alle Grenzwerte stammen aus der Eidgenössischen Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo).

Die entscheidende Frage ist, welcher der Grenzwerte (Richt-, Prüf- oder Sanierungswert) für die Berechnung des belasteten Bodenvolumens verwendet wird. Aus naturwissenschaftlicher Sicht

³²⁶ Ecoplan; INFRAS (2014)

³²⁷ INFRAS; Ecoplan (2019)

müsste es der Richtwert sein. Denn ab einer Schadstoffbelastung des Bodens über dem Richtwert muss mit Schäden an der Bodenökologie gerechnet werden. Praktisch dürfte aber der Prüfwert relevanter sein, weil ab diesem Wert die Bodenfruchtbarkeit eingeschränkt ist und solcher Boden eine potenzielle Gefährdung für Pflanzen, Tiere sowie allenfalls auch Menschen darstellt. In der Praxis werden Böden in der Regel erst bei einer Belastung oberhalb des Sanierungswertes effektiv saniert. Doch in dieser Studie sollen nicht die effektiven Sanierungskosten berechnet werden, sondern die gesamten Schadenskosten, welche durch die Belastung von Böden mit Schadstoffen aus dem Verkehr entstehen. Und weil die Schädigung der Böden bereits ab Erreichen der Richtwerte, spätestens oberhalb der Prüfwerte vorliegt, sind diese Werte für die Berechnung der Schadenskosten relevant. Deshalb werden für die Kostenberechnung auch in dieser Studie wieder die entsprechenden Prüfwerte verwendet.

13.4 Wertgerüst

In der Studie für die Berechnung der externen Kosten des Verkehrs im Jahr 2015 wurde für die Berechnung der Bodenschäden der Kostensatz anhand Experteneinschätzungen überarbeitet und unterschiedliche Deponietypen je nach Verschmutzungsgrad in die Berechnung mit einbezogen. In Abbildung 13-4 wird die detaillierte Zusammensetzung des Kostensatze aufgezeigt. Abklärungen mit Fachexperten und -expertinnen³²⁸ ergaben, dass dieser Ansatz weiterhin eine aktuelle Schätzung der Sanierungskosten darstellt und darum weiterhin verwendet werden kann. Die einzelnen Teilkosten basieren auf Auskünften von Fachexperten und Fachexpertinnen und entsprechen dem aktuellen Preisniveau.

Abbildung 13-4: Deponierungskosten je Deponietyp für das Jahr 2021

Deponietyp	Anteil	Kosten je Tonne (CHF)	Kosten je m ³ (CHF)
Inertstoff	0.75	70	112
Reaktorstoff	0.2	145	232
Sondermüll	0.05	275	440

13.5 Vorgehen bei Differenzierungen

13.5.1 Differenzierung nach Antriebsart

Die Differenzierung nach Antriebsart für den Strassenverkehr wird gemäss der Beschreibung im Kapitel 20.1.6 und Kapitel 20.2.1 vorgenommen. Die Differenzierung nach Antriebsart für den Strassenverkehr wird über spezifische Emissionsfaktoren je Fahrzeugkategorie und Kategorie der Antriebsart und anhand der jeweiligen Anteile an der Fahrleistung berechnet.

³²⁸ S. Olgiati, Bereichsleiter, Eberhard AG Altlasten

13.5.2 Differenzierung nach Kantonen

Die Differenzierung nach Kantonen für den Strassen- und Schienenverkehr wird wie im Kapitel 20.1.5 beschrieben berechnet. Die kantonale Differenzierung im Strassen- und Schienenverkehr wird anhand der Anteile an der Fahrleistung je Kanton vorgenommen.

13.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

Die vorliegende Berechnungsmethodik beruht auf der Annahme, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Fahrleistung, den Schwermetall- und PAK-Emissionen und den daraus resultierenden Bodenschäden besteht. Somit entsprechen die hier berechneten Durchschnittskosten für Bodenschäden auch den Grenzkosten.

13.7 Ergebnisse

13.7.1 Externe Kosten

a) Überblick Gesamtverkehr

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die gesamten externen und sozialen Kosten infolge Bodenschäden durch toxische Stoffe im Jahr 2021 nach Verkehrsträgern. Bei dieser Kostenkategorie entsprechen die externen den sozialen Kosten, da es keinen Internalisierungsbeitrag gibt. Zudem sind die externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende und aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr genau gleich hoch.

Im Jahr 2021 betrugen die Kosten durch Bodenschäden des Strassen- und Schienenverkehrs **190 Mio. CHF**. Davon war der Strassenverkehr für rund 81% der Kosten (154 Mio. CHF) verantwortlich, der Schienenverkehr für rund 19% (35 Mio. CHF). Der Personenverkehr verursachte 59% dieser Bodenschäden (im Strassenverkehr 53%, im Schienenverkehr 88%).

Abbildung 13-5: Externe Kosten durch Bodenschäden 2021

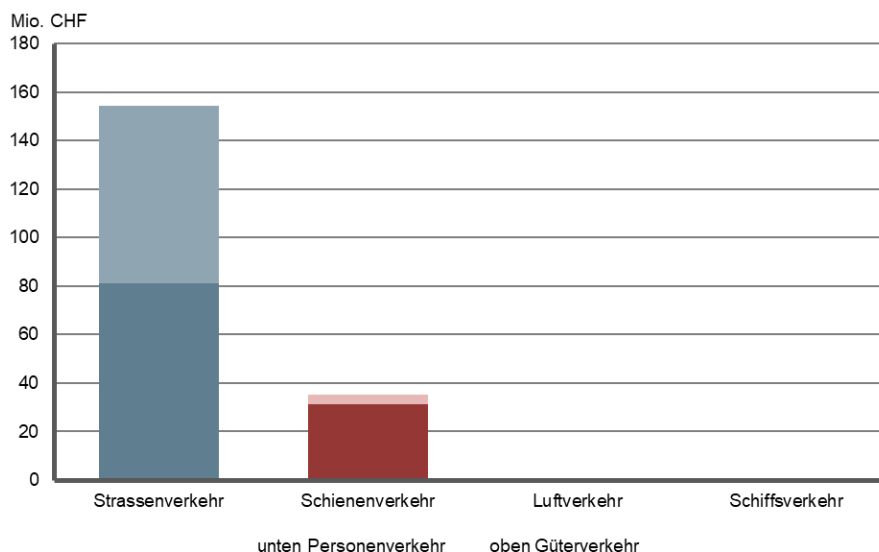


Abbildung 13-6: Überblick über die externen Kosten infolge Bodenschäden für das Jahr 2021

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr		81.2	73.2	154.4	81.4%
Schienenverkehr		31.2	4.2	35.4	18.6%
Luftverkehr		-	-	-	0.0%
Schiffsverkehr		-	-	-	0.0%
Total		112.4	77.4	189.8	100.0%
in % des Totals		59.2%	40.8%	100.0%	

b) Strassenverkehr

Der Leitschadstoff, der zum grössten belasteten Bodenvolumen durch den Strassenverkehr führt, ist Zink. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Aufteilung der Bodenschäden des Strassenverkehrs auf die einzelnen Fahrzeugkategorien. Die Aufteilung der gesamthaft 154 Mio. CHF sieht wie folgt aus: Mit 43.5% wird knapp die Hälfte der Kosten (67 Mio. CHF) des Strassenverkehrs durch die Personenwagen verursacht. Der öffentliche Strassenverkehr, sprich Linienbusse und Trolleybusse, ist verantwortlich für rund 5.6% der Kosten (9 Mio. CHF) und der Strassengüterverkehr trägt 47% (73 Mio. CHF) bei. Zinkemissionen im Strassenverkehr werden hauptsächlich durch den Abrieb von Bremsen und Reifen verursacht. Die höheren Emissionsfaktoren von Lastwagen und Sattelschleppern führen dazu, dass im Strassenverkehr Personenwagen etwa ähnlich hohe Emissionen und damit externe Kosten durch Bodenschäden verursachen wie der Strassengüterverkehr.

Abbildung 13-7: Externe Kosten durch Bodenschäden 2021 nach Fahrzeugkategorien

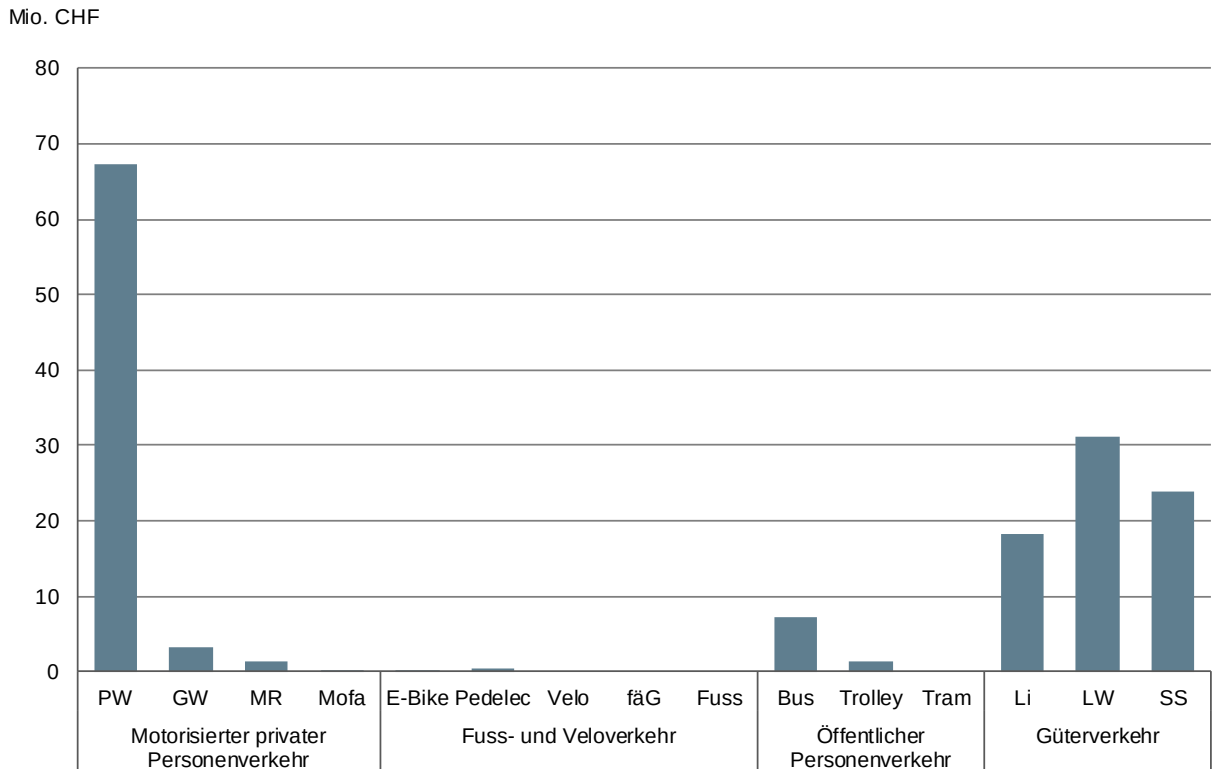


Abbildung 13-8: Externe Kosten durch Bodenschäden des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien

in Mio. CHF	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	
Bodenschäden	67.2	3.3	1.4	0.1	0.1	0.4	-	-	-	7.3	1.4	-	18.1	31.1	24.0	154.4
Total	67.2	3.3	1.4	0.1	0.1	0.4	-	-	-	7.3	1.4	-	18.1	31.1	24.0	154.4
in % des Gesamttotals	43.5%	2.2%	0.9%	0.0%	0.1%	0.3%	0.0%	0.0%	0.0%	4.7%	0.9%	0.0%	11.7%	20.1%	15.5%	100.0%
Total Teilbereiche	72.0				0.5					8.7			73.2			154.4
in % des Gesamttotals	46.6%				0.3%					5.6%			47.4%			100.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

«0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «-» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt auch für alle folgenden Abbildungen.

Abbildung 13-9 zeigt die Aufteilung der Kosten durch Bodenschäden für den Strassenverkehr differenziert nach den einzelnen Fahrzeugkategorien und Antriebsarten. 97% der Kosten (150 Mio. CHF) des Strassenverkehrs werden durch fossile Fahrzeuge verursacht. Elektrofahrzeuge sind für 2.0% der Kosten verantwortlich.

Abbildung 13-9: Externe Kosten durch Bodenschäden des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien und Antriebsarten

in Mio. CHF	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li		LW	SS
Fossil	65.8	3.3	1.4	0.1	-	-	-	-	-	7.0	-	-	18.0	30.9	23.8	150.3
Elektrisch	0.8	0.0	0.0	-	0.1	0.4	-	-	-	0.1	1.4	-	0.1	0.1	0.0	3.0
Rest	0.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	-	-	0.1	0.1	0.1	1.1
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	67.2	3.3	1.4	0.1	0.1	0.4	-	-	-	7.3	1.4	-	18.1	31.1	24.0	154.4
Anteil Fossil	97.8%	99.9%	99.4%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	96.4%	0.0%	0.0%	99.0%	99.4%	99.4%	97.3%
Anteil Elektrisch	1.1%	0.1%	0.6%	0.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.6%	100.0%	0.0%	0.7%	0.2%	0.2%	2.0%
Anteil Rest	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.4%	0.4%	0.7%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Abbildung 13-10 zeigt die Aufteilung der externen Kosten durch Biodiversitätsverluste nach Kantonen und Verkehrsmitteln. Im Kanton Zürich fallen mit einem Anteil von 14.8% die höchsten Kosten an. Darauf folgt der Kanton Bern mit 11.9% und der Kanton Waadt mit 10% der Gesamtkosten.

Abbildung 13-10: Externe Kosten durch Bodenschäden des Strassenverkehrs 2021 nach Fahrzeugkategorien und Kantonen

in Mio. CHF	Personenverkehr									Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr						
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
Zürich	10.0	0.6	0.2	0.0	0.0	0.1	-	-	-	1.4	-	2.6	4.5	3.5	22.9
Bern	8.1	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.9	-	2.2	3.6	2.8	18.3
Luzern	3.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.5	-	0.9	1.7	1.3	8.2
Uri	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.1	-	0.1	0.7	0.5	2.0
Schwyz	1.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	-	0.4	0.5	0.4	3.1
Obwalden	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	-	0.1	0.1	0.1	0.6
Nidwalden	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	-	0.1	0.3	0.2	1.2
Glarus	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	-	0.2	0.2	0.2	1.0
Zug	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	-	0.2	0.3	0.2	2.0
Freiburg	2.6	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	-	0.6	1.2	0.9	5.8
Solothurn	2.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.3	-	0.6	1.8	1.4	6.5
Basel-Stadt	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	-	0.1	0.3	0.2	1.6
Basel-Landschaft	2.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.3	-	0.6	1.4	1.1	5.7
Schaffhausen	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.1	-	0.1	0.2	0.1	1.0
Appenzell A.Rh.	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	-	0.1	0.0	0.0	0.5
Appenzell I.Rh.	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.1
St. Gallen	5.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.6	-	1.6	2.4	1.8	11.9
Graubünden	1.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.3	-	0.6	1.0	0.7	4.7
Aargau	6.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.7	-	1.7	3.5	2.7	15.2
Thurgau	2.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	-	0.5	0.8	0.7	4.5
Tessin	3.9	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.4	-	0.9	2.1	1.6	9.1
Waadt	7.5	0.3	0.2	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.6	-	2.0	2.7	2.1	15.4
Wallis	2.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.4	-	0.7	0.9	0.7	5.2
Neuenburg	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.2	-	0.3	0.3	0.2	2.3
Genf	2.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.7	-	0.6	0.4	0.3	4.5
Jura	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	-	0.1	-	0.1	0.2	0.1	1.2
Total	67.2	3.3	1.4	0.1	0.1	0.4	-	-	-	8.7	-	18.1	31.1	24.0	154.4

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

c) Schienenverkehr

Der Leitschadstoff, der zum grössten belasteten Bodenvolumen durch den Schienengüterverkehr führt, ist Kupfer. Die Emissionen entstehen hauptsächlich durch Abrieb der Oberleitungen. Von den insgesamt 35 Mio. CHF fallen 31 Mio. CHF (88%) auf den Personenverkehr und die übrigen 4 Mio. CHF (12%) auf den Güterverkehr.

Abbildung 13-11: Externe Kosten durch Bodenschäden des Schienenverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr

	in Mio. CHF	Personen-verkehr	Güter-verkehr	Total
Bodenschäden		31.2	4.2	35.4
Total		31.2	4.2	35.4

Abbildung 13-12 zeigt die Aufteilung der externen Kosten durch Bodenschäden nach Kantonen sowie Verkehrsart. Der Kanton Bern weist mit 16.6% der Gesamtkosten den höchsten Anteil auf, gefolgt von Zürich mit 14.5%. Die Kantone Waadt (9.2%) und Aargau (9.6%) folgen mit Anteilen knapp unter 10% der Gesamtkosten.

Abbildung 13-12: Externe Kosten durch Bodenschäden des Schienenverkehrs 2021 nach Personen- und Güterverkehr und Kantonen

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich	4.9	0.3	5.1
Bern	5.2	0.7	5.9
Luzern	1.3	0.0	1.3
Uri	0.3	0.1	0.5
Schwyz	0.9	0.2	1.0
Obwalden	0.2	0.0	0.2
Nidwalden	0.1	0.0	0.1
Glarus	0.2	0.0	0.3
Zug	0.4	0.0	0.4
Freiburg	1.2	0.0	1.2
Solothurn	1.0	0.3	1.3
Basel-Stadt	0.2	0.0	0.2
Basel-Landschaft	0.9	0.2	1.0
Schaffhausen	0.3	0.0	0.3
Appenzell A.Rh.	0.2	0.0	0.2
Appenzell I.Rh.	0.1	-	0.1
St. Gallen	1.8	0.1	1.9
Graubünden	1.5	0.2	1.7
Aargau	2.6	0.8	3.4
Thurgau	1.1	0.1	1.1
Tessin	1.1	0.4	1.5
Waadt	3.0	0.3	3.3
Wallis	1.6	0.2	1.8
Neuenburg	0.6	0.1	0.7
Genf	0.4	0.0	0.4
Jura	0.3	0.0	0.3
Total	31.2	4.2	35.4

13.8 Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse ist für diesen Kostenbereich nicht vorgesehen, da der Anteil der externen Kosten durch Bodenschäden an den Gesamtkosten mit 1.1% unter 10% liegt. In Bezug auf die Frage, in welcher Bandbreite die externen Kosten des Verkehrs aufgrund von Unsicherheiten schwanken, ist dieser Kostenbereich von untergeordneter Bedeutung.

13.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen grafisch und tabellarisch den Vergleich der externen Kosten durch Bodenschäden für das Jahr 2021 mit den Ergebnissen der Berechnungen ermittelt mit dem früheren Tool. Der Vergleich zeigt den Effekt der neuen Datengrundlagen und Anpassungen in der Berechnungsmethodik.

Insgesamt führt die neue Berechnung der externen Kosten durch Bodenschäden zu einer Steigerung um 8%. Hauptgrund dieser Zunahme liegt in der Aktualisierung der Kostensätze für die Bodensanierung. Hinzu kommt, dass die Schwermetallemissionen des Strassenverkehrs basierend auf aktualisierten Emissionsfaktoren berechnet wurden. Dies führte zu einer Reduktion des belasteten Bodenvolumens und damit zu einer weniger starken Zunahme der externen Kosten im Strassen- als im Schienenverkehr.

Abbildung 13-13: Vergleich der Berechnungen der externen Kosten infolge Bodenschäden basierend auf der ursprünglichen und überarbeiteten Berechnungsmethodik 2021

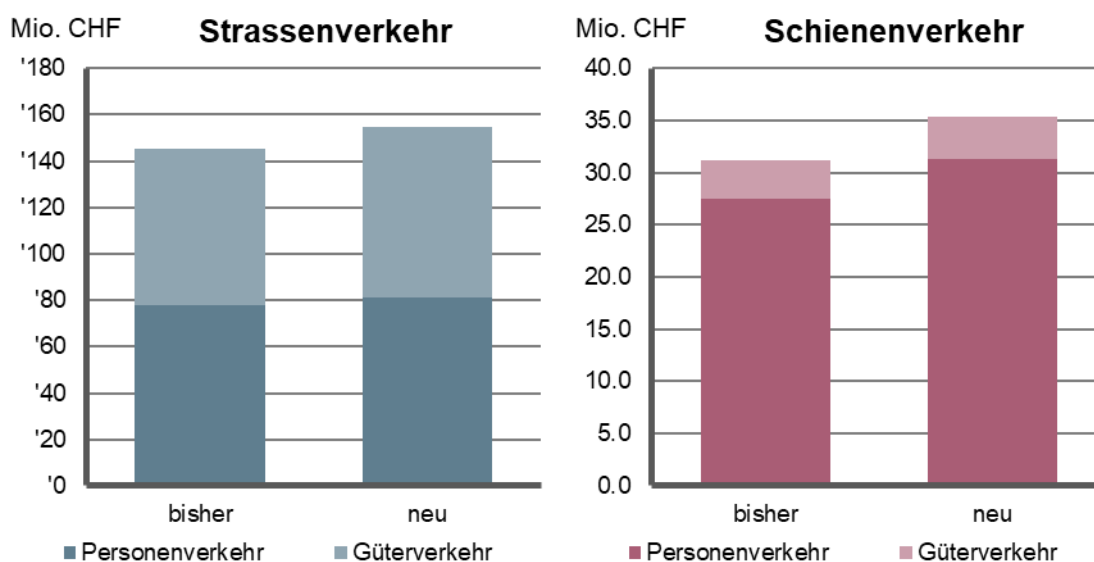


Abbildung 13-14: Überblick und Vergleich der Berechnungen für die externen Kosten durch Bodenschäden basierend auf den alten und den neuen Datengrundlagen sowie Methodik

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	77.96	67.19	145.1
Schienenverkehr	27.5	3.7	31.2
Luftverkehr	-	-	-
Schiffsverkehr	-	-	-
Total	105.5	70.9	176.4
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	81.2	73.2	154.44
Schienenverkehr	31.2	4.2	35.40
Luftverkehr	-	-	-
Schiffsverkehr	-	-	-
Total	112.4	77.4	189.8
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	4.2%	9.0%	6.4%
Schienenverkehr	13.4%	13.4%	13.4%
Luftverkehr	0.0%	0.0%	0.0%
Schiffsverkehr	0.0%	0.0%	0.0%
Total	6.6%	9.2%	7.6%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	3.2	6.1	9.3
Schienenverkehr	3.7	0.5	4.2
Luftverkehr	-	-	-
Schiffsverkehr	-	-	-
Total	6.9	6.5	13.5

14 Unfälle

14.1 Berechnungsgegenstand

Unfälle sind eine gesellschaftlich unerwünschte Folgeerscheinung des Verkehrs. Sie führen zu Kosten wie beispielsweise Personen- und Sachschäden, aber auch zu Kosten im Zusammenhang mit der polizeilichen und gerichtlichen Bewältigung.

Kosten, die durch den Verursacher des Unfalls getragen werden, sind privat und werden bei Entscheidungen zur Verkehrsteilnahme berücksichtigt. Alle Kosten, die nach Abzug der von den Verursachern geleisteten Entschädigungszahlungen bei nicht-verursachenden oder unbeteiligten Dritten verbleiben und damit von Sozialversicherungen, vom Staat oder von der Allgemeinheit getragen werden, sind extern. Diese externen Kosten werden aufgrund des vorwiegend individuellen Risikoverhaltens der Verkehrsteilnehmenden bei der Entscheidung zur Verkehrsteilnahme und bei der Festlegung des eigenen Fahrverhaltens zu wenig oder nicht berücksichtigt.

Zur Berechnung der externen Unfallkosten für die Verkehrsträger Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr wird ein Top-Down Ansatz³²⁹ gewählt: Die Berechnung stützt sich auf nationale Unfallstatistiken, Kostensätze zu sozialen Durchschnittskosten pro Unfall- bzw. Unfallopfer sowie die anschliessende Ermittlung von externen Kosten. Transferleistungen zwischen Unfallverursacher, Nicht-Verursacher und Sozialversicherungen werden gemäss Konzeption des nationalen Versicherungssystems modelliert. Die bei einem Unfall entstandenen Kosten werden dabei vollständig der verursachenden Fahrzeugkategorie zugeordnet, was dem **Verursacherprinzip** entspricht. Am Schluss werden die Durchschnittskosten pro Personen- oder Fahrzeugkilometer nach verursachender Fahrzeugkategorie ausgewiesen.

Im Grundsatz werden alle Verkehrsunfälle in der Schweiz berücksichtigt (**Territorialitätsprinzip**), wobei im internationalen Luft- und Schiffsverkehr das Halbstreckenprinzip angewendet wird (vgl. Kapitel 2.4.1).

14.1.1 Unfalldefinition und Abgrenzung

Als Unfall wird im Grundsatz gemäss Art. 4 ATSG³³⁰ eine «plötzliche, nicht beabsichtigte schädigende Einwirkung eines ungewöhnlichen äusseren Faktors auf den menschlichen Körper verstanden, die eine Beeinträchtigung der körperlichen, geistigen oder psychischen Gesundheit oder den Tod zur Folge hat».

Für den Verkehrsträger **Strasse** wird die Definition der Strassenverkehrsunfälle des ASTRA³³¹ verwendet: *Ein unvorhergesehenes bzw. nicht beabsichtigtes Ereignis auf öffentlichen Strassen*

³²⁹ Beim alternativen Bottom-Up Ansatz werden die marginalen Kosten über eine Schätzung des Unfallrisikos über vom Verkehrsaufkommen abhängige Unfallraten ermittelt.

³³⁰ Bundesgesetz über den Allgemeinen Teil des Sozialversicherungsrechts (ATSG).

³³¹ Bundesamt für Strassen ASTRA (2019)

und Plätzen, das in ursächlichem Zusammenhang mit dem Verkehr auf diesen Infrastrukturen und seinen Gefahren steht und einen Personenschaden und/oder Sachschaden zur Folge hat.

Dabei gelten folgende Abgrenzungen:

- Als öffentliche Strassen und Plätze im Sinne dieser Definition gelten 1.- bis 3.-Klasse-Strassen,³³² Fuss- und Velowege innerhalb des Siedlungsgebiets sowie alle Autobahnen.
- Auf diesen Infrastrukturen werden alle Unfälle einbezogen, unabhängig vom Alter und Zustand der Verursacher oder Unfallopfer, von der Anzahl der Beteiligten, vom Unterwegszweck und von der Verkehrsart.
- Ausgeschlossen sind mit Absicht herbeigeführte Unfälle, insbesondere Suizide, sowie Unfälle mit Tötungs- oder Verletzungsabsicht gegenüber Dritten

Einen Spezialfall stellen Alleinunfälle von Fussgängerinnen und Fussgängern dar. Diese sind nicht in der Definition des ASTRA enthalten, weil kein Fahrzeug beteiligt ist. Sie werden mit der *Kategorie* «Unfälle in Sport und Freizeit auf öffentlichen Strassen und Plätzen» (abgekürzt: Sport und Freizeit) in der vorliegenden Studie dennoch quantifiziert. Grund dafür ist die Gleichbehandlung aller Nutzer der Verkehrsinfrastruktur, insbesondere weil für den Fussverkehr auch die Nutzen der körperlichen Aktivität quantifiziert werden (vgl. Kapitel 15). Diese Unfälle finden zudem mehrheitlich auf der oben abgegrenzten Strassenverkehrsinfrastruktur statt und ein Ausschluss aufgrund des Verkehrszwecks ist nicht möglich. Neben Fussgängern umfasst diese Kategorie auch Unfälle in Sport und Freizeit mit Velo und fäG. Bei der zur Quantifizierung der Kategorie «Sport und Freizeit» verwendeten Datenquelle (vgl. Kapitel 14.3.1d) lässt sich nicht ausschliessen, dass sie auch Unfälle enthält, die nicht als Verkehrsunfälle verstanden werden. Es kann sich z.B. um einen altersbedingten Sturz handeln, der sich genauso gut ein paar Meter weiter ausserhalb der Verkehrsinfrastruktur ereignet haben könnte. Aufgrund dieser Abgrenzungs- und Datenfragen werden die Unfälle in Sport und Freizeit jeweils separat berechnet und ausgewiesen.

Für den **Schienen-, Schiffs- und Luftverkehr** gilt grundsätzlich eine analoge Definition. Jedoch gelten für diese jeweils spezifische Abgrenzungen:

- **Schienenverkehr:** Einbezogen werden: Unfälle auf oder entlang der Adhäsions-Bahngleise, in Bahnhöfen und in Schienenfahrzeugen, mit Beteiligung mindestens eines sich in Bewegung befindlichen Schienenfahrzeugs. Unfälle auf Bahnübergängen werden dem jeweiligen Verkehrsmittel des Strassenverkehrs zugeordnet. Verletzungen oder Todesfälle von Passagieren aufgrund von Krankheit (z.B. Herz-Kreislauf-Kollaps) oder übermässigem Alkohol- und Drogenkonsum sowie Suizide werden ausgeschlossen. Die im Schienenverkehr von «Dritten» verursachten Unfälle werden in den sozialen Kosten ausgewiesen, jedoch nicht bei den externen Kosten, weil es sich bei den Opfern in der Regel nicht um Verkehrsteilnehmende, sondern eben um Dritte handelt. Dies sind Drittpersonen, die sich unerlaubterweise an einem für Reisende (Passagiere) oder Bedienstete nicht öffentlich zugänglichen Ort aufhalten.
- **Luftverkehr:** Einbezogen werden: Unfälle auf Landes- und Regionalflughäfen, Heliports sowie in der Luft, mit Beteiligung mindestens eines Luftfahrzeugs (Flugzeug und Helikopter), das in der Schweiz startet oder landet.

³³² Zur Definition vgl. Fussnote 23.

- **Schiffsverkehr:** Einbezogen werden: Unfälle auf öffentlichen Gewässern (schiffbare Seen und Flüsse) inkl. Häfen und Anlegestellen mit Beteiligung mindestens eines sich in Bewegung befindlichen Schiffs, mit Start und/oder Ziel in der Schweiz.

14.1.2 Eingenommene Sichtweisen

Für die Verkehrsunfälle werden zunächst die gesamten entstehenden sozialen (volkswirtschaftlichen) Kosten ermittelt. Dazu wird die Gesamtzahl der nach Verletzungsschwere differenzierten Unfallopfer nach verursachender Fahrzeugkategorie oder Verkehrsart mit einem spezifischen Kostensatz multipliziert.

In einem zweiten Schritt werden die externen Kosten bestimmt. Welcher Anteil der sozialen Kosten als extern betrachtet wird, hängt von der eingenommenen Sichtweise bzw. der Abgrenzung des Systems «Verkehr» ab:

- In der Sicht «**Verkehrsteilnehmende**» werden jene Kosten als extern betrachtet, die nach Berücksichtigung aller Transfers nicht vom Unfallverursacher getragen werden, die also bei der Festlegung und Beurteilung des eigenen Fahrverhaltens nicht adäquat berücksichtigt werden. Träger der externen Kosten sind dabei nicht-verursachende Unfallopfer, Sozialversicherungen oder die von der Allgemeinheit finanzierte öffentliche Hand (z.B. in Form erhöhter Spitaldefizite aus der Behandlung von Unfallopfern).
- In der Sicht «**Verkehrsart Schwerverkehr**» werden Kosten als extern betrachtet, die vom Schwerverkehr verursacht wurden, aber nicht vom Schwerverkehr getragen werden. Hier gelten alle Schäden an Fahrzeugkategorien ausserhalb der Verkehrsart Schwerverkehr als extern, soweit sie nicht vom unfallverursachenden Schwerverkehr getragen werden.

14.1.3 Territorialitätsprinzip

Bei der Berechnung wird prinzipiell gemäss den methodischen Abgrenzungen in Kapitel 2.4.1 vom **Territorialitätsprinzip** ausgegangen. Bei einigen Verkehrsarten und Unfallfolgen ist dies aufgrund der Datengrundlagen jedoch nicht möglich – vgl. folgende Abbildung.

Abbildung 14-1: Umsetzung des Territorialitätsprinzips und Ausnahmen

	Todesfälle	Verletzte
Strassenverkehr	Territorialitätsprinzip	Inländerprinzip ³³³
Sport und Freizeit im Fuss- und Veloverkehr		Inländerprinzip
Schienenverkehr	Territorialitätsprinzip	
Luftverkehr	Halbstreckenprinzip im Linien- und Charterverkehr ³³⁴ (langjährige Erwartungswerte)	
	Territorialitätsprinzip in der General Aviation (inkl. Helikopter)	
Schiffsverkehr	Halbstreckenprinzip (langjährige Erwartungswerte)	

14.1.4 Verursacherprinzip

Die Zuweisung der sozialen und externen Kosten an die verschiedenen Gruppen von Verkehrsteilnehmenden kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Gemäss Schröder et al. (2023) werden in der Literatur hauptsächlich drei verschiedene Ansätze angewendet: Das «Verursacherprinzip», das «Monitoringprinzip»³³⁵ sowie das Prinzip des «Schadenspotenzials»³³⁶.

Die Berechnung der externen Unfallkosten in der Schweiz stützt sich grundsätzlich auf das **Verursacherprinzip**. Diesem Ansatz folgend werden die Unfallfolgen jener Fahrzeugkategorie belastet, welche für den Unfall (mutmasslich) verantwortlich ist. Es spielt dabei keine Rolle, bei welcher Fahrzeugkategorie die Unfallfolgen (Sachschäden, Opfer) tatsächlich anfallen.³³⁷

³³³ Das Gesamtunfallgeschehen bei Verletzten im Strassenverkehr umfasst in der Schweiz wohnhafte Personen, unabhängig davon, ob die Unfälle im In- oder Ausland stattfanden. Dies liegt daran, dass nur für diese Abgrenzung für die Schweiz verwendbare Datengrundlagen vorliegen. Die Feinverteilung auf die Fahrzeugkategorien erfolgt auf Basis von Daten zu den polizeilich registrierten Unfällen im Territorialitätsprinzip.

³³⁴ Das Halbstreckenprinzip im Linien- und Charterverkehr kann aus Datengründen nicht mit der tatsächlichen Anzahl an Unfällen umgesetzt bzw. berechnet werden, sondern nur mit der zu erwartenden Anzahl Unfälle (Erwartungswert basierend auf Unfallhäufigkeit pro Abflug während 10 Jahren in den EASA-Ländern (European Aviation Safety Agency – EU plus Schweiz, Norwegen und Island), die gemäss BAZL einen ähnlichen Sicherheitsstandard aufweisen wie die Schweiz, da die Schweiz die Standards der EASA anwendet.

³³⁵ Beim Monitoringprinzip werden die Unfallopfer jener Fahrzeugkategorie, mit der sie zum Zeitpunkt des Unfalls unterwegs waren, zugeteilt. Das Monitoringprinzip eignet sich für Aussagen dazu, welche Fahrzeugkategorie am meisten Schäden *erleidet*. Das Ziel ist dabei die Gestaltung von Massnahmen zum Schutz dieser «gefährdeten» Verkehrsteilnehmenden bzw. die Unfallprävention.

³³⁶ Das Prinzip des Schadenspotenzials (engl. «damage potential approach») basiert gemäss Schröder et al. (2023) auf der Annahme, dass die Nutzung schwererer und grösserer Fahrzeuge ein grösseres Risiko für schwere Unfallfolgen in sich birgt, insbesondere bei Kollisionen mit ungeschützten Verkehrsteilnehmenden. Die Kosten werden bei Kollisionen in Abhängigkeit von der fahrzeugspezifischen kinetischen Energie auf die beteiligten Fahrzeuge verteilt. Dieser Ansatz eignet sich besonders, wenn keine Daten zum tatsächlichen Verursacher vorliegen. Mit der Unfallstatistik des ASTRA steht in der Schweiz jedoch eine gute Grundlage zur Identifizierung des mutmasslichen Verursachers zur Verfügung. Die Zuordnung gemäss Schadenpotenzial erlaubt es zudem, die Gefahr ausgehend von einer Fahrzeugkategorie einzuschätzen und Massnahmen zu deren Eindämmung zu entwickeln.

³³⁷ Das verwendete Verursacherprinzip für die Zuordnung der Unfälle bzw. Unfallkosten deckt sich grundsätzlich mit der rechtlichen Grundordnung im Strassenverkehr, wird aber durch die verschuldensunabhängige Gefährdungshaftung für Motorfahrzeuge zugunsten der Geschädigten durchbrochen. Weil im Rahmen der Berechnung sämtliche Motorfahrzeug-Haftpflichtleistungen als Internalisierungsbeiträge berücksichtigt werden (als Direktzahlungen und Regresszahlungen), hat diese Abweichung keinen Einfluss auf die Gesamtsumme der ausgewiesenen externen Kosten.

Der Ausweis der Kosten nach dem Verursacherprinzip ermöglicht Aussagen dazu, wer die grössten Schäden verursacht, mit dem Ziel der Gestaltung von Massnahmen zur Internalisierung dieser Schäden auf die Verursacher.

14.1.5 Berücksichtigte Unfallfolgekosten / Kostenbestandteile

Es werden folgende Kostenbestandteile berechnet:

- Personenschäden (medizinische Heilungskosten, Produktionsausfall, Wiederbesetzungskosten und immaterielle Kosten, administrative Kosten der Personenversicherungen)
- Sachschäden (inkl. administrative Kosten)
- Polizei- und Rechtsfolgekosten (inkl. administrative Kosten)

Die verschiedenen Kostenfolgen bei Personenschäden sind in Anhang A (Kapitel 20.5) im Detail beschrieben. Spezifisch für den Unfallbereich sind zusätzlich folgende Kostenfolgen zu erläutern:

- Die **Sachschäden, Polizei- und Rechtsfolgekosten** umfassen die Kosten von Schäden an Fahrzeugen, Immobilien, Verkehrsinfrastruktur und transportierten Gütern bzw. die Kosten der Polizei (Personal-, Material- und Fahrzeugkosten für Unfallaufnahme, Verkehrsregelung, Rapporte, Zeugenbefragungen etc.) und allfälliger Rechtstreitigkeiten (Gerichtskosten, Anwaltskosten, Kosten für Expertisen).
- Zu den **administrativen Kosten** der Versicherungen bei Personenschäden und Sachschäden zählen sämtliche Kosten für die Abwicklung der Unfälle (Prüfung des Versicherungsanspruchs, Auszahlung etc.).

Box: Nicht berücksichtigte Kosten

Die berücksichtigten Personen- und Sachschäden sowie Polizei- und Rechtsfolgekosten können als **umfassendes** Abbild der Kosten durch Unfälle betrachtet werden, auch wenn einige unbedeutende Kostenbestandteile **nicht berücksichtigt** werden. Dazu zählen insbesondere die folgenden Bereiche:

- Kosten durch gesundheitliche Spätschäden: Verletzungen nach Unfallereignissen können zu gesundheitlichen Spätschäden führen, die erst viele Jahre nach dem Unfallereignis auftreten. Diese Kosten dürften aber vergleichsweise gering sein.³³⁸
- Kosten der Feuerwehr, falls durch den Unfall ein Brand entsteht (0.97% der Kosten von Unfällen in Belgien).³³⁹
- Die Kosten von Staus, die durch Unfälle verursacht werden, werden in diesem Bericht nicht separat ausgewiesen. Die Zeitverluste werden zu den Überlastungskosten gezählt, da jede Verlangsamung (im Vergleich zur Nachtgeschwindigkeit) unabhängig von der Ursache abgerechnet wird (siehe Kapitel 16).

³³⁸ Ecoplan (2007), Volkswirtschaftliche Kosten der Nichtberufsunfälle in der Schweiz in der Schweiz: Strassenverkehr, Sport, Haus und Freizeit, Anhang B.

³³⁹ De Brabander und Vereeck (2007), Valuing the Prevention of Road Accidents in Belgium, S. 720 und 728.

- Kosten der Besucher (materielle Fahrtkosten und Geschenke), die ihre Angehörigen oder Freunde im Spital besuchen (0.08% der Kosten von Unfällen in Belgien).³⁴⁰
- Im Luftverkehr werden im Ausland registrierte Unfälle von Helikoptern und der General Aviation (GA) vernachlässigt, weil die Daten nur im Territorialitätsprinzip vorliegen. Ebenfalls nicht verfügbar sind Daten zu Kosten durch Unfälle auf den Flughäfen und zu Kosten der Bergung der Wracks von Flugzeugen.
- Zahlungen von Lebensversicherungen an Hinterbliebene, da hierzu keine Datengrundlagen vorliegen und häufig unklar ist, worin der Zweck der Lebensversicherung im Einzelfall besteht (Absicherung bei Unfall vs. Sparziel).

14.2 Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen

Im Grundsatz hat sich die bisher angewendete Methodik³⁴¹ bewährt und wird beibehalten. Die im Rahmen dieser Studie vorgenommenen Anpassungen zielten darauf ab, den Berechnungsvorgang zu vereinfachen (insbesondere mit dem Ziel der Erhöhung der Transparenz) sowie die neuesten Entwicklungen beim Mengengerüst (inkl. Verursacherprinzip sowie Umgang mit sogenannter «Dunkelziffer») aufzunehmen.

14.2.1 Personenschäden

Die folgende Abbildung 14-2 zeigt die verwendete Methodik im Bereich der Personenschäden.

Im Bereich der Personenschäden erfolgten dabei folgende Anpassungen:

- Verwendung der jährlich verfügbaren Detaildaten des ASTRA zu den Strassenverkehrsunfällen³⁴² zur Herleitung des Mengengerüsts im Verursacherprinzip. Die Zuordnung eines Unfalls zur verursachenden Fahrzeugkategorie erfolgt über das Attribut «Hauptverursacher» und die Zuteilung von Unfallopfern auf nicht-verursachende (NV) und verursachende Opfer (VU) erfolgt über die Kombination von Hauptverursacher und Personenart (bisher erfolgte Zuordnung über grob geschätzte Anteile nach an Unfällen beteiligten Fahrzeugkategorien sowie Besetzungsgrade der Fahrzeugkategorien).
- Zeitnahe Schätzung des Gesamtunfallgeschehens über Zeitreihen der BFU-Hochrechnung sowie der polizeilich registrierten Unfälle und (optional) der Entwicklung der Verkehrsleistung pro Fahrzeugkategorie.
- Die Direktzahlungen von Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherungen und Personenwagen-Insassenversicherungen lassen sich auf Basis der verfügbaren Daten nicht auf verschiedene Kostenarten (immaterielle Kosten, Produktionsausfall etc.) aufteilen. Bisher wurden diese vereinfacht

³⁴⁰ De Brabander und Vereeck (2007), Valuing the Prevention of Road Accidents in Belgium, S. 719 und 728.

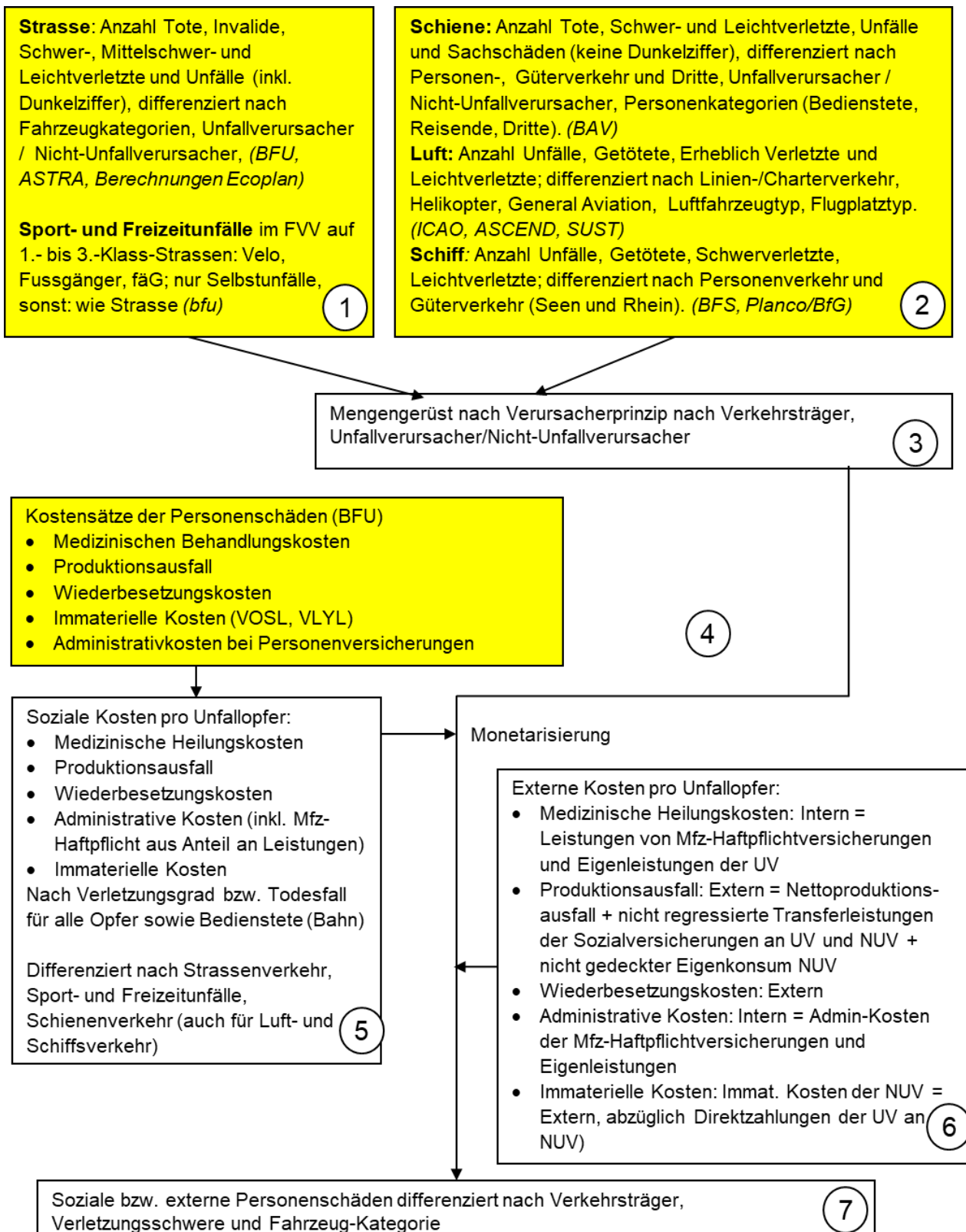
³⁴¹ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019), jeweils Kapitel 13

³⁴² ASTRA (2022), Strassenverkehrsunfälle SVU, Jahresdatensatz 2021.

chend vollständig als Internalisierung des Eigenkonsums (Bruttoproduktionsausfall – Nettoproduktionsausfall) beim Produktionsausfall angerechnet (Einkommensausfall bzw. Konsumverzicht). Dies führte zu einer «Überdeckung» des Eigenkonsums, weshalb dieser «Überschuss» zusätzlich bei den immateriellen Kosten als Internalisierung angerechnet wurde. Entsprechend schwierig gestaltete sich der Nachvollzug der verschiedenen Berechnungsschritte. Neu werden die Direktzahlungen der Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherungen und der Personenwagen-In-sassenversicherungen deshalb vollständig an die externen immateriellen Kosten der Nicht-Unfallverursachenden als Internalisierungsbeitrag angerechnet.

- Die Transferleistungen der Sozialversicherungen an Unfallopfer spielen eine wichtige Rolle im Berechnungshergang der externen Produktionsausfälle. Ihre Herleitung und ihr Einbezug in den Berechnungsvorgang sind jedoch komplex und teilweise für Aussenstehende nur schwer nachvollziehbar. Aus diesem Grund wurde der Einbezug der Transferleistungen vereinfacht und stärker formalisiert. Neu werden aus der bestehenden Herleitung die Anteile der Transferleistungen am Eigenkonsum ermittelt und fixiert. Diese fliessen anschliessend (korrigiert mit der relativen Entwicklung der Konsumausgaben, der Kosten- und Lohnentwicklung) direkt in die Berechnung ein (vgl. Abschnitt 14.4.3b).
- Die Kostensätze für soziale Personenschäden wurden aktualisiert (auf Basis der Arbeiten der BFU zu den volkswirtschaftlichen Kosten der Nichtberufsunfälle in der Schweiz)

Abbildung 14-2: Methodik zur Ermittlung der Personenschäden

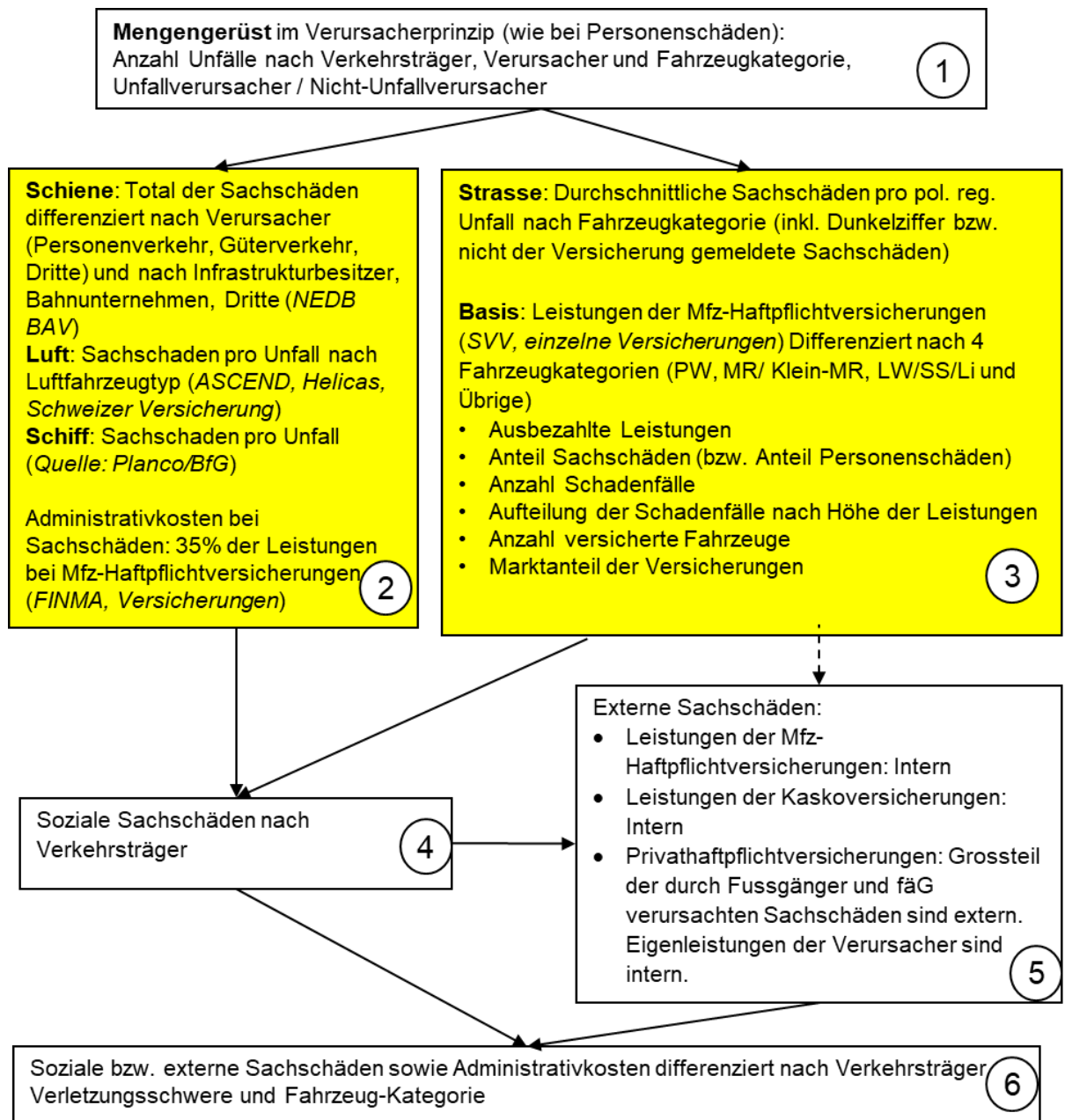


Legende: Inputdaten Zwischen- / Endergebnisse Erläuterung der Berechnung (Datenquellen kursiv)

14.2.2 Sachschäden

Bei den Sachschäden wird die bisherige Methodik beibehalten, wie sie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist. Die gemäss dem nachfolgenden Vorgehen berechneten durchschnittlichen Sachschäden pro Unfall im Strassenverkehr werden übernommen und über die Entwicklung der Motorfahrzeug-Haftpflichtpflichtleistungen pro polizeilich registrierten Unfall aufdatiert. Im Schienenverkehr werden die Sachschäden direkt über eine Auswertung der NEDB ermittelt. Im Luft- und Schiffsverkehr basiert die Schätzung auf langjährigen Erfahrungswerten.

Abbildung 14-3: Methodik zur Herleitung der Sachschäden



Legende:

Inputdaten

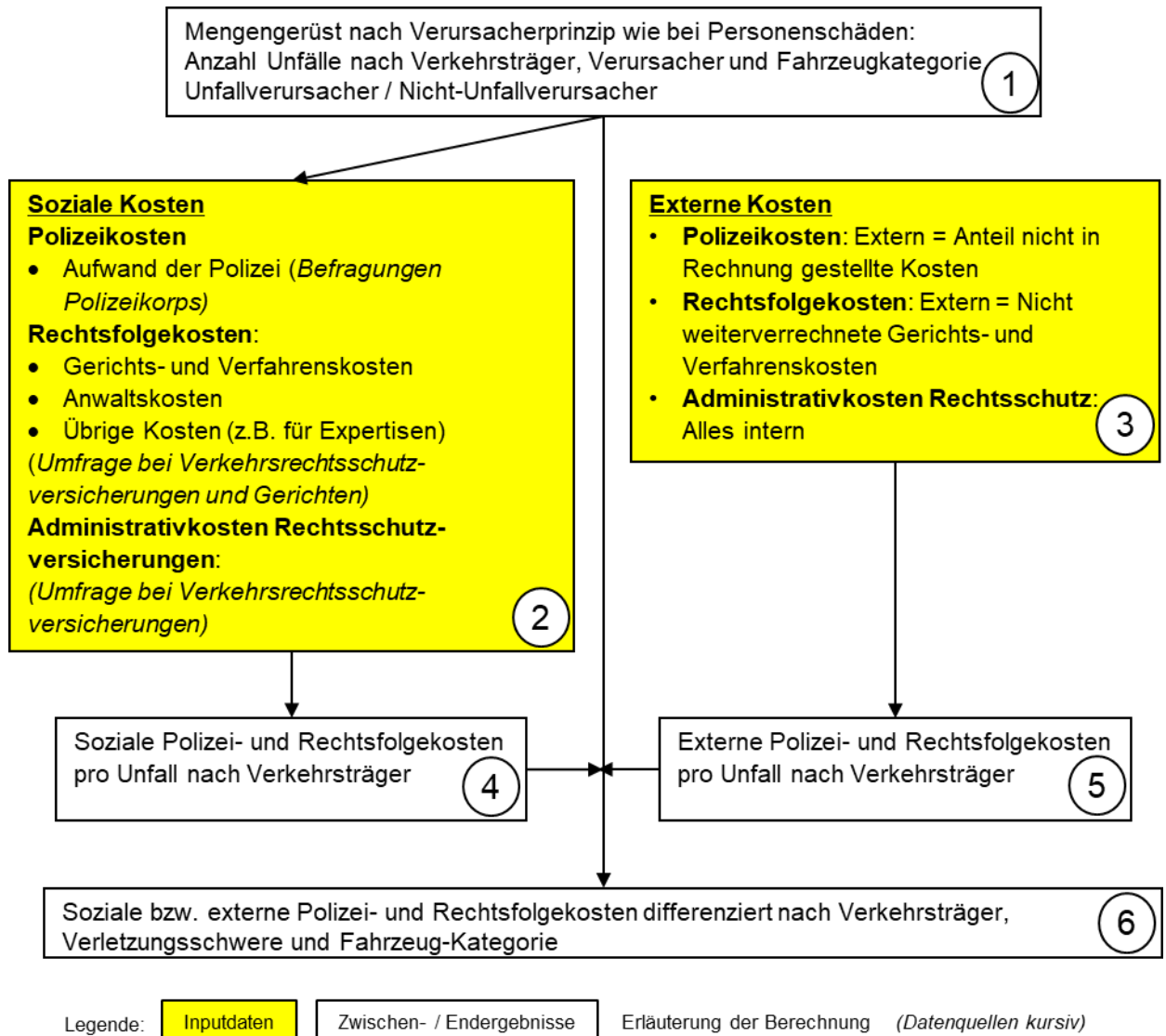
Zwischen- / Endergebnisse

Erläuterung der Berechnung (*Datenquellen kursiv*)

14.2.3 Polizei- und Rechtsfolgekosten

Die folgende Abbildung zeigt die weiterhin geltende Herleitung der Polizei- und Rechtsfolgekosten. Die bisher verwendeten Kostensätze für Polizei- und Rechtsfolgekosten werden übernommen und über die Nominallohnentwicklung fortgeschrieben.

Abbildung 14-4: Methodik zur Herleitung der Polizei- und Rechtsfolgekosten



14.3 Mengengerüst

14.3.1 Strassenverkehr

Die Herleitung der Unfallkosten nach dem Verursacherprinzip sowie der Anspruch eines «best guess» stellen hohe Anforderungen an die Datengrundlagen zum Mengengerüst:

- Für einen «**best guess**» der Unfallkosten braucht es Angaben zum **Gesamtunfallgeschehen**, inklusive der sogenannten «**Dunkelziffer**».

Hierfür eignet sich für die Schweiz einzig die Verwendung der Hochrechnung des Gesamtunfallgeschehens der Beratungsstelle für Unfallverhütung (BFU). Das Gesamtunfallgeschehen (inkl. Dunkelziffer) sowie die Verteilung auf die Verletzungsschweren ist massgebend für die Gesamtkosten der Unfälle im Verkehrsträger «Strasse». Zudem ist es hauptbestimmend für die Verteilung der Verletzten auf die Verletzungsschweren. Da diese Datengrundlage auf dem Monitoringprinzip basiert, bestimmt sie die Verteilung auf die verursachenden Fahrzeugkategorien nicht mit.

- Zur Herleitung des Verursacherprinzips muss aus den Datengrundlagen identifiziert werden können, welche Fahrzeugkategorie einen Unfall verursacht hat (**verursachende Fahrzeugkategorie**) und ob es sich beim Unfallopfer um ein **verursachendes / nicht-verursachendes Unfallopfer**³⁴³ handelt.

Hierzu verwenden wir die jährlich vorliegenden Daten des ASTRA VU (Jahresdatensätze ASTRA Verkehrsunfälle). Das Mengengerüst des ASTRA VU bildet somit die Basis zur Herleitung des Verursacherprinzips und ist massgeblich mitbestimmend für die Verteilung der Unfallkosten auf die Fahrzeugkategorien.

Die beiden Datengrundlagen weisen unterschiedliche Strukturen auf, was verschiedene Herausforderungen bei deren Verknüpfung hervorbringt. Die folgende Abbildung zeigt das Vorgehen zur Herleitung des Mengengerüsts im Verursacherprinzip.

Gegenüber der bisherigen Methodik gibt es dabei folgende Neuerungen:

- Neu wird das verursachende Objekt direkt über das Attribut «Hauptverursacher» («ja») des ASTRA VU ermittelt. Die verursachende Person kann als Lenker/In dieses Objekts identifiziert werden.³⁴⁴

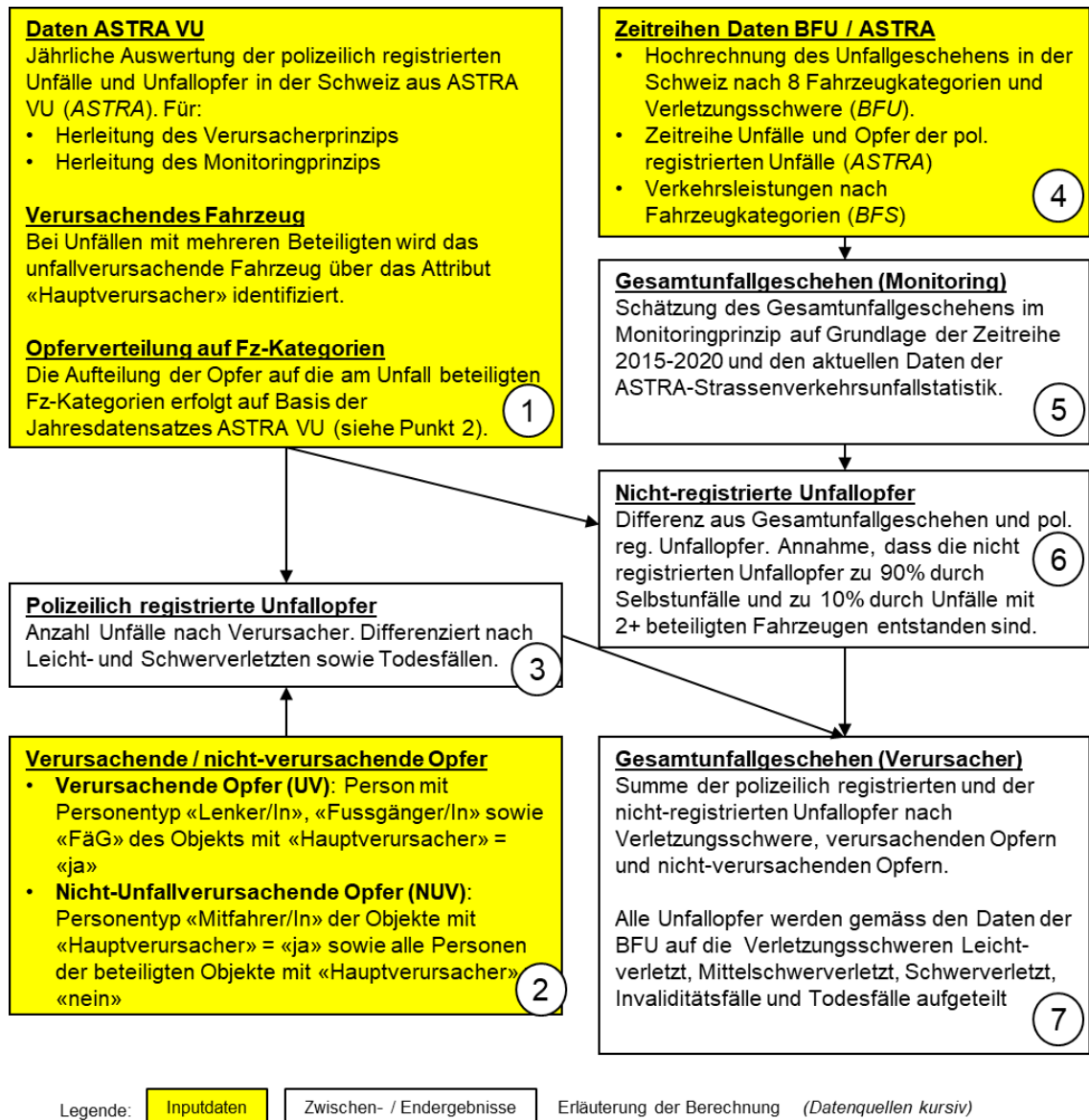
³⁴³ **Verursachendes Unfallopfer:** Die verletzte Person befindet sich in der unfallverursachenden Fahrzeugkategorie und ist Lenker/In des Unfallfahrzeugs.

Nicht-verursachendes Unfallopfer: Die verletzte Person befindet sich in einer Fahrzeugkategorie, die vom Unfall betroffen ist, ihn aber **nicht** verursacht hat oder ist Mitfahrer/In (≠ Lenker/In) des unfallverursachenden Fahrzeugs.

³⁴⁴ Bisher wurde die verursachende Fahrzeugkategorie statistisch aus den bei Kollisionen in den beteiligten Fahrzeugkategorien vorliegenden «Mängeln» abgeleitet. Lagen bei 100 Kollisionen mit 200 beteiligten Objekten mit Beteiligung von Personenwagen und Lieferwagen bei 100 beteiligten Personenwagen Mängel und bei 100 beteiligten Lieferwagen Mängel vor, so wurden je 50% (50 Unfälle) den Personenwagen und den Lieferwagen zugeordnet. Die Zahl der Nicht-Unfallverursachenden Opfer wurde auf Basis des durchschnittlichen Besetzungsgrades ermittelt. Zur Herleitung des Monitoringprinzips wurden zudem grobe Annahmen zum Schadenpotenzial der einzelnen Fahrzeugkategorie verwendet.

- Nicht-verursachende Personen (inkl. Verletzungsschwere und Fahrzeugkategorie) können dadurch direkt aus dem Datensatz des ASTRA VU ermittelt werden. Es sind somit für die polizeilich erfassten Unfälle und Unfallopfer zur Herleitung des Verursacherprinzips keine Annahmen über Besetzungsgrade und Opferverteilungen mehr notwendig.

Abbildung 14-5: Vorgehen zur Herleitung des Mengengerüst im Verursacherprinzip im Strassenverkehr



- Das Bundesamt für Raumentwicklung plant die im Vergleich zum bisherigen Publikationsrhythmus eine frühere Veröffentlichung der externen Kosten für das Unfalljahr 2023 im Juni 2025. Generell sollen die Kosten des Unfalljahres t künftig im Juni t+2 veröffentlicht werden. Weil die BFU-Hochrechnung für das Unfalljahr 2023 [t] erst im Dezember 2025 [t+2] vorliegt, wird das Gesamtunfallgeschehen im Strassenverkehr über ein neues Schätzverfahren hergeleitet. Die

Schätzung betrifft das Total der Verletzten sowie deren Verteilung auf verschiedene Verletzungsschweren und einige wenige, stark aggregierte Fahrzeugkategorien im Monitoringprinzip. Die Zahl der Todesfälle wird aus den Daten des ASTRA übernommen (d.h. es wird angenommen, dass keine Dunkelziffer besteht).

Um das Mengengerüst im Verursacherprinzip bestimmen zu können, müssen die BFU-Hochrechnung zum Gesamtunfallgeschehen mit den ASTRA-Daten zu polizeilich registrierten Unfallopfern (nach verursachenden Fahrzeugkategorien sowie verursachenden und nicht-verursachenden Opfern) kombiniert werden. Dabei sind verschiedene Herausforderungen zu lösen:

- Die BFU-Hochrechnung weist die Verletzten im **Monitoringprinzip** aus. Für die Berechnung der externen Unfallkosten wird das **Verursacherprinzip** benötigt. Die Daten beruhen auf dem **Inländerprinzip** (Schweizer Unfallopfer im In- und Ausland).
- Die **Verletzungsschweren** des ASTRA basieren auf der 6-stufigen NACA-Klassierung³⁴⁵ (Schwere der Verletzung, ambulanter oder stationärer Spitalaufenthalt ja/nein) welche zu zwei Schweren aggregiert werden (Leichtverletzt, Schwerverletzt). Die Angaben der BFU werden auf einer 4-stufigen Skala gemäss den Ausfalltagen³⁴⁶ in Leichtverletzte, Mittelschwerverletzte, Schwerverletzte und Invalide eingeteilt. Die ASTRA-Daten beruhen auf dem **Territorialitätsprinzip** (alle Unfallopfer im Inland).
- Bei den Verletzten muss aufgrund fehlender anderer Datengrundlagen in Kauf genommen werden, dass das Gesamtunfallgeschehen (bestimmt das Total der Kosten) im Inländerprinzip, und die ASTRA-Daten im Territorialprinzip (bestimmt die Verteilung auf Fahrzeugkategorien) vorliegen. Die Unfallkosten von Ausländern in der Schweiz sind dadurch im Endergebnis nicht berücksichtigt, dafür die Unfallkosten von Schweizern im Ausland. Weil mutmasslich mehr Ausländer in der Schweiz verunfallen (insbesondere aufgrund der hohen Zahl an Grenzgängern und des Transitverkehrs) dürfte dies tendenziell zu einer Unterschätzung der Unfallkosten führen.

Weil die vorhandenen Kostensätze stark von der Dauer der Behandlung, des Spitalaufenthalts sowie der Arbeitsunterbrechung abhängig sind, werden die Ergebnisse auf Basis der BFU-Kategorien berechnet. Um die beiden Quellen miteinander verknüpfen zu können, treffen wir folgende Annahmen:

- **Todesfälle** werden direkt aus dem ASTRA VU übernommen. Sie bilden das Unfallgeschehen im Territorialitätsprinzip ab. Die Hochrechnung der BFU wird im Inländerprinzip erstellt. Die Daten zu den Todesfällen gemäss ASTRA sind zudem bereits im Juni des Folgejahres verfügbar.
- **Leichtverletzte**: Mangels zusätzlicher Daten wird für die ASTRA-Kategorie «Leichtverletzte» angenommen, dass diese im Zeitverlauf mit den BFU-Leichtverletzten korrelieren, d.h. dass diese auch im Zeitverlauf in einem ungefähr konstanten Verhältnis zueinanderstehen. Es ist sehr wahrscheinlich, dass ASTRA-Leichtverletzte nicht alle zu den BFU-Leichtverletzten zählen, sondern teilweise auch in den BFU-Mittelschwerverletzten (30 bis 89 Ausfalltage) oder

³⁴⁵ NACA = National Advisory Committee for Aeronautics

³⁴⁶ Leichtverletzte: weniger als 30 Ausfalltage; Mittelschwerverletzte: zwischen 30 und 89 Ausfalltage; Schwerverletzte: mehr als 90 Ausfalltage; Invalide: Erhalt einer Invalidenrente.

BFU-Schwerverletzten (90 und mehr Ausfalltage) enthalten sind.³⁴⁷ Zum Ausmass dieser Kategorienüberschneidungen liegen jedoch keine Zahlen vor. Umgekehrt können auch BFU-Leichtverletzte zu den ASTRA-Schwerverletzten zählen.

- **Schwerverletzte:** Für die ASTRA-Kategorie «Schwerverletzte» wird angenommen, dass diese mit der Summe aus BFU-Mittelschwerverletzten, BFU-Schwerverletzten und BFU-Invaliden gemäss BFU-Abgrenzung korreliert, d.h. diese auch im Zeitverlauf in einem ungefähr konstanten Verhältnis zueinanderstehen. Auch hier ist eine Überschneidung zwischen ASTRA-Schwerverletzten und BFU-Leichtverletzten denkbar, wobei zum Ausmass keine Zahlen vorliegen.

Im Folgenden wird die Herleitung des Verursacherprinzips für die polizeilich nicht registrierten Unfallopfer bzw. für das gesamte Unfallgeschehen beschrieben:

- Die Verletzten gemäss BFU werden auf die Fahrzeugkategorien gemäss ASTRA-Unfalldaten im Monitoringprinzip verteilt. Die ASTRA-Unfalldaten werden dazu ebenfalls nach dem Monitoringprinzip ausgewertet. Die Zahl der Verletzten für alle Fahrzeugkategorien (Total) sowie PW, Fuss, Motorrad, Bus/Car, Liefer-/Lastwagen, Mofa, Zug/Tram und «Andere» sind aus der BFU-Hochrechnung vorhanden. Die damit kongruenten ASTRA-Fahrzeugkategorien werden daraus direkt übernommen. Nicht kongruente Kategorien werden über Analogie-Annahmen abgeleitet. Daraus ergibt sich die Zahl der Verletzten nach ASTRA-Fahrzeugkategorie und nach BFU-Verletzungsschwere im Monitoringprinzip. Von diesem Mengengerüst wird die Zahl der polizeilich registrierten Verletzten abgezogen, was die Zahl der nicht registrierten Verletzten ergibt.
- Danach wird aus den ASTRA Unfalldaten das Mengengerüst nach verursachender Fahrzeugkategorie und Verursacher/Nicht-Verursacher hergeleitet. Zur Verwendung im dritten Schritt wird zwischen Selbstunfällen (Unfälle mit nur einem beteiligten Objekt) und Kollisionen (Unfälle mit mehr als einem beteiligten Objekt) differenziert.
 - Als verursachende Kategorie wird die ASTRA-«Fahrzeugart» des als Hauptverursacher gekennzeichneten Objekts verwendet (vgl. hierzu die Box weiter unten).
 - Zur Feststellung der verursachenden/nicht-verursachenden Verletzten stützen wir uns auf das personenbezogene Attribut «Personenart»³⁴⁸.
- Im letzten Schritt wird aus dem im Monitoringprinzip vorliegenden Mengengerüst der *nicht registrierten Verletzten* und den *polizeilich registrierten Verletzten* das Gesamtmengengerüst im Verursacherprinzip hergeleitet:
 - Die **polizeilich registrierten Verletzten** liegen bereits im Verursacherprinzip vor und können direkt übernommen werden. Die Schwerverletzten werden gemäss den jeweiligen Anteilen aus dem Gesamtunfallgeschehen auf die BFU-Verletzungsschweren Invalide, Mittelschwerverletzte und Schwerverletzte verteilt.
 - Für die **nicht registrierten Verletzten** wird wie bisher angenommen, dass sie zu **90% durch Selbstunfälle** zu Stande kommen. Dieser Wert ist eine grobe Annahme basierend auf der Überlegung, dass Unfälle mit nur einer beteiligten Person (Alleinunfall) eine deutlich höhere

³⁴⁷ Die NACA-Kategorien I und II aus den ASTRA-Daten erfordern maximal eine ambulante Behandlung im Spital. Die Leichtverletzten gemäss bfu weisen als Unterscheidungskriterium weniger als 30 Ausfalltage auf.

³⁴⁸ «Lenker/in» im hauptverursachenden Objekt, «Fussgänger/in» oder «fäG» wenn das hauptverursachende Objekt dieser Fahrzeugart angehört.

Wahrscheinlichkeit aufweisen, polizeilich nicht registriert zu werden, als wenn mehrere Personen oder Objekte beteiligt sind. Die grosse Mehrheit der Fälle, die nicht von der Polizei registriert werden, dürften Fälle sein, in denen es für das Opfer, das möglicherweise eine medizinische Behandlung benötigt, keinen Grund gibt, einen anderen Verantwortlichen zu benennen (insbesondere für die Versicherung). Die Fahrzeugkategorie im Monitoringprinzip entspricht dabei der verursachenden Fahrzeugkategorie im Verursacherprinzip. Die Verteilung auf unfallverursachende/nicht-unfallverursachende Opfer erfolgt analog zu den polizeilich registrierten Selbstunfällen. Bei 90% der nicht registrierten verletzten Fussgänger/innen handelt es sich per Annahme somit auch um durch die Kategorie «Fussgänger» verursachte unfallverursachende Verletzte. Weil diese immer allein sind (theoretischer Besetzungsgrad 1) gelten alle bei Selbstunfällen verletzten Fussgänger/innen als unfallverursachende Verletzte. Bei Fahrzeugen wie Personenwagen, im öffentlichen Verkehr oder Motorrädern ist der Anteil der nicht-verursachenden Verletzten bei Selbstunfällen hingegen im Durchschnitt nicht Null, da auch Mitfahrende oder Passagiere im selben Fahrzeug verletzt sein können.

- Bei den **restlichen 10% der nicht registrierten Verletzten** wird angenommen, dass sie sich aus Kollisionen ergeben, wobei die Verteilung der verursachenden Fahrzeugkategorien sowie die Verteilung auf Unfallverursacher/Nicht-Unfallverursacher pro Verletzungsschwere gleich ist wie bei den polizeilich registrierten Verletzten bei Unfällen mit 2 oder mehr Beteiligten.

a) Polizeilich registrierte Unfälle und Unfallopfer

Abbildung 14-6 stellt die polizeilich registrierten Strassenverkehrsunfälle im Jahr 2021 nach dem Monitoringprinzip dar. Die Werte basieren auf den Unfalldaten des ASTRA (Jahresdatensatz VU 2021). Sie zeigt in der ersten Spalte, mit welchem Verkehrsmittel die Unfallopfer unterwegs waren und wie viele der Unfallopfer pro Kategorie den Unfall (mutmasslich) verursacht haben (VU) und wie viele nicht (NV). Die Zuordnung der ASTRA-Fahrzeugarten zu den hier verwendeten Verkehrsmitteln ist in der Box weiter unten dargestellt. Mit dem Verkehrsmittel Traktor / Arbeitsmaschine (Abkürzung Tra/Arbm) wird im Unfallbereich eine zusätzliche Fahrzeugkategorie berücksichtigt, die in den anderen Kostenbereichen fehlt.

Abbildung 14-6: Polizeilich registrierte Unfallopfer im Monitoringprinzip (2021)

Verkehrsmittel der Opfer	Getötete		Schwerverletzte		Leichtverletzte		Total Verletzte (ohne Getötete)			Total Verletzte	
	NV	VU	NV	VU	NV	VU	NV	VU	Anteil VU	Verletzte	Anteil VM
PW	19	47	362	381	4'862	2'733	5'224	3'114	37%	8'338	41%
GW	-	-	4	-	34	4	38	4	10%	42	0%
MR	12	36	382	709	1'307	1'432	1'689	2'141	56%	3'830	19%
Mofa	1	2	24	68	151	213	175	281	62% *	456	2%
E-Bike	1	1	24	72	131	99	155	171	52%	326	2%
Pedelec	2	13	108	327	355	522	463	849	65%	1'312	6%
Velo	12	10	268	551	1'102	1'176	1'370	1'727	56%	3'097	15%
fäG	-	-	20	49	87	85	107	134	56%	241	1%
Fuss	28	9	343	81	1'110	248	1'453	329	18%	1'782	9%
Bus	-	-	10	-	147	3	157	3	2%	160	1%
Trolley	-	-	2	-	18	-	20	-	0%	20	0%
Tram	-	-	5	-	23	-	28	-	0%	28	0%
Li	-	2	12	13	287	127	299	140	32%	439	2%
LW	-	2	1	11	25	30	26	41	61%	67	0%
SS	-	-	1	2	9	11	10	13	57%	23	0%
Tra/Arbm	1	2	13	90	84	181	97	271	74%	368	2%
Bahn	-	-	-	-	1	-	1	-	0%	1	0%
Unbekannt	-	-	-	-	3	1	3	1	25%	4	0%
Total	76	124	1'579	2'354	9'736	6'865	11'315	9'219	45%	20'534	100%

* Lesebeispiel

Anteil VU: 62% der verletzten Personen die mit dem Mofa unterwegs waren, waren selbst die Verursacher

Anteil Vm: 2% aller Verletzten waren mit dem Mofa unterwegs.

Quelle:

ASTRA VU, Eigene Berechnungen (Zuordnung der Fahrzeugarten zu Verkehrsmittel siehe Box unten)
NV = Nicht-Unfallverursachende Opfer, VU = Unfallverursachende Opfer, Vm = Verkehrsmittel**Box: Zuordnung der ASTRA-Fahrzeugarten zu Verkehrsmitteln**

Die Zuordnung der Fahrzeugarten der ASTRA-Datenbank auf die in diesem Bericht verwendeten Verkehrsmittel-Kategorien ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Diese weicht teilweise von der Zuteilung in den öffentlich zugänglichen ASTRA-Statistiken ab.

Abbildung 14-7: Zuordnung ASTRA-Fahrzeugarten zu den Verkehrsmitteln

Verkehrsmittel	Fahrzeugarten ASTRA-Datenbank
PW	Personenwagen, Schwerer Personenwagen, Kleinbus, Leichtmotorfahrzeug, Wohnanhänger, Leichter Motorwagen, Schwerer Motorwagen
GW	Gesellschaftswagen
MR	Motorrad, Motorrad-Dreirad, Motorrad-Seitenwagen, Kleinmotorrad, Dreirädriges Motorfahrzeug, Kleinmotorrad-Dreirad, Kleinmotorfahrzeug, Sportgeräteanhänger, Motorrad-Anhänger, Motorradanhänger
Mofa	Motorfahrrad (ohne E-Bike)
E-Bike	Schnelles E-Bike
Pedelec	Langsames E-Bike
Velo	Fahrrad
fäG	andere nicht motorisierte Fahrzeuge

Fuss	Fussgänger
Bus	Linienbus, Gelenkbus
Trolley	Gelenktrolleybus, Trolleybus
Tram	Tram
Li	Lieferwagen
LW	Lastwagen, Sattel-Sachentransportanhänger, Sachentransportanhänger, Sattel-Anhänger
SS	Sattelschlepper, Leichtes Sattelmotorfahrzeug, Schweres Sattelmotorfahrzeug
Tra/Arbm	Arbeitsmaschine, Arbeitskarren, Anhänger, Arbeitsanhänger, Motorkarren, Motoreinachser, Traktor, Landw. Traktor, Landw. Arbeitskarren, Landw. Motorkarren, Landw. Motoreinachser, Landw. Kombinations-Fahrzeug, andere motorisierte Fahrzeuge
Unbekannt	unbekannt

Die folgende Abbildung zeigt die polizeilich registrierten Strassenverkehrsunfälle bzw. Unfallopfer im Jahr 2021 nach dem oben beschriebenen Verursacherprinzip. Links in der ersten Spalte ist angegeben, mit welchem Verkehrsmittel der Verursacher unterwegs war.

Abbildung 14-8: Polizeilich registrierte Unfallopfer im Verursacherprinzip (2021)

Verkehrsmittel der Verursacher	Getötete		Schwerverletzte		Leichtverletzte		Total Verletzte (ohne Getötete)			Total Verletzte	
	NV	VU	NV	VU	NV	VU	NV	VU	Anteil VU	Verletzte	Anteil Vm
PW	49	47	1'185	381	7'639	2'733	8'824	3'114	26%	11'938	58.1%
GW	-	-	7	-	43	4	50	4	7%	54	0.3%
MR	7	36	79	709	266	1'432	345	2'141	86%	2'486	12.1%
Mofa	-	2	9	68	46	213	55	281	84% *	336	1.6%
E-Bike	-	1	7	72	20	99	27	171	86%	198	1.0%
Pedelec	-	13	17	327	64	522	81	849	91%	930	4.5%
Velo	-	10	49	551	238	1'176	287	1'727	86%	2'014	9.8%
fäG	-	-	6	49	22	85	28	134	83%	162	0.8%
Fuss	-	9	13	81	70	248	83	329	80%	412	2.0%
Bus	-	-	8	-	64	3	72	3	4%	75	0.4%
Trolley	-	-	1	-	-	-	1	-	0%	1	0.0%
Tram	-	-	1	-	8	-	9	-	0%	9	0.0%
Li	4	2	113	13	788	127	901	140	13%	1'041	5.1%
LW	7	2	33	11	140	30	173	41	19%	214	1.0%
SS	7	-	12	2	86	11	98	13	12%	111	0.5%
Tra/Arbm	2	2	29	90	100	181	129	271	68%	400	1.9%
Bahn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0%
Unbekannt	-	-	10	-	142	1	152	1	1%	153	0.7%
Total	76	124	1'579	2'354	9'736	6'865	11'315	9'219	45%	20'534	100%

* Lesebeispiel

Anteil VU: Bei allen von Mofas verursachten Unfällen waren 84% der verletzten Personen die Mofa-Fahrenden selbst. Wenn Mofas einen Unfall verursachen, verletzten sie sich meist selbst.

Anteil Vm: 2% aller Verletzten wurden von Mofas verursacht (Anteil bei ungeschützten Verkehrsmitteln hoch).

Quelle: ASTRA VU, Eigene Berechnungen (Zuordnung der Fahrzeugarten zu Verkehrsmittel siehe Box oben)
NV = Nicht-Unfallverursachende Opfer, VU = Unfallverursachende Opfer, Vm = Verkehrsmittel

Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl der pro Fahrzeugkategorie verursachten Unfälle (mit Sach- und/oder Personenschäden) im Jahr 2021. Die Zuordnung der Unfälle auf die Fahrzeugkategorien erfolgt mittels des Kriteriums «Hauptverursacher».

Abbildung 14-9: Anzahl verursachte pol. reg. Unfälle (mit Sach- und/oder Personenschäden) 2021 nach Fahrzeugkategorie (inkl. Kategorie «Unbekannt», verteilt auf übrige)

	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	Tra/ Arbm	Total
Anzahl Unfälle	37'348	127	3'165	411	206	1'032	2'262	184	442	188	4	24	3'967	1'244	890	721	52'214

Quelle: ASTRA VU, Eigene Berechnungen (Zuordnung der Fahrzeugarten zu Verkehrsmittel siehe Box weiter oben)

b) Gesamtunfallgeschehen (ohne Sport und Freizeit im Fuss- und Veloverkehr) im Monitoringprinzip

Die Unfalldaten des ASTRA VU decken **nur polizeilich erfasste Unfälle** ab. Diese allein erlauben keine Ermittlung der «best guess» Unfallkosten.³⁴⁹ Grund dafür ist, dass in der internationalen Literatur ein breiter Konsens besteht, dass die polizeilich registrierten Unfälle nur einen Teil der Strassenverkehrsunfälle abdecken, es also eine sogenannte «Dunkelziffer» gibt. Viele Verletzungen oder Sachschäden, die aufgrund eines Unfalls auf dem Verkehrsträger «Strasse» gemäss der vorgenommenen Abgrenzung geschehen, werden polizeilich nicht registriert und sind deshalb nicht im Jahresdatensatz ASTRA VU enthalten.

Die BFU erstellt aus diesem Grund jährlich eine Hochrechnung des Gesamtunfallgeschehens im Strassenverkehr. Da diese für die ARE-Publikation künftig zu spät vorliegen, wurden die folgenden Werte über einen stark vereinfachten Ansatz geschätzt (vgl. Box weiter unten). Basis für die Schätzungen bildet die in einem linearen Schätzmodell ermittelte «Dunkelziffer» als Verhältnis zwischen Gesamtunfallgeschehen und polizeilich registrierten Unfällen zwischen 2016 und 2020 (unter Berücksichtigung einer «Konstante»). Die Zahlen beziehen sich dabei auf die Schweizer Bevölkerung (Inländerprinzip) und die Auswertung nach Fahrzeugkategorien erfolgt im Monitoringprinzip.

³⁴⁹ Auch der «at-least»-Ansatz wäre alleine auf Basis der polizeilich registrierten Unfälle nicht umsetzbar, da viele in der UVG-Statistik erfasste Unfälle fehlen würden.

Abbildung 14-10: Gesamtunfallgeschehen im Monitoringprinzip gemäss Schätzung 2021

BFU-Verletzungsschwere	PW	Motorrad	Motor-fahrrad	Velo	Fuss-gänger	Liefer- / LW	Bus / GW	Zug / Tram	Andere	Total	Anteil
Invalide	30	72	1.4	62	40	5	0.5	0.2	3	213	0.3%
Schwerverletzte	1'008	1'648	108	1'511	820	298	28	17	534	5'972	7.7%
Mittelschwerverletzte	1'429	1'862	231	4'000	364	231	64	23	446	8'650	11.1%
Leichtverletzte	14'648	7'866	1'429	27'478	4'090	568	520	95	6'480	63'175	81.0%
Total Verletzte	17'115	11'448	1'771	33'051	5'314	1'102	612	135	7'462	78'011	
Anteil	21.9%	14.7%	2.3%	42.4%	6.8%	1.4%	0.8%	0.2%	9.6%		

Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis BFU-Hochrechnung (Zahlen 2015-2020) und ASTRA VU (2015-2020) sowie ASTRA VU (2021)

Box: Einordnung und Detailangaben zur groben Schätzmethode

Die (vorausschauende) Schätzung des Gesamtunfallgeschehens hat nicht den Anspruch, die gleiche Aussagekraft wie die BFU-Hochrechnung zu erreichen, die deutlich mehr Informationen für die Aktualisierung einbezieht. Das Vorgehen lässt sich wie folgt kurz beschreiben:

- Zunächst wird ein linearer Zusammenhang zwischen BFU-Total und ASTRA-Total geschätzt, unter Verwendung der Jahre 2015 bis 2020 (R^2 : 0.944, t-Statistik: 8.243, $\text{BFU-Total} \sim 10'720 + 3.299 \cdot \text{ASTRA-Total}$). Auf dieser Grundlage wird die Gesamtzahl der Verletzten 2021 (inkl. Dunkelziffer) auf Basis der polizeilich registrierten Verletzten 2021 geschätzt.
- Anschliessend wird für die Personenwagen ein analoges Modell hergeleitet (R^2 : 1.0, t-Statistik: 102.83, $\text{PW} \sim -2426 + 2.3585 \cdot \text{ASTRA-PW}$). Analog wird für die Kategorien «Velo» (R^2 : 0.128, t-Statistik: 0.767), «Fussgänger» (R^2 : 0.979, t-Statistik: 13.795), «Motorrad» (R^2 : 0.575, t-Statistik: 2.327) und «Andere» (R^2 : 0.838, t-Statistik: 4.581) vorgegangen.
- Bei den meisten Kategorien war dabei in den letzten Jahren das Verhältnis zwischen polizeilich registrierten Verletzten und dem Total der Verletzten (gemäss BFU-Schätzung) praktisch konstant. Ausnahme bildet der Veloverkehr, wobei hier die zusätzliche oder alleinige Verwendung der Personenkilometer im Veloverkehr (die auf Schätzungen bzw. einer Fortschreibung beruhen) keine Verbesserung bzw. analoge Ergebnisse liefert.
- Die Ergebnisse für das Total und die PW werden direkt für das Jahr 2021 übernommen. Die übrigen Fahrzeugkategorien werden proportional angepasst, so dass die Summe aller Kategorien mit dem ursprünglichen Total übereinstimmt (die Differenz zwischen Total und PW wird proportional auf die übrigen Kategorien verteilt).
- Die Verteilung auf die Verletzungsschweren erfolgt über die im Jahr 2020 von der BFU ausgewiesene Verteilung pro aggregierte Fahrzeugkategorie. Im letzten Schritt wird die stark aggregierte Kategorie «Andere» gemäss Angaben aus der BFU-Hochrechnung 2020 weiter aufgeteilt. Insgesamt entstehen dadurch acht Fahrzeugkategorien.

c) Gesamtunfallgeschehen im Verursacherprinzip

Wie oben beschrieben werden vom Gesamtunfallgeschehen im Monitoringprinzip die polizeilich registrierten Unfälle im Monitoringprinzip abgezogen, und der Rest wird gemäss den polizeilich registrierten Unfällen im Verursacherprinzip auf die Fahrzeugkategorien verteilt (mit Annahmen

zum Anteil der Allein-/Selbstunfälle). Werden diese (nicht registrierten Fälle) zu den polizeilich registrierten Fällen im Verursacherprinzip addiert, ergibt sich das Gesamtunfallgeschehen im Verursacherprinzip, welches in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist.

Auffällig ist, dass bei den weniger gut geschützten Fahrzeugkategorien sehr häufig die verursachende Person selbst zu Schaden kommt (z.B. zu 97% beim Velo). Beim PW hingegen ist nur zu 41% der Verursacher selbst verletzt.

Abbildung 14-11: Gesamtunfallgeschehen im Verursacherprinzip 2021 (verwendet)

Verkehrsmittel der Verursacher	Getötete		Invalide		Schwerverletzte		Mittelschwerverletzte		Leichtverletzte		Total Verletzte		
	NV	VU	NV	VU	NV	VU	NV	VU	NV	VU	NV	VU	Anteil VU
PW	49	47	31	22	874	627	1'266	908	11'967	8'095	14'138	9'652	41%
GW	-	-	0.3	-	7	-	11	-	111	6	129	6	4%
MR	7	36	3	43	77	1'206	112	1'747	647	6'022	838	9'019	91%
Mofa	-	2	0.2	4	7	102	10	148	96	1'227	114	1'481	93%
E-Bike	-	1	0.2	3	4	74	6	107	29	692	40	876	96%
Pedelec	-	13	0.4	11	10	310	15	450	125	2'869	151	3'640	96%
Velo	-	10	1	70	33	1'969	48	2'852	713	23'686	796	28'577	97%
fäG	-	-	0.2	2	4	53	6	77	43	522	54	655	92%
Fuss	-	9	0.5	12	14	333	20	483	149	2'766	183	3'594	95%
Bus	-	-	1	-	19	-	27	-	283	13	330	13	4%
Trolley	-	-	0.1	-	3	-	4	-	27	1	33	1	2%
Tram	-	-	0.2	-	6	-	9	-	89	-	105	-	0%
Li	4	2	3	1	73	26	106	37	1'167	423	1'349	487	27%
LW	7	2	1	0.3	19	8	28	12	208	67	256	86	25%
SS	7	-	0.2	0.1	7	2	10	3	114	31	131	37	22%
Tra/Arbm	2	2	1	3	20	82	29	119	223	762	272	967	78%
Total	76	124	42	171	1'178	4'794	1'707	6'943	15'990	47'182	18'918	59'090	76%

NV = Nicht verursachende Verletzte / Getötete, VU = Verursachende Verletzte / Getötete

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen,

LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tra = Traktoren, Arbm = Arbeitsmaschinen

d) Unfälle in Sport und Freizeit auf öffentlichen Strassen und Plätzen im Fuss- und Veloverkehr

Unfälle aus Sport und Freizeit im Fuss- und Veloverkehr auf öffentlichen Strassen und Plätzen werden separat ausgewiesen (siehe Abgrenzung in Kapitel 14.1.1). Diese sind im Mengengerüst der BFU zum Gesamtunfallgeschehen im Strassenverkehr noch nicht enthalten und wurden bisher jährlich separat durch die BFU ermittelt. Bei den Verunfallten handelt es sich vollständig um verursachende Unfallopfer (Alleinunfälle ohne Beteiligung anderer Personen / Fahrzeuge).

Basis der Auswertung für die Unfälle in Sport- und Freizeit auf öffentlichen Strassen und Plätzen durch die BFU bildet die SSUV-Datenbank. Dabei werden alle Unfälle von in der Schweiz wohnhaften Personen im In- und Ausland berücksichtigt (Inländerprinzip, vgl. Kapitel 2.4.1 und 14.1.3). Bei der Auswertung der Daten wird nach der BFU-Verletzungsschwere differenziert, die über die

durch die Unfallversicherung entschädigten Ausfalltage definiert werden, auch weil die Kostensätze stark mit den Ausfall- und Behandlungstagen variieren.

Eine zeitnahe (frühere) Schätzung der im aktuellen Jahr erfolgten Unfälle analog zum Gesamtunfallgeschehen im Strassenverkehr (siehe Abschnitt b) ist nicht möglich. Aus diesem Grund wird für die Schätzung der Kosten im Jahr 2021 auf die Daten des Vorjahres (2020) abgestellt.³⁵⁰ Die Zahlen liegen differenziert für die Verkehrsmittel Fuss, fäG und Velo sowie nach BFU-Verletzungsschwere vor.

Bei Sport- und Freizeitunfällen auf der Strasse sind die erfassten Todesfälle sowie Invaliditätsfälle im Durchschnitt wesentlich älter als im Strassenverkehr. Auch die Verteilung der Geschlechter (Mann / Frau) ist nicht mit dem Strassenverkehr kongruent. Daher werden für diese Verletzten auf diese Unterschiede adaptierte Kostensätze verwendet.

Abbildung 14-12: Verletzte bei Unfällen in Sport und Freizeit auf öffentlichen Strassen und Plätzen (2020)

Verkehrsmittel	Getötete	Invalide	Schwer-verletzte	Mittel-schwer-verletzte	Leicht-verletzte	Total Verletzte
Velo	9	-	180	364	3'118	3'661
FäG	-	4	324	813	5'780	6'922
Fuss	128	18	1'102	2'231	18'403	21'755
Sport&Freizeit	137	22	1'607	3'408	27'301	32'338

Quelle: Beratungsstelle für Unfallverhütung BFU (2024)

Bei den Sport- und Freizeitunfällen führt insbesondere der Einbezug des Fussverkehrs regelmässig zu Diskussionen (siehe Kapitel 14.1.1). Aufgrund der Unsicherheiten bezogen auf die Abgrenzung von Strassenverkehrsunfällen (Fussverkehr vs. Verkehrsteilnahme mit Fahrzeug) von anderen Unfällen und den Unsicherheiten bei der Feststellung des Unfallortes (öffentliche Strassen und Plätze) sowie der Ursache des Unfalls aus den Datengrundlagen, werden die Kosten der Fussgängerinnen zwar berechnet, jedoch im Bericht separat ausgewiesen.

e) Sicht Verkehrsart Schwerverkehr

Die folgende Abbildung zeigt die Grundlagen zur Herleitung der Sicht Verkehrsart Schwerverkehr für das Jahr 2021. Dargestellt sind die polizeilich registrierten, vom Schwerverkehr verursachten Unfallopfer, innerhalb und ausserhalb des Schwerverkehrs. Gemäss dieser Darstellung gelten z.B. bei Gesellschaftswagen 43% der von Gesellschaftswagen verursachten Kosten bei Schwerverletzten als ausserhalb des Schwerverkehrs und sind deshalb extern aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr.

³⁵⁰ Aufgrund der relativ kleinen jährlichen Schwankungen sowie der starken Verzögerung bei der Datenverfügbarkeit bei den Todesfällen empfehlen wir für die künftige jährliche Aktualisierung ebenfalls die Verwendung der Vorjahreswerte.

Abbildung 14-13: Anteil der vom Schwerverkehr verursachten Unfallopfer ausserhalb des Schwerverkehrs (pol. reg. Unfälle) im Jahr 2021

	Innerhalb SV						Ausserhalb SV			Anteil ausserhalb Schwerverkehr		
	Getötete		Schwerverletzte		Leichtverletzte		Schwer- verletzte		Leicht- verletzte	Getötete	Schwer- verletzte	Leicht- verletzte
	NV	VU	NV	VU	NV	VU	NV	NV	NV			
Gesellschaftswagen	-	-	4	-	20	4	-	3	23	0%	43%	49%
Lastwagen	-	2	1	11	16	30	7	32	124	78%	73%	73%
Sattelschlepper	-	-	1	2	1	11	7	11	85	100%	79%	88%
Schwerverkehr	-	2	6	13	37	45	14	46	232	88%	71%	74%

Quelle: ASTRA VU Jahresdatensatz, eigene Berechnungen.
 UV = Unfallverursachendes Opfer, NV = Nicht-Unfallverursachendes Opfer

14.3.2 Schienenverkehr

Das Unfallgeschehen im Schienenverkehr wird auf Basis einer detaillierten Auswertung der Neuen Ereignisdatenbank (NEDB) des BAV für das Jahr 2021 abgebildet.

Dabei werden soweit möglich folgende Ein- und Ausschlüsse vorgenommen:

- Es werden nur Unfälle im Normal- und Schmalspurnetz verwendet.
- Störungen gelten ebenfalls als Unfälle, sofern sie zu Sachschäden oder Opfern führen.
- Unfälle an Bahnübergängen (Zusammenstösse mit Strassenverkehrsmitteln oder Fussgängern), die vom Schienenverkehr verursacht wurden, sind enthalten.
- Nicht berücksichtigt werden Unfälle an Bahnübergängen, die vom Strassenverkehr verursacht werden. Diese Unfälle werden im Strassenverkehr erfasst und dort direkt der verursachenden Fahrzeugkategorie zugeordnet.
- Ausgeschlossen werden Suizide, da sie nicht der untersuchten Unfalldefinition entsprechen.
- Ebenfalls ausgeschlossen werden Unfälle die auf den Missbrauch von Drogen, Alkohol und Medikamenten zurückzuführen sind.

Im Unterschied zum Strassenverkehr ist im Schienenverkehr keine Dunkelziffer zu berücksichtigen, da im Schienenverkehr Unfälle meist mit Betriebsstörungen verbunden sind und damit erfasst werden.

Sachschäden werden vom BAV in der NEDB erfasst und ausgewiesen, diese sind jedoch als grobe Schätzungen zu betrachten, da die Erfassung der Sachschäden je nach TU anders erfolgt bzw. teilweise die definitiven Zahlen nicht nachgemeldet werden. Dennoch werden die Angaben unverändert als beste verfügbare Datengrundlage übernommen.

Die Zuteilung der Unfallopfer auf den Verursacher erfolgt über Angaben aus den Datengrundlagen des BAV zu den Unfallbeteiligten (Wer) und zum betroffenen Zugtyp. Basierend auf diesen Anga-

ben werden die Unfälle auf die Verursacherkategorien Personenverkehr, Güterverkehr, Infrastruktur und Dritte zugewiesen. Die Unfälle und Opfer, welche durch die «Infrastruktur» verursacht werden, werden mittels der Zugkilometer auf den Personen- und Güterverkehr aufgeteilt.

Abbildung 14-14: Unfälle, Unfallopfer und Sachschäden im Schienenverkehr 2021

	Typ	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Dritte	Total
Getötete	Reisende	-	-	-	-
	Bedienstete	-	-	1	1
	Dritte	-	1	-	1
	Unbefugte	-	-	4	4
	Total	-	1	5	6
Schwer- verletzte	Reisende	7	0	-	7
	Bedienstete	3	7	5	15
	Dritte	1	0	1	2
	Unbefugte	-	-	19	19
	Total	10	8	25	43
Leicht- verletzte	Reisende	167	2	-	169
	Bedienstete	7	9	6	22
	Dritte	-	-	5	5
	Unbefugte	-	-	3	3
	Total	174	11	14	199
Total		184	20	44	248

	Typ	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Dritte	Total
Sachschäden (Mio. CHF)	Dritte	0.27	0.70	0.45	1.42
	Fahrzeuge	1.40	0.77	2.24	4.41
	Feste Anlagen	7.29	1.90	1.03	10.23
	Umwelt	0.03	0.00	0.01	0.04
	Total	8.99	3.38	3.73	16.10

 Unfallverursachende Opfer

Quelle: Nationale Ereignisdatenbank (NEDB, 2023), Bundesamt für Verkehr (BAV), eigene Auswertung

Für die Berechnung der externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende wird die Aufteilung der Unfallopfer auf unfallverursachend und nicht-unfallverursachend benötigt. Dabei wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Bei den vom Personen- oder Güterverkehr (Fahrzeugführer, Schäden an der Infrastruktur) verursachten Unfällen gehen wir davon aus, dass die Opfer nicht-unfallverursachend sind. Verursacher ist der «Schienenverkehr».³⁵¹
- Bei von der Verursacherkategorie «Dritte» verursachten Unfällen werden folgende Annahmen getroffen:
 - Dritte, Unbefugte und Reisende sind unfallverursachende Opfer (es wird angenommen, dass die verursachenden «Dritten» selbst zu Schaden kommen, beispielsweise durch Störung des Betriebs, unerlaubtes Betreten der Gleise, Besteigen von Fahrzeugen etc.)
 - Bedienstete der Bahnbetriebe sind nicht-unfallverursachende Opfer (sie kommen aufgrund des durch «Dritte» (also nicht bei den Bahnunternehmen angestellte Personen) verursachten Unfalls zu Schaden.

14.3.3 Luftverkehr

Beim Luftverkehr wird das Halbstreckenprinzip umgesetzt (vgl. Erläuterungen unter Abschnitt 2.4.1). Im Linien- und Charterverkehr ist die Verwendung des Halbstreckenprinzips anerkannt und wird beibehalten. Dabei werden Opfer eines Flugunfalls je hälftig dem Abflugort und dem Zielort zugeordnet. Aus Datengründen wird dabei das (bei Retourflügen) äquivalente Abflugprinzip verwendet.

Flugunfälle mit Todesfällen oder Verletzten im Linien- und Charterverkehr mit Start oder Landung in der Schweiz sind dabei äusserst selten. Im Hinblick auf die Berechnung von Durchschnittskosten wird wie bisher auf die im 10-Jahres-Durchschnitt erwartete Zahl an Unfallopfern abgestellt. Es werden die bisher verwendeten Unfallraten pro Abflug verwendet.

Die Unfälle in der General Aviation liegen wie bisher von der SUST (bisher BfU) differenziert nach Luftfahrzeugtyp, Art des Verkehrsmittels und Infrastruktortyp (Landes- und Regionalflughäfen, ausserhalb Flughafen) vor. Zudem wird zwischen Reisenden, Besatzung und Dritten (inkl. Unbefugten) sowie nach Verletzungsschweren differenziert.

Zu den Verursachern im Luftverkehr liegen keine Daten vor, weshalb folgende Annahmen getroffen werden:

- Ist das Unfallopfer ein Fluggast oder ein Dritter kann davon ausgegangen werden, dass sie den Unfall nicht verursacht haben.³⁵²
- Die Besatzung im Linien- und Charterverkehr wird als Nicht-Verursacher behandelt. In der General Aviation (inkl. Helikopter) wird angenommen, dass die Besatzung Unfallverursacher ist.

Die folgende Abbildung zeigt das Mengengerüst im Luftverkehr für 2021.

³⁵¹ Der typische Fall ist etwa ein Zusammenstoss zwischen zwei Zügen wegen eines falsch gestellten Haltesignals durch das Bahnpersonal. Weder das Fahrpersonal noch die betroffenen Zugsreisenden können in diesem Fall als unfallverursachende Opfer betrachtet werden. Es ist denkbar, dass in einigen Fällen das betroffene Opfer selbst den Unfall verursacht hat (z.B. Lokführer, welcher ein Haltesignal überfährt). Dazu stehen allerdings keine Datengrundlagen zur Verfügung, so dass auf eine detailliertere Zuordnungsannahme verzichtet werden muss.

³⁵² Dritte sind nicht im Luftfahrzeug, meist sind es Personen, die von Herabfallendem getroffen werden, z.B. auf Baustellen bei Baumaterialtransporten mit Helikopter.

Abbildung 14-15: Unfälle und Unfallopfer im Luftverkehr 2021

		Linien- und Charterverkehr				Total	Anteil am Total
		Inter-kontinental	Europäisch	General Aviation	Helikopter		
Getötete	Bedienstete	0.01	0.09	2.00	-	2.10	7.0%
	Reisende	0.09	0.71	2.50	-	3.30	10.9%
	Dritte	0.00	0.02	-	-	0.03	0.1%
	Total	0.10	0.82	4.50	-	5.42	18.0%
Schwer-verletzte	Bedienstete	0.00	0.02	-	-	0.02	0.1%
	Reisende	0.02	0.13	-	-	0.15	0.5%
	Dritte	0.00	0.00	-	-	0.01	0.0%
	Total	0.02	0.15	-	-	0.17	0.6%
Leicht-verletzte	Bedienstete	0.00	0.00	9.00	1.00	10.00	33.2%
	Reisende	0.00	0.01	10.50	4.00	14.52	48.2%
	Dritte	0.00	0.00	-	-	0.00	0.0%
	Total	0.00	0.02	19.50	5.00	24.52	81.4%
Total Opfer		0.15	0.99	24.00	5.00	30.11	100.0%
Unfälle		0.03	0.27	8.50	1.00	9.81	

Hinweis: Linien- und Charterverkehr wurde auf Basis von langfristigen Unfall- und Unfallopferdaten ermittelt

Die berechneten Kosten werden für die General Aviation weiter nach Business Aviation und Rest General Aviation differenziert. Als Grundlage dient dabei der Anteil der jeweiligen Verkehrsleistung am Total der General Aviation.

14.3.4 Schiffsverkehr

Wie im Linien- und Charterverkehr sind Unfälle im Schiffsverkehr äusserst selten (< 1 Mio. CHF an externen Kosten pro Jahr). So registrierte die SUST im Jahr 2021 in der Binnenschifffahrt 10 Meldungen. Es wurden jedoch keine Untersuchungen eröffnet. Das BAV weist in ihrer Statistik des öffentlichen Verkehrs bei Personenschiffen im Jahr 2021 einen Unfall mit Personenschäden aus. Dabei wurde gemäss BFS eine Drittperson³⁵³ getötet.

Wie beim Luftverkehr werden aufgrund dieser sehr kleinen Zahlen für den Ausweis mittelfristige Durchschnittskosten zur Berechnung des Mengengerüsts die bisher verwendeten langjährigen Unfallraten im Halbstreckenprinzip verwendet. Die folgende Abbildung zeigt die Unfälle und Unfallopfer im Schiffsverkehr 2021.

³⁵³ Dritte sind Personen, die sich unberechtigt ausserhalb der vorgesehenen Zonen für Besatzung und Schiffspassagiere aufhalten.

Abbildung 14-16: Unfälle und Unfallopfer im Schiffsverkehr 2021

	Personen- verkehr Seen	Güterverkehr Seen	Rhein- schifffahrt	Total
Getötete	-	0.00	0.07	0.07
Schwerverletzte	0.15	0.00	0.24	0.39
Leichtverletzte	0.45	0.01	0.69	1.15
Total	0.60	0.02	1.00	1.62
Unfälle	0.80	0.37	18.39	19.56

Hinweis: Unfälle wurden auf Basis von langfristigen Unfallraten geschätzt.

Die Unfallopfer sind per Annahme keine Unfallverursacher, da bei (grossen) Schiffen Verursacher (z.B. Steuermann) und Unfallopfer (z.B. Matrose) meist nicht identisch sein dürften.

14.4 Wertgerüst

14.4.1 Kostenbestandteile bei Personenschäden

Die folgende Abbildung zeigt die bei Personenschäden ermittelten Kostenbestandteile, jeweils mit einer Angabe zur Ermittlung der externen Anteile. Die verschiedenen Kostenfolgen bei Personenschäden mit Verletzungen (medizinische Heilungskosten, Produktionsausfall, Wiederbesetzungskosten und immaterielle Kosten) sind in Anhang A im Detail erläutert.

Bei den Produktionsausfällen wurde bisher eine komplexe Methodik verwendet, um die externen Kosten zu bestimmen. Ein Ziel der aktuellen Überarbeitung war es, diese Methodik zu vereinfachen und stärker zu formalisieren. Das Ergebnis dieser Formalisierung ist in Abschnitt 14.4.3b) beschrieben.

Abbildung 14-17: Kostenbestandteile bei Personenschäden (Sicht Verkehrsteilnehmende)

	Privat	Extern
Medizinische Heilungskosten	Eigenleistung der VU (Selbstbehalt bei medizinischen Behandlungskosten) sowie Regresszahlungen der Unfallverursacher (VU) an Nicht-Unfallverursacher (NV) für medizinische Behandlung	Rest
Produktionsausfall	– VU: Eigenkonsum der Unfallverursacher, die nicht durch erhaltene Transfers externalisiert werden – NV: Regresszahlung der VU	Basis (VU+NV): Nettoproduktionsausfall (durch Gesellschaft getragen) – Zusätzlich bei VU: Erhaltene Transferleistungen (Externalisierung auf Sozialversicherungsgemeinschaft) – Zusätzlich bei NV: Eigenkonsum abzüglich Regresszahlungen der VU³⁵⁴
Wiederbesetzungskosten	-	100% extern (bei Arbeitgebern)
Administrative Kosten	Administrative Kosten der Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherungen	Administrative Kosten der Sozialversicherungen / Unfallversicherung
Immaterielle Kosten	VU: 100% privat	NV: Immaterielle Kosten <i>abzüglich Direktzahlungen der Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherungen und PW-Insassenversicherungen.</i>

Hinweise: NV = Nicht-Unfallverursacher, VU = Unfallverursacher

14.4.2 Soziale Kostensätze für Personenschäden

Die sozialen Kostensätze für Personenschäden (medizinische Heilungskosten, Bruttoproduktionsausfall, Wiederbesetzungskosten, administrative Kosten und immaterielle Kosten) beruhen auf Daten der SSUV, die durch die Beratungsstelle für Unfallverhütung BFU im Rahmen der Arbeiten zur Schätzung der volkswirtschaftlichen Kosten der Nichtberufsunfälle in der Schweiz³⁵⁵ erhoben werden. Die Kostensätze liegen differenziert nach Geschlecht, für drei Altersklassen (Kinder, Erwachsene und Senioren) sowie nach Verletzungsschwere (Leicht-, Mittelschwer- und Schwerverletzt sowie Invalidität und Todesfall) vor. Für die vorliegende Berechnung der sozialen Unfallkosten im Verkehr wurden die Werte gemäss den in der BFU-Auswertung ermittelten Verletzten nach Altersklasse und Geschlecht gewichtet.

Diese Kostensätze werden im Verkehrsträger Strasse auf das Mengengerüst im Verursacherprinzip angewendet (vgl. Zusammenfassung der Kostensätze in Abschnitt 14.4.5). Das Mengengerüst liegt dazu ebenfalls nach Verletzungsschwere vor.

³⁵⁴ Der Eigenkonsum der NV (nicht-verursachend) ist zunächst extern (aus Sicht Verkehrsteilnehmende). Diese werden über Transfers teilweise auf die Sozialversicherungen übertragen (bleiben extern, jedoch bei einem anderen Kostenträger). Ein Teil dieser Transfers kann über Regress vom VU (verursachend) oder seiner Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherung zurückgefordert werden. Dieser regressierte Teil wird somit wieder auf den VU internalisiert.

³⁵⁵ Niemann et al. (2015), Nichtberufsunfälle in der Schweiz.

Im Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr sowie bei Unfällen in Sport und Freizeit im Fuss- und Veloverkehr werden Korrekturfaktoren auf die Kostensätze im Strassenverkehr angewendet. Dies ist notwendig, weil die Verletzungsschweren anders definiert sind als im Strassenverkehr, teilweise die Erwerbstätigkeit der Opfer bekannt ist (Bedienstete) oder dass sie vom Strassenverkehr abweichende Aufteilungen der Opfer nach Geschlecht und Altersklasse aufweisen.

14.4.3 Externe Anteile der Kostensätze für Personenschäden

Nachfolgend wird für die Personenschäden und die einzelnen Kostenbestandteile die Methodik zur Ermittlung der externen Anteile erläutert.

a) Externe medizinische Heilungskosten

Die Herleitung des externen Anteils an den sozialen medizinischen Heilungskosten ist in der nachstehenden Abbildung dargestellt. Als Ausgangspunkt wird in der ersten Spalte aufgezeigt, wie die medizinischen Heilungskosten finanziert werden:

- Der **Staat** finanziert von den medizinischen Heilungskosten über Beiträge an das Defizit der Spitäler rund 37% der gesamten Kosten. Diese Kosten verbleiben vollumfänglich beim Staat und sind deshalb zu 100% extern.
- Die von den **Sozial- und Privatversicherungsleistungen** finanzierten Leistungen (insgesamt 54.2%) werden bei den Unfallverursachern auf die Allgemeinheit bzw. alle Versicherten überwälzt und sind somit vollumfänglich extern. Bei den Leistungen der Sozial- und Privatversicherungen für Nicht-Unfallverursacher werden die Versicherungen in Normalfall Regress auf die Unfallverursacher nehmen. Gemäss Erfahrungswerten in den Jahren 2009-2011 beläuft sich der Regressanteil auf 92% der ausbezahlten Leistungen, so dass bei den Nicht-Unfallverursachern nur 8% der ausbezahlten Versicherungsleistungen externalisiert werden.
- Die **privaten Haushalte** tragen mit ihren Selbstbehalten ebenfalls zur Finanzierung bei. Die Unfallverursacher werden die Selbstbehalte nicht weiterverrechnen können, so dass sie zu 100% bei ihnen verbleiben. Bei den Nicht-Unfallverursachern besteht theoretisch die Möglichkeit auf die Haftpflichtversicherung der Unfallverursacher Rückgriff zu nehmen. Wir gehen jedoch vereinfachend davon aus, dass dies in der Praxis kaum erfolgt und daher die von den Nicht-Unfallverursachern getragenen Selbstbehalte zu 100% extern sind.

Gewichtet man die einzelnen Finanzierungsanteile mit dem Anteil der durch die Nicht-Verursachenden getragenen Anteile (pro Fall), erhält man für das Jahr 2020 (neuere Daten sind nicht verfügbar) den durchschnittlichen Wert von 50.2% an den medizinischen Heilungskosten, die durch die Nicht-Verursacher (nicht-verursachende Opfer, Staat oder Allgemeinheit) getragen werden. Analog wird für die Verursachenden der Anteil der externen medizinischen Heilungskosten bestimmt. Dieser liegt bei 91.6%, was 100% abzüglich des Selbstbehalts entspricht.

Abbildung 14-18: Kostenträger von medizinischen Heilungskosten (2020)

	Anteil an med. Heilungskosten	Anteil extern Unfall- verursacher	Anteil extern Nicht-Unfall- verursacher
Staat	37.4%	100%	100%
Sozialversicherung	45.8%	100%	8%
Privatversicherung	8.4%	100%	8%
Private Haushalte	8.5%	0%	100%
Total	100.0%	91.6%	50.2%

Quelle: Anteil Heilungskosten: BFS, Kosten und Finanzierung des Gesundheitswesens, Kosten und Finanzierung des Gesundheitswesens nach Leistungserbringern und Finanzierungsregimes 2020

b) Externer Produktionsausfall

Beim Produktionsausfall muss zwischen Bruttoproduktionsausfall, Nettoproduktionsausfall und Eigenkonsum³⁵⁶ unterschieden werden (Bruttoproduktionsausfall = Nettoproduktionsausfall + Eigenkonsum). Die Konzepte hinter diesen Begriffen sind in Kapitel 20.5.3 erläutert. Zudem muss zwischen verursachenden Opfern und nicht-verursachenden Opfern unterschieden werden.

Aus der Sicht Verkehrsteilnehmende sind die Kostenbestandteile gemäss der obigen Zusammenstellung (vgl. Abbildung 14-17 und Abbildung 14-18) extern. Die Herleitung der externen Anteile wird dabei gegenüber der Aktualisierung 2015 grundsätzlich beibehalten, jedoch in einzelnen Punkten im Berechnungsvorgang vereinfacht und stärker formalisiert.

Der Nettoproduktionsausfall wird von der Allgemeinheit getragen und ist sowohl bei den VU als auch bei den NV als extern zu betrachten. Nachfolgend wird nur noch auf den Eigenkonsum eingegangen.

Eigenkonsum der Unfallverursachenden Opfer (VU)

Der Eigenkonsum der VU stellt zunächst einen privaten Kostenbestandteil dar, da er – soweit keine Transferleistungen an die VU fliessen – von ihnen selbst getragen werden muss. Tatsächlich ist es aber so, dass die VU für den (lebensnotwendigen Teil des) Eigenkonsums Transferleistungen der Sozialversicherungen erhalten und in diesem Ausmass der Eigenkonsum der VU letztlich auf die Allgemeinheit überwältzt und externalisiert wird. Die berücksichtigten Transferleistungen sind in der Box weiter unten im Kapitel dokumentiert.

³⁵⁶ Beim Eigenkonsum handelt es sich um die Kosten aus den durch den Einkommensausfall eingeschränkten Konsummöglichkeiten der Unfallopfer und ihrer Angehörigen und damit um den individuell bzw. privat getragenen Teil des Produktionsausfalls. Der Nettoproduktionsausfall widerspiegelt die verminderte Kapitalbildung (entgangener Sparbeitrag), welche der Volkswirtschaft durch den Verlust des Produktionspotentials entsteht. Der Nettoproduktionsausfall wird kollektiv – von der Allgemeinheit – getragen und ist deshalb immer extern.

Die bisherigen Berechnungen zeigen, dass der Eigenkonsum der VU je nach Verletzungsschwere zu 30-100% durch Transferleistungen gedeckt ist³⁵⁷ und sich der Anteil über die Jahre nur aus zwei Gründen verändert:

- Wesentliche Veränderungen im Versicherungssystem (z.B. Rechtsprechung, betragsverändernde Anpassungen in der Renten- und Taggeldberechnung)
- Unterschiedliche nominale Entwicklung beim Eigenkonsum und bei den Transferleistungen: Der Eigenkonsum steigt mit den Konsumausgaben der Bevölkerung. Die Transferleistungen werden mit einem Mischindex aus Teuerung und Nominallohnentwicklung (je 50%-Gewichtung) an die gesamtwirtschaftliche Entwicklung angepasst.

Eigenkonsum der Nicht-Unfallverursachenden Opfer (NV)

Zunächst ist der gesamte Eigenkonsum der NV extern. Sie sind in ihrem Konsum (unverschuldet) eingeschränkt. Sie erhalten zwar Transferleistungen von Sozialversicherungen, diese verändern den externen Betrag nicht, da sie lediglich einen Teil der Last vom NV auf die Sozialversicherung verschieben.

Die Sozialversicherungen können aber einen Teil ihrer Leistungen auf den Unfallverursacher und seine Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherung regressieren (ca. 70-90% der Transfers je nach Verletzungsschwere und Versicherung).³⁵⁸ Dadurch wird dieser regressierte Teil auf den Unfallverursacher verschoben und aus Sicht Verkehrsteilnehmende auch internalisiert. Der extern verbleibende Eigenkonsum entspricht somit dem Eigenkonsum des NV abzüglich der auf den VU regressierten Transferleistungen.

Formale Zusammenfassung

Die externen Produktionsausfälle der VU können berechnet werden als Summe aus Nettoproduktionsausfall und Transfers der Sozialversicherungen für den erlittenen Eigenkonsum, und zwar (ohne Änderungen im Versicherungssystem) über die folgende Formel:

– **Formel:** $NPA + EK * T = NPA + EK * t_0 * (1 + \Delta K - \Delta M)$

– $T =$ Anteil der Transfers der Sozialversicherungen am Eigenkonsum $= t_0 * (1 + \Delta K - \Delta M)$

– mit $NPA =$ Nettoproduktionsausfall, $EK =$ Eigenkonsum, $t_0 =$ Anteile der Transferleistungen am Eigenkonsum im Jahr 2021, $\Delta K =$ Wachstum der Konsumausgaben seit 2021 in %, $\Delta M =$ Entwicklung des Mischindex für Transferleistungen seit 2021 in %

³⁵⁷ Die bisherige Berechnung der externen Kosten (2015) zeigt auf, dass bei den Invaliditätsfällen die Transferleistungen leicht höher sind als der Eigenkonsum. Dies liegt u.a. daran, dass neben Transfers zur Deckung allfälliger Einkommensausfälle auch andere Schäden über Transfers gedeckt werden (z.B. Integritätsentschädigung). In diesem Fall gehen wir vereinfachend davon aus, dass 100% des Eigenkonsums externalisiert wurden, da sonst die Summe aus Nettoproduktionsausfall und Transferleistung höher als der Bruttoproduktionsausfall bzw. als die sozialen Kosten wäre.

³⁵⁸ Im Verkehrsträger Strasse werden als Internalisierungsbeiträge die Zahlungen von Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherungen und Personenwagen-Insassenversicherungen anerkannt. Leistungen von Privathaftpflichtversicherungen bei durch Fussgänger oder Velos verursachten Unfällen gelten nur teilweise (zu 5%) als Internalisierungsbeitrag, da sie nur teilweise innerhalb des Systems «Strassenverkehr» liegen (es sind viele andere Risiken versichert und die Prämie beeinflusst das Verhalten im Strassenverkehr nicht).

Die externen Produktionsausfälle der NV berechnen sich aus dem Nettoproduktionsausfall und dem Eigenkonsum, der betragsmässig nicht auf den VU regressiert werden konnte. Formal ergibt sich folgende Berechnung:

- $NPA + EK * (1 - R) = NPA + EK * (1 - T * r * I) = NPA + EK * (1 - t_0 * (1 + \Delta K - \Delta M) * r * I)$
- $R = \text{Angerechneter Anteil regressierte Transferleistungen am Eigenkonsum} = T * r * I = t_0 * (1 + \Delta K - \Delta M) * r * I$
- mit r = Durchschnittlicher Anteil der regressierten Transferleistungen in %, I = Anrechnung als Internalisierungsbeitrag in % (Anteil der Selbstbehalte an der Schadensumme für über Privathaftpflicht versicherte Fahrzeugkategorien, 100% für alle übrigen)
- Übrige wie oben: NPA = Nettoproduktionsausfall, EK = Eigenkonsum, t_0 = Anteile der Transferleistungen am Eigenkonsum im Jahr 2021 in %, ΔK = Wachstum der Konsumausgaben seit 2021 in %, ΔM = Entwicklung des Mischindex für Transferleistungen seit 2021 in %

Box: Berücksichtigte Transferleistungen

Die folgende Abbildung zeigt die berücksichtigten Transferleistungen nach Verletzungsschwere:

Abbildung 14-19: Berücksichtigte Transferleistungen für Verletzte, Invalide und Todesfälle im Zusammenhang mit Produktionsausfällen sowie Angabe zu den Voraussetzungen zu deren Erhalt

Transferleistung	Verletzte	Invalide	Todesfälle
Invalidenversicherung (IV)			
Taggelder	Erwerbstätige		
Invalidenrente (+ evtl. Ergänzungsleistungen)		Erwachsene und Kinder mit IV-Grad > 40% (endet bei Erreichung des AHV-Alters)	
Hilflosenentschädigung		Hilflosigkeit (bis zur Erreichung des AHV-Alters)	
Alters- und Hinterlassenenversicherung (AHV)			
Waisen-, Witwen- und Witwerrenten (+ evtl. Ergänzungsleistungen)			Verheiratete/geschiedene Erwachsene oder Erwachsene mit Kindern
Unfallversicherung (UVG)			
Taggelder	Erwerbstätige		
Integritätsentschädigung	Erwerbstätige		
Invalidenrente (Komplementärrente)		Erwachsene und Kinder mit IV-Grad > 10%	
Hinterlassenenrente (Komplementär)			Verheiratete/geschiedene Erwachsene oder Erwachsene mit Kindern

Die **Integritätsentschädigung** ist nicht direkt an einen Konsum- und Einkommensausfall gekoppelt. Sie steht vielmehr im Zusammenhang mit immateriellen Kosten (Schmerz und Leid), wird vereinfachend aber ebenfalls bei den Produktionsausfällen berücksichtigt.

c) Externe Immaterielle Kosten

Aus Sicht Verkehrsteilnehmende sind die immateriellen Kosten der Nicht-Unfallverursachenden (NV) extern. Ein Teil dieser Kosten wird durch Direktzahlungen der Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherungen und Personenwagen-Insassenversicherungen internalisiert (siehe Produktionsausfall oben).³⁵⁹ Die übrigen immateriellen Kosten sind wie folgt zu beurteilen.

- VU: Die immateriellen Kosten sind privat, es fallen keine externen Kosten an.
- NV: Die nach Abzug der Direktzahlungen verbleibenden immateriellen Kosten sind extern.

Die **Direktzahlungen** lassen sich wie folgt berechnen:

- Leistungen Mfz-Haftpflicht für Personenschäden + Leistungen-Insassenversicherung – Regresszahlung an Sozialversicherungen für Produktionsausfall – Regresszahlung an Unfallversicherungen für Heilungskosten

d) Externe Wiederbesetzungskosten

Die Wiederbesetzungskosten fallen bei den Unternehmen an und sind vollständig extern.

e) Externe Administrative Kosten

Die Administrativen Kosten der Sozialversicherungen / Unfallversicherung im Zusammenhang mit der Behandlung von Verkehrsunfällen sind extern.

Die Administrativkosten der Motorfahrzeug-Haftpflicht-, Kasko- und Personenwagen-Insassenversicherung sind demgegenüber privat, weil die Aufwendungen über die Prämienleistungen der versicherten Motorfahrzeuge finanziert werden.

14.4.4 Kostensätze für übrige Kostenbestandteile

a) Sachschäden

Für die **Sachschäden** werden wie bisher durchschnittliche Kostensätze (inkl. Dunkelziffer) pro polizeilich registrierten Unfall ermittelt. Als Grundlage dienen die Leistungen der Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherungen für Sachschäden.

Zusätzlich werden für die Sachschäden an verursachenden Fahrzeugen (inkl. Selbstunfälle) die **Eigenleistungen der Verursacher** und Leistungen der Kollisionskasko-Versicherungen geschätzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Höhe der Sachschäden pro Fahrzeug unabhängig von der Verursachung und von der Zahl der beteiligten Fahrzeuge ist. Es wird also angenommen, dass im Durchschnitt der Sachschaden bei verursachenden Fahrzeugen gleich hoch ist wie bei nicht-verursachenden Fahrzeugen.

³⁵⁹ Bisher bestand bei Berücksichtigung der Direktzahlungen beim Produktionsausfall eine starke Überdeckung des Eigenkonsums der NUV. Der «Überlauf» wurde dabei den immateriellen Kosten als Internalisierung angerechnet.

Im Strassenverkehr sind praktisch bei allen Fahrzeugkategorien die gesamten Sachschäden private Kosten, da sie entweder durch den Verursacher direkt oder seine Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherung bezahlt werden.

Bei Fussgängern, fäG, Velos und Pedelets werden Sachschäden durch die (nicht obligatorische) Privathaftpflichtversicherung gedeckt. Da diese keinen direkten Einfluss auf das Risiko der «Verkehrsteilnahme» haben (kein Bonus-Malus-System bei Prämien) werden deren Leistungen nur gemäss Anteil des Selbstbehalts der Verursacher als Internalisierung angerechnet.

Im Schienenverkehr sind die durch den Personen- und Güterverkehr verursachten Sachschäden private Kosten. Bei den durch Dritte verursachten Sachschäden ist jedoch ein grosser Teil der Kosten extern, da es sich bei den Verursachern oft um Privatpersonen / Fussgänger handelt. Diese Schäden sind (abgesehen vom Selbstbehalt) durch deren Privathaftpflichtversicherung gedeckt. Diese Beiträge gelten daher nicht als Internalisierungsbeitrag.

b) Polizei- und Rechtsfolgekosten

Für die **Polizei- und Rechtsfolgekosten** wird wie bisher auf Fallkosten gemäss drei kantonalen Polizeikörpers (Bern, Luzern und Uri) sowie bei Rechtsschutzversicherungen abgestellt. Die Werte stammen aus dem Jahr 2014 und werden wie bisher über die Nominallohnentwicklung auf das Jahr 2021 aufdatiert.

Der Anteil der externen Kosten beruht auf einer groben Schätzung des Anteils, der an die Verursacher weiterverrechnet werden kann. Bei Polizeikosten im Strassenverkehr gelten demnach 70% der Kosten als extern. Bei den übrigen Verkehrsträgern beträgt der externe Anteil 85%.³⁶⁰ Bei den Rechtsfolgekosten liegt der Anteil extern bei 80%.

c) Administrativkosten der Motorfahrzeug- und Rechtsschutzversicherungen

Die **Administrativkosten** der Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherungen, Kaskoversicherungen und Haftpflichtversicherungen bei Sachschäden werden auf Basis der von ihnen erbrachten Leistungen für Sachschäden berechnet. Dafür wird ein Anteil der Administrativkosten von 35% der Leistungssumme verwendet. Dieser Wert basiert auf der Betriebskostenquote (Cost Ratio³⁶¹) und dem Anteil der Leistungen an den Prämieinnahmen (Claims Ratio³⁶²) im Nicht-Leben- und Schadensgeschäft der Jahre 2005 bis 2012 verschiedener Versicherungsgesellschaften sowie der Finanzmarktaufsicht (FINMA).³⁶³ Bei Rechtsschutzversicherungen beträgt der angenommene Anteil wie bisher 22.5% der erbrachten Leistungen.

³⁶⁰ 15% können dem Verursacher weiterverrechnet werden. Im Strassenverkehr werden weitere 15% über die Strassenrechnung internalisiert.

³⁶¹ Cost Ratio = Aufwendungen für den Versicherungsbetrieb für eigene Rechnung und Aufwendungen für die Verwaltung von Kapitalanlagen im Verhältnis zu den verdienten Bruttoprämien.

³⁶² Claims Ratio = Aufwendungen für Versicherungsfälle (brutto) im Verhältnis zu den verdienten Bruttoprämien.

³⁶³ Das Verhältnis zwischen Leistungen und Kosten ergibt sich dabei aus der Division der Cost Ratio durch die Claims Ratio. Berücksichtigte Versicherungen (Nicht-Leben): Mobiliar, Bâloise, Helvetia, Vaudoise, Allianz Suisse, Generali,

Die administrativen Kosten der **Kaskoversicherungen** und der **Rechtsschutzversicherungen** sind alle privat, da mit den Prämien der Verursacher das Risiko der Verkehrsteilnahme berücksichtigt ist.

Die Administrativkosten der **Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherungen** für Leistungen an die Nicht-Unfallverursachenden sind grundsätzlich privat, da mit den risikoabhängigen Prämien das Risiko der «Verkehrsteilnahme» angemessen berücksichtigt wird. Bei den Kategorien Fussgänger, fäG, Velo und Pedelecs werden grösstenteils als extern betrachtet, da nur ein kleiner Teil der Schäden in Form von Eigenleistungen durch die Verursacher getragen werden (der Rest wird auf die Gesamtheit der Privathaftpflichtversicherten externalisiert).

14.4.5 Zusammenfassung der Kostensätze

a) Strassenverkehr

Die folgende Abbildung fasst die Kostensätze für Personenschäden im Strassenverkehr zusammen. Bei den externen Sätzen handelt es sich um indikative Mittelwerte über alle Opfer. In der Bottom-up Ermittlung der externen Kosten werden die externen Anteile nach verursachenden und nicht-verursachenden Opfern differenziert.

Abbildung 14-20: Soziale und Externe Kostensätze für Personenschäden im Strassenverkehr

Soziale Kosten	Medizinische Heilungskosten	Produktions- ausfall	Wiederbe- setzungskosten	Administrativ- kosten	Immaterielle Kosten	Total
Getötete	57'506	1'096'713	19'922	207'794	5'983'139	7'365'074
Invalide	214'530	657'863	26'460	845'784	2'258'062	4'002'699
Schwerverletzte	41'940	45'632	-	59'963	1'272'672	1'420'207
Mittelschwerverletzte	12'026	10'240	-	11'967	250'362	284'594
Leichtverletzte	1'911	995	-	1'326	26'079	30'311

Externe Kosten	Medizinische Heilungskosten	Produktions- ausfall	Wiederbe- setzungskosten	Administrativ- kosten	Immaterielle Kosten	Total
Getötete	43'629	658'373	19'922	108'926	2'273'593	3'104'442
Invalide	178'981	582'384	26'460	434'416	445'639	1'667'880
Schwerverletzte	34'990	29'114	-	29'449	251'168	344'721
Mittelschwerverletzte	10'033	6'351	-	5'956	49'410	71'750
Leichtverletzte	1'550	585	-	655	6'602	9'392

Die verwendeten Kostensätze für Sachschäden im Strassenverkehr sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Kostensätze sind pro polizeilich registriertem Unfall definiert. Sachschäden

Helvetia, Nationale Suisse. Für Schadenversicherungen liegen nur Werte der FINMA aus den Jahren 2005 bis 2007 vor. Diese Schadenversicherer wiesen damals im Durchschnitt rund 5% tiefere Kostenanteile aus, als die Nicht-Leben-Versicherungen. Der Mittelwert der Nicht-Leben-Versicherungen im Jahr 2010 bis 2012 liegt bei rund 40%. Es wird gemäss dem at least Ansatz der mittlere Wert bei den Nicht-Leben-Versicherungen abzüglich der Differenz zwischen Nicht-Leben- und Schaden-Versicherungen aus früheren Jahren (40% - 5% = 35%) verwendet.

verursacht durch den Fuss- und Veloverkehr sind grösstenteils extern, da sie nur im Rahmen des Selbstbehalts vom Verursacher getragen werden bzw. nicht über eine Motorfahrzeug-Haftpflichtversicherung gedeckt sind (deren Leistungen als Internalisierungsbeitrag gelten).

Abbildung 14-21: Sachschäden im Strassenverkehr pro verursachten polizeilich registrierten Unfall (2021) in CHF

Soziale Kosten	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	Tra / Arbm
Sachschaden	24'387	46'673	5'858	5'907	5'907	3'744	1'580	2'047	592	81'250	160'743	155'501	48'131	15'608	11'553	24'520

Externe Kosten	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	Tra / Arbm
Sachschaden	-	-	-	-	-	3'500	1'477	1'913	553	-	-	-	-	-	-	-

Die Kostensätze 2021 für Polizeikosten (953 CHF soziale Kosten bzw. 667 CHF externe Kosten) und Rechtsfolgekosten (5'862 CHF soziale Kosten bzw. 2'634 CHF externe Kosten) gelten pro polizeilich registrierten Unfall und sind per Annahme unabhängig vom verursachenden Verkehrsmittel.

b) Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr

Im Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr sind die sozialen Kosten eines Bediensteten im Durchschnitt höher als bei Reisenden und Dritten, weil es sich in jedem Fall um Erwerbstätige handelt. Die medizinischen Heilungskosten sind unabhängig von der Erwerbstätigkeit der Verletzten.

Abbildung 14-22: Personenschäden: Soziale Kosten und indikative Mittelwerte der externen Kosten pro Unfall-opfer nach Verletzungsschwere in CHF (externe Kosten: im Detail wird nach Verursachenden und nicht-verursachenden unterschieden, je nach Verkehrsträger und Typ)

Soziale Kosten	Medizinische Heilungskosten	Produktions-ausfall	Wiederbe-setzungskosten	Administrativ-kosten	Immaterielle Kosten	Total
Reisende						
Getötete	57'506	1'096'713	19'922	207'794	5'983'139	7'365'074
Schwerverletzte	41'176	57'480	911	75'123	1'029'954	1'204'644
Leichtverletzte	1'911	995	-	1'326	69'545	73'777
Bedienstete						
Getötete	57'506	1'497'079	28'185	265'575	6'722'909	8'571'254
Schwerverletzte	41'176	71'069	1'212	85'047	863'845	1'062'349
Leichtverletzte	1'911	1'209	-	1'424	69'545	74'088
Dritte						
Getötete	57'506	1'096'713	19'922	207'794	5'983'139	7'365'074
Schwerverletzte	41'176	57'480	911	75'123	1'029'954	1'204'644
Leichtverletzte	1'911	995	-	1'326	69'545	73'777

Externe Kosten	Medizinische Heilungskosten	Produktions-ausfall	Wiederbe-setzungskosten	Administrativ-kosten	Immaterielle Kosten	Total
Reisende						
Getötete	24'153	318'047	19'922	207'794	4'966'005	5'535'920
Schwerverletzte	16'470	17'819	911	72'869	988'756	1'096'825
Leichtverletzte	764	308	-	1'287	68'849	71'209
Bedienstete						
Getötete	34'887	480'981	28'185	261'764	4'061'386	4'867'204
Schwerverletzte	24'705	30'382	1'212	82'496	499'706	638'501
Leichtverletzte	1'146	593	-	1'381	45'900	49'020
Dritte						
Getötete	24'153	318'047	19'922	207'794	4'966'005	5'535'920
Schwerverletzte	16'470	17'819	911	72'869	988'756	1'096'825
Leichtverletzte	764	308	-	1'287	68'849	71'209

Bei den externen Kosten handelt es sich um indikative Durchschnittswerte. In der Berechnung variieren die Anteile der externen Kosten an den sozialen Kosten, je nach Einstufung des Opfers als verursachend oder nicht-verursachend. So sind bei verursachenden Opfern insbesondere die immateriellen Kosten vollständig intern. Insbesondere Bedienstete in der General Aviation sowie Reisende und Dritte in der Verursacherkategorie «Dritte» im Schienenverkehr gelten als unfallverursachende Opfer.

Die Sachschäden im Schienenverkehr werden direkt aus der NEDB ermittelt (im Sinne eines «Best guess»). Im Schiffsverkehr wurde basierend auf dem Kostensatz von Planco und BfG (2007) für das Jahr 2021 über die Fortschreibung mittels des Konsumentenpreisindex ein Kostensatz von rund 39'380 CHF pro Unfall (2021) ermittelt.³⁶⁴ Im Luftverkehr gelten die folgenden Kostensätze nach Luftfahrzeugtyp.

³⁶⁴ Vgl. Planco und BfG (2007)

Abbildung 14-23: Sachschäden im Luftverkehr nach Luftfahrzeugtyp in CHF

	Flugzeuge bis 2250 kg MTOM	Flugzeuge von 2250 bis 5700 kg MTOM	Flugzeuge mehr als 5700 kg MTOM	Fahrzeuge des Linien und Charter- verkehrs	Helikopter	Motorsegler & Segel- flugzeuge
Sachschaden pro Unfall	75'000	600'000	4'500'000	6'000'000	875'000	75'000

Quelle: ASCEND-Datenbank und Daten AXA-Winterthur Versicherung

c) Sport & Freizeit im Fuss- und Veloverkehr auf öffentlichen Strassen und Plätzen

Die resultierenden Kostensätze für Todesfälle in Sport und Freizeit im Fuss- und Veloverkehr sind deutlich tiefer als im Strassenverkehr, weil es sich hierbei meist um ältere Personen handelt.

Bei diesen Unfällen handelt es sich vollständig um unfallverursachende Verletzte, weil es sich in der Regel um Alleinunfälle ohne Beteiligung von weiteren Personen oder Fahrzeugen handelt.

Abbildung 14-24: Kostensätze für Unfälle bei Sport und Freizeit im Fuss- und Veloverkehr (nur Personenschäden) in CHF

Soziale Kosten	Medizinische Heilungskosten	Produktions- ausfall	Wiederbe- setzungskosten	Administrativ- kosten	Immaterielle Kosten	Total
Getötete	57'506	63'196	2'339	207'794	1'670'320	2'001'155
Invalide	214'530	152'654	3'106	845'784	630'386	1'846'460
Schwerverletzte	41'940	45'632	-	59'963	1'272'672	1'420'207
Mittelschwerverletzte	12'026	10'240	-	11'967	250'362	284'594
Leichtverletzte	1'911	995	-	1'326	26'079	30'311

Externe Kosten	Medizinische Heilungskosten	Produktions- ausfall	Wiederbe- setzungskosten	Administrativ- kosten	Immaterielle Kosten	Total
Getötete	57'506	63'196	2'339	196'490	-	319'531
Invalide	214'530	82'238	-	472'169	-	768'937
Schwerverletzte	41'940	28'015	-	30'002	-	99'956
Mittelschwerverletzte	12'026	6'590	-	5'988	-	24'603
Leichtverletzte	1'911	995	-	1'254	-	4'160

14.5 Vorgehen bei Differenzierungen

Für die Unfallkosten waren im Strassenverkehr Differenzierungen nach Antriebsart und nach Kanton vorgesehen, im Schienenverkehr nach Kanton. Diese Differenzierungen wurden grundsätzlich über eine Verteilung der Kosten über die Fahrleistungen vorgenommen, jedoch mit folgenden Anpassungen:

- Im Strassenverkehr werden die Fahrleistungen innerorts, ausserorts und auf Autobahnen unterschiedlich gewichtet, um Unterschiede in den Unfallraten annäherungsweise abzubilden.³⁶⁵ Diese Gewichtung spielt aktuell nur bei der Differenzierung nach Kanton eine Rolle, da dort aussagekräftige Verteilungen auf diese Strassentypen vorliegen. Bei der Differenzierung nach Antriebsart liegen hingegen keine nach Antriebsart differenzierten Angaben zur Verteilung auf die Strassentypen vor, weshalb die Gewichtung dort keine Rolle spielt.
- Bei der Differenzierung nach Antriebsart wurden die Kategorien Fuss, Velo und fäG vollständig der Muskelkraft zugewiesen. Für die Kategorie Traktor/Arbeitsmaschinen liegt keine Aufteilung der Fahrzeugkilometer nach Antriebsart vor, weshalb vereinfachend ein Anteil fossil von 100% angenommen wurde. Diese Fahrzeugkategorie wird nur im Unfallbereich berücksichtigt, weshalb die Verteilung der Gesamtkosten von anderen Kostenbereichen abweicht.

Eine direkte Zuteilung der Unfälle im Strassenverkehr auf die Kantone wäre nur für die polizeilich registrierten Unfallopfer möglich, für eine Differenzierung nach Antriebsart fehlen Angaben in den Unfalldaten des ASTRA. Für die nicht registrierten Verletzten, die den Grossteil der Unfälle ausmachen fehlen sowohl Angaben zum Kanton als auch zur Antriebsart. Bei den polizeilich registrierten Unfällen besteht zudem die Vermutung, dass sich regionale Unterschiede bei der Erhebung der Verkehrsunfälle oder in der Herbeirufung der Polizei an den Unfallort in den Daten manifestieren. Aus diesem Grund ist von einer regional unterschiedlichen Dunkelziffer auszugehen. Eine Verteilung auf Basis der polizeilich registrierten Unfälle würde daher ein verzerrtes Bild der tatsächlichen Situation ergeben.

14.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

Gemäss dem verwendeten Top-Down-Ansatz werden für die Unfallkosten nur die Durchschnittskosten berechnet. Auf eine Ermittlung der Grenzkosten wird verzichtet.

Gemäss EU Handbook lassen sich die marginalen externen Unfallkosten auf Basis eines Bottom-Up-Ansatzes ermitteln. Die Berechnung stützt sich dabei auf Abschätzungen zum Risiko (Unfallwahrscheinlichkeit * externe Kosten im Schadenfall) sowie auf die Veränderung des Risikos bei Veränderung des Verkehrsaufkommens (Risikoelastizität).

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die marginalen Kosten meist kleiner sind als die Durchschnittskosten, und je nach Annahme zur Internalisierung des Risikos sogar negativ sein können. Die marginalen externen Unfallkosten (pro Fahrzeugkategorie) hängen dabei von vielen Faktoren ab:

- **Gesamtverkehrsaufkommen:** Bei tiefem Verkehrsaufkommen erhöht sich die Unfallrate mit zusätzlichen Verkehrsteilnehmenden, ab einem gewissen Niveau reduziert sich jedoch die Geschwindigkeit und auch die Unfallrate.

³⁶⁵ Für die Aufteilung nach Kanton wird die Gewichtung der Fahrzeugkilometer aus der Norm VSS 41 824 zu übernehmen: Innerortsstrecken werden mit dem Faktor 10, Ausserortsstrecken mit dem Faktor 5 gewichtet. Für Autobahnstrecken gilt der Faktor 1.

- **Verkehrsaufkommen der verschiedenen Fahrzeugkategorien:** Fahrzeugkategorien verfügen über unterschiedliche Gefahren- und Schadenpotenziale, abhängig von Masse, Geschwindigkeit und Schutzvorkehrungen.
- **Betrachteter Raum- und Infrastrukturtyp:** Die Risiken variieren mit den Fahrzeugkategorien und die zugelassenen Fahrzeugkategorien variieren nach Strassentyp (kein Velo- und Fussverkehr auf Autobahnen), weshalb auch das Verkehrsaufkommen pro Fahrzeugkategorie mit dem Raumtyp variiert (mehr Velos und Fussgänger im städtischen Raum innerorts als im ländlichen Raum ausserorts). Zudem gelten auf Autobahnen und Ausserortsstrassen meist höhere Geschwindigkeiten als innerorts.
- **Qualität der Verkehrsinfrastruktur:** Eine unübersichtliche Strecke oder eine Strasse in schlechtem Zustand kann zur Variation des Unfallrisikos beitragen.

Für die Schweiz wurden für das Jahr 1998 letztmals marginale externe Unfallkosten für 6 Fahrzeugkategorien (ohne Velos und Fussgänger) sowie 3 Strassentypen ermittelt. Je nach Annahme zur Internalisierung des Risikos sind die marginalen externen Kosten negativ oder positiv. Wird angenommen, dass das durchschnittliche Risiko internalisiert wird, sind die Werte negativ. Wird das durchschnittliche Risiko nicht internalisiert, sind die marginalen Kosten positiv. Ebenfalls positiv sind die externen marginalen Kosten, wenn sämtliche vom Verursacher getragenen Kosten als privat angenommen werden (analog zum Verursacherprinzip in der vorliegenden Studie).

14.7 Ergebnisse

14.7.1 Externe Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende

a) Überblick Gesamtverkehr

Die folgende Abbildung gibt eine Übersicht der externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende, differenziert nach Verkehrsträger und nach Personen- und Güterverkehr. Fast 99% der Gesamten Kosten (4'484 Mio. CHF) entfallen auf den Strassenverkehr (4'426 Mio. CHF). Eine ähnlich deutliche Verteilung findet sich bei Betrachtung des Personen- und Güterverkehrs. Knapp 90% oder 4 Mrd. CHF der externen Kosten entfallen auf den Personenverkehr, die restlichen 476 Mio. CHF auf den Güterverkehr.

Abbildung 14-25: Überblick über die externen Unfallkosten 2021 aus Sicht Verkehrsteilnehmende

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr		3'963.3	462.3	4'425.6	98.7%
Schienenverkehr		23.9	11.9	35.9	0.8%
Luftverkehr		21.2	0.7	21.8	0.5%
Schiffsverkehr		0.2	0.8	1.0	0.0%
Total		4'008.6	475.7	4'484.3	100.0%
in % des Totals		89.4%	10.6%	100.0%	

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Sport & Freizeit (Velo, fäG, Fuss)		418.6	-	418.6	8.5%
Total		4'427.2	475.7	4'902.8	100.0%

Wird der Bereich Sport & Freizeit im Fuss- und Veloverkehr ebenfalls berücksichtigt, fallen zusätzliche 375 Mio. CHF an, was die Gesamtkosten auf 4'859 Mio. CHF erhöht. Der Bereich Sport & Freizeit auf öffentlichen Strassen und Plätzen trägt 8% zu den gesamten externen Kosten bei.

b) Strassenverkehr

Wie oben dargestellt, entstehen im Strassenverkehr aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden externe Kosten in Höhe von etwas mehr als 4.4 Mrd. CHF (ohne Sport- und Freizeitunfälle). In der folgenden Abbildung ist die Aufteilung dieser Kosten auf die Fahrzeugkategorien dargestellt. Knapp 2.6 Mrd. CHF (59% - ohne Berücksichtigung von Sport & Freizeit) sind auf die Personenwagen, etwa 518 Mio. CHF (12%) auf die Velos, 477 Mio. CHF (11%) auf die Motorräder und 218 Mio. CHF (5%) auf die Lieferwagen zurückzuführen. Der motorisierte private Personenverkehr ist damit der bedeutendste Verursacher von externen Unfallkosten (71%), gefolgt vom Fuss- und Veloverkehr (17%). Im Güterverkehr fallen Kosten von 462 Mio. CHF (10%) an und im öffentlichen Personenverkehr rund 63 Mio. CHF (1%).

In der Abbildung 14-27 ist zudem ersichtlich, wie sich die externen Kosten auf die einzelnen Kostenarten aufteilen. Personenschäden sind für 4.2 Mrd. CHF oder 96% der externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende (ohne Sport & Freizeit) verantwortlich. Wichtiger Bestandteil der Personenschäden sind insbesondere die immateriellen Kosten, die allein 65% der Gesamtkosten ausmachen. Externe Sachschäden fallen einzig beim Fuss- und Veloverkehr an, weil diese nur im Ausmass des Selbstbehalts bei Abwicklung über Privathaftpflichtversicherungen internalisiert werden, machen aber weniger als 0.1% (4.1 Mio. CHF) der Gesamtkosten aus. Etwas weniger als 4% (172 Mio. CHF) sind auf Polizei- und Rechtsfolgekosten zurückzuführen.

Abbildung 14-26: Externe Unfallkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Strassenverkehr 2021 nach Fahrzeugkategorien

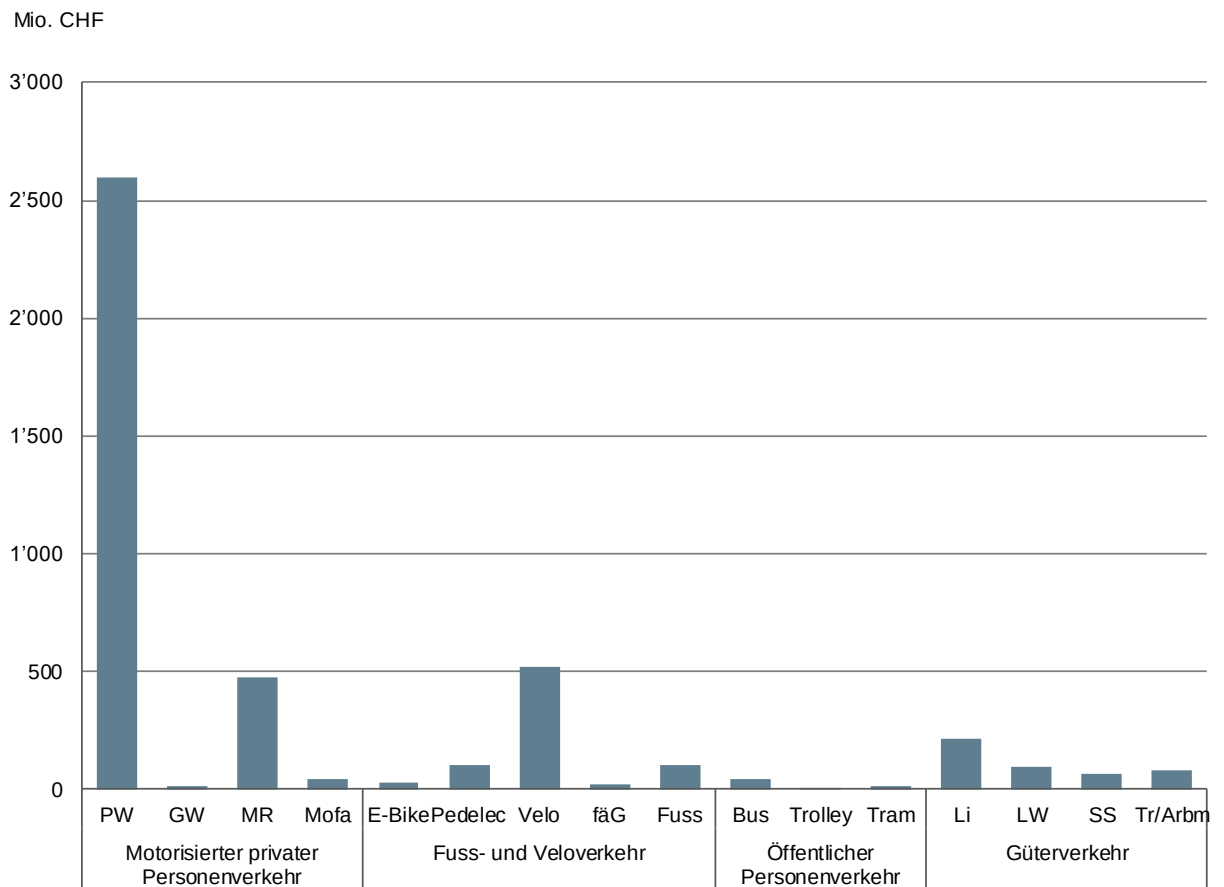


Abbildung 14-27: Externe Unfallkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Strassenverkehr 2021 nach Kostenart und Fahrzeugkategorie

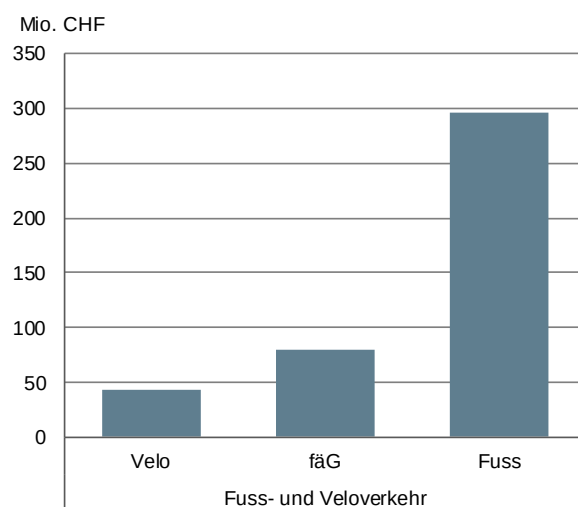
	Personenverkehr										Güterverkehr				Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr							
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	Tr/Arbm	
Personenschäden	2'472.5	16.7	466.5	38.5	24.6	95.2	508.6	20.6	103.4	43.2	5.4	14.0	204.7	94.4	65.4	75.2	4'249.1
Medizinische Heilungskosten	97.4	0.4	89.9	8.8	6.0	25.2	164.7	4.4	26.4	0.9	0.1	0.3	6.1	1.8	0.7	7.4	440.6
Produktionsausfall	162.6	0.4	105.6	8.3	5.6	27.9	141.5	4.0	27.6	1.1	0.1	0.4	10.9	9.1	7.0	9.4	521.7
Wiederbesetzungskosten	3.3	0.0	2.1	0.1	0.1	0.6	2.1	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1	0.2	9.6
Administrativkosten	104.0	0.5	77.8	6.9	4.8	20.6	124.4	3.5	21.5	1.2	0.2	0.4	7.0	2.6	1.3	6.6	383.2
Immaterielle Kosten	2'105.1	15.4	191.0	14.4	8.2	20.9	75.9	8.7	27.4	39.9	5.0	12.9	180.4	80.7	56.1	51.7	2'893.9
Sachschäden	-	-	-	-	-	2.0	1.8	0.2	0.2	-	-	-	-	-	-	-	4.1
Sachschäden	-	-	-	-	-	1.5	1.3	0.1	0.1	-	-	-	-	-	-	-	3.1
Administrativkosten	-	-	-	-	-	0.5	0.5	0.1	0.0	-	-	-	-	-	-	-	1.1
Polizei- und Rechtsfolgekosten	123.3	0.4	10.4	1.4	0.7	3.4	7.5	0.6	1.5	0.6	0.0	0.1	13.1	4.1	2.9	2.4	172.4
Polizeikosten	24.9	0.1	2.1	0.3	0.1	0.7	1.5	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	2.6	0.8	0.6	0.5	34.8
Rechtsfolgekosten	98.4	0.3	8.3	1.1	0.5	2.7	6.0	0.5	1.2	0.5	0.0	0.1	10.5	3.3	2.3	1.9	137.6
Administrativkosten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total Fahrzeugkategorien	2'595.8	17.1	477.0	39.9	25.3	100.6	517.8	21.4	105.0	43.9	5.5	14.1	217.8	98.5	68.3	77.6	4'425.6
in % des Gesamttotals	58.7%	0.4%	10.8%	0.9%	0.6%	2.3%	11.7%	0.5%	2.4%	1.0%	0.1%	0.3%	4.9%	2.2%	1.5%	1.8%	100.0%
Total Teilbereiche	3'129.7				770.2					63.4			462.3				4'425.57
in % des Gesamttotals	70.7%				17.4%					1.4%			10.4%				100.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrgähähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tr = Traktor, Arbm = Arbeitsmaschine
Hinweis: «0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «-» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt auch für alle folgenden Abbildungen.

Separate Betrachtung Bereich Sport & Freizeit im Fuss- und Veloverkehr

Im Bereich Sport- und Freizeit kommen nur die drei Verkehrsmittel Fuss, fäG und Velo vor. Die fäG tragen 79 Mio. CHF (1.6%) und der Veloverkehr 43 Mio. CHF (0.9%) zu den Gesamtkosten bei. Am meisten externe Kosten verursacht hier der Fussverkehr, mit 297 Mio. CHF (wobei die im Methodikkapitel erwähnten Unsicherheiten in der Abgrenzung bestehen). Gemessen an den Gesamtkosten inkl. Sport & Freizeit von rund 4.9 Mrd. CHF, entspricht dies 8.5%.

Abbildung 14-28: Externe Unfallkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende 2021, Sport & Freizeit im Fuss- und Veloverkehr, nach Fahrzeugkategorien



	Personenverkehr			Gesamt- total
	Fuss- und Veloverkehr			
in Mio. CHF	Velo	fäG	Fuss	
Personenschäden	42.8	79.4	296.5	418.6
Medizinische Heilungskosten	18.4	35.2	119.5	173.1
Produktionsausfall	11.1	20.5	73.5	105.1
Wiederbesetzungskosten	0.0	-	0.3	0.3
Administrativkosten	13.3	23.6	103.2	140.1
Immaterielle Kosten	-	-	-	-
Total Fahrzeugkategorien	42.8	79.4	296.5	418.6
in % des Gesamttotals	0.9%	1.6%	6.0%	8.5%
Total Teilbereiche				418.6
in % des Gesamttotals				8.5%

fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Velo = Veloverkehr

fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Velo = Veloverkehr

Differenzierung nach Antriebsarten

Die Aufteilung auf die Antriebsarten erfolgte Top-Down auf Basis der Fahrzeugkilometer nach Antriebsart und Fahrzeugkategorie, ist also mit angemessener Vorsicht zu interpretieren. Dennoch lassen sich einige Tendenzen aufzeigen: Die Grossmehrheit der gesamten externen Kosten des Strassenverkehrs sind auf Fahrzeuge mit fossilem Antrieb zurückzuführen, konkret knapp 3.6 Mrd. CHF oder 81%. Einen wesentlichen Teil leisten im Unfallbereich jedoch auch die mit Muskelkraft getriebenen Kategorien Velo (517 Mio. CHF), fäG (21 Mio. CHF) und der Fussverkehr (105 Mio. CHF): Mit insgesamt 644 Mio. CHF sind sie für knapp 15% der externen Unfallkosten verantwortlich. Elektrofahrzeuge verursachen gemäss ihrem Anteil an der Fahrleistung Kosten von 175 Mio. CHF (4%), wobei 126 Mio. CHF auf Pedelec und E-Bike zurückzuführen sind und nur 26 Mio. CHF auf Personenwagen (und 20 Mio. CHF auf Trams und Trolleybusse).

Abbildung 14-29: Externe Unfallkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende 2021, Strassenverkehr ohne Sport & Freizeit, nach Fahrzeugkategorien und Antriebsart

	Personenverkehr										Güterverkehr				Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr								
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW		SS	Tr/Arbm
Fossil	2'547.5	17.1	474.9	39.9	-	-	-	-	-	42.5	-	-	215.9	98.1	68.0	77.6	3'581.5
Elektrisch	25.5	0.0	2.1	-	25.3	100.6	-	-	-	0.6	5.5	14.1	1.3	0.1	0.1	-	175.2
Rest	22.7	-	-	-	-	-	-	-	-	0.7	-	-	0.7	0.3	0.2	-	24.7
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	517.8	21.4	105.0	-	-	-	-	-	-	-	644.2
Total	2'595.8	17.1	477.0	39.9	25.3	100.6	517.8	21.4	105.0	43.9	5.5	14.1	217.8	98.5	68.3	77.6	4'425.6
Anteil Fossil	98.1%	99.9%	99.6%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	96.9%	0.0%	0.0%	99.1%	99.6%	99.6%	100.0%	80.9%
Anteil Elektrisch	1.0%	0.1%	0.4%	0.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.4%	100.0%	100.0%	0.6%	0.1%	0.1%	0.0%	4.0%
Anteil Rest	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.7%	0.0%	0.0%	0.3%	0.3%	0.3%	0.0%	0.6%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	14.6%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tr = Traktor, Arbm = Arbeitsmaschine

Differenzierung nach Kantonen

Die folgende Abbildung stellt die Aufteilung der externen Unfallkosten auf die Kantone dar, differenziert nach Verkehrsmittel.³⁶⁶ Die Aufteilung erfolgte Top-Down über die Fahrzeugkilometer pro Verkehrsmittel und Kanton, mit unterschiedlicher Gewichtung von Strecken innerorts, ausserorts und auf Autobahnen. Erwartungsgemäss folgen die Kostenanteile auch hier den Bevölkerungsanteilen der Kantone. In Zürich betragen die externen Unfallkosten im Strassenverkehr 715 Mio. CHF, im Kanton Bern 551 Mio. CHF. In den Kantonen Waadt und Aargau entstehen je rund 385 Mio. CHF der externen Kosten.

³⁶⁶ Ohne Traktoren und Arbeitsmaschinen, für die im NPVM keine Daten zur Aufteilung auf die Kantone vorliegen.

Abbildung 14-30: Externe Unfallkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende 2021, Strassenverkehr ohne Sport & Freizeit, nach Fahrzeugkategorien und Kanton

in Mio. CHF	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total	
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr		Li	LW	SS		
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)					Tram
Zürich	404.4	3.0	74.3	8.7	5.5	21.9	99.7	4.0	19.7	8.5	5.6	33.4	17.2	8.8	714.9
Bern	336.1	2.4	61.8	4.6	2.9	11.7	61.6	2.3	11.5	5.2	1.5	27.7	13.6	8.4	551.2
Luzern	143.5	1.0	26.4	1.7	1.1	4.2	20.7	0.9	4.2	3.0	-	11.3	6.0	5.0	229.0
Uri	15.3	0.2	2.8	0.1	0.1	0.3	1.8	0.1	0.3	0.4	-	1.4	0.9	1.2	24.9
Schwyz	57.3	0.3	10.5	0.5	0.3	1.1	6.9	0.3	1.7	0.8	-	4.5	1.8	1.2	87.2
Obwalden	9.6	0.1	1.8	0.1	0.1	0.2	1.5	0.1	0.4	0.1	-	1.0	0.4	0.1	15.4
Nidwalden	12.0	0.1	2.2	0.1	0.1	0.3	1.8	0.1	0.4	0.2	-	1.2	0.7	0.5	19.8
Glarus	12.7	0.1	2.3	0.1	0.1	0.3	2.1	0.1	0.5	0.2	-	1.3	0.8	0.5	21.3
Zug	37.4	0.2	6.9	0.6	0.4	1.5	7.6	0.4	1.9	1.0	-	3.4	1.0	0.5	62.7
Freiburg	97.6	0.6	17.9	1.3	0.8	3.3	17.0	0.6	3.0	1.3	-	6.6	3.5	2.7	156.3
Solothurn	89.4	0.9	16.4	1.1	0.7	2.9	16.4	0.6	3.1	1.6	0.1	7.8	5.0	4.0	149.9
Basel-Stadt	30.9	0.2	5.7	1.1	0.7	2.9	16.0	0.7	3.4	1.5	2.5	2.2	1.2	0.7	69.6
Basel-Landschaft	76.7	0.6	14.1	1.4	0.9	3.5	18.8	0.7	3.6	1.4	1.4	7.6	3.6	2.8	137.2
Schaffhausen	22.1	0.1	4.1	0.3	0.2	0.7	4.4	0.2	1.0	0.6	-	2.0	0.8	0.6	37.1
Appenzell A.Rh.	18.6	0.1	3.4	0.2	0.1	0.6	2.7	0.1	0.4	0.2	-	1.5	0.5	0.2	28.6
Appenzell I.Rh.	4.5	0.0	0.8	0.1	0.0	0.1	0.8	0.0	0.1	0.0	-	0.4	0.1	0.1	7.1
St. Gallen	175.4	1.1	32.2	2.1	1.3	5.3	30.1	1.2	5.8	3.6	-	15.2	6.3	4.7	284.4
Graubünden	59.8	0.6	11.0	0.6	0.4	1.5	9.7	0.4	2.0	1.6	-	6.9	3.6	1.8	99.8
Aargau	243.4	1.5	44.7	2.7	1.7	6.8	35.4	1.5	7.2	3.9	-	19.6	8.9	8.7	385.9
Thurgau	97.6	0.6	17.9	1.0	0.6	2.4	14.3	0.6	2.7	1.0	-	7.0	3.5	2.9	152.1
Tessin	140.8	0.8	25.9	1.6	1.0	4.0	20.6	1.0	4.8	2.3	-	10.8	4.4	3.6	221.5
Waadt	223.3	1.2	41.0	4.1	2.6	10.4	50.4	2.2	10.6	3.4	0.7	20.0	6.8	4.8	381.5
Wallis	95.4	0.7	17.5	1.2	0.7	2.9	16.8	0.8	3.9	2.3	-	9.1	3.9	2.5	157.8
Neuenburg	44.6	0.2	8.2	0.7	0.4	1.8	10.0	0.6	2.7	0.9	0.1	4.1	1.1	0.6	75.9
Genf	123.5	0.3	22.7	3.8	2.4	9.6	46.7	1.9	9.3	4.1	2.0	10.5	2.0	0.9	239.7
Jura	23.9	0.1	4.4	0.2	0.1	0.6	3.8	0.2	0.8	0.3	-	1.5	0.8	0.4	37.2
Total	2'595.8	17.1	477.0	39.9	25.3	100.6	517.8	21.4	105.0	49.3	14.1	217.8	98.5	68.3	4'348.0

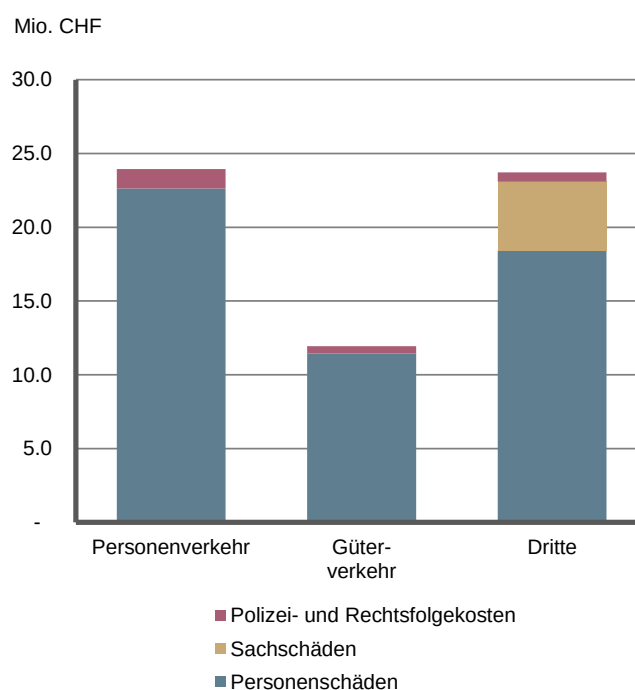
PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tra/Arbm = Traktoren und Arbeitsmaschinen

c) Schienenverkehr

Die externen Unfallkosten im Schienenverkehr für den Personen- und Güterverkehr betragen knapp 36 Mio. CHF, wie im Kapitel 14.7.1a) dargestellt. Zusätzlich verursachen Dritte im Schienenverkehr (schienenverkehrsfremde Verursacher, wie z.B. Unbefugte) externe Unfallkosten von 24 Mio. CHF und somit fast gleich viel wie der Personenverkehr.

In der folgenden Abbildung ist ersichtlich, dass sowohl im Personen- und Güterverkehr als auch bei Dritten vor allem Personenschäden einen wesentlichen Teil der Kosten ausmachen. Dritte verursachen zudem 4.7 Mio. CHF Sachschäden.

Abbildung 14-31: Externe Unfallkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende 2021, Schienenverkehr, nach Verkehrsart



in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Dritte	Total
Personenschäden	22.6	11.4	18.4	52.5
Medizinische Heilungskosten	0.3	0.2	1.2	1.6
Produktionsausfall	0.3	0.5	3.7	4.5
Wiederbesetzungskosten	0.0	0.0	0.2	0.2
Administrativkosten	1.1	1.0	3.2	5.2
Immaterielle Kosten	21.0	9.7	10.2	40.9
Sachschäden	-	-	4.7	4.7
Sachschäden	-	-	3.5	3.5
Administrativkosten	-	-	1.2	1.2
Polizei- und Rechtsfolgekosten	1.3	0.5	0.6	2.4
Polizeikosten	0.3	0.1	0.1	0.6
Rechtsfolgekosten	1.0	0.4	0.5	1.9
Administrativkosten	-	-	-	-
Total	23.9	11.9	23.7	59.6

Differenzierung nach Kantonen

Beim Schienenverkehr folgen die Kostenanteile der Kantone zwar ebenfalls den Bevölkerungsanteilen. Im Vergleich zum Strassenverkehr, wo die Anteile sehr nahe beieinander liegen, gibt es im Schienenverkehr gewisse Abweichungen, weil das Verhältnis zwischen Bevölkerung und Fahrzeugkilometer anders ist als im Strassenverkehr: Der Kanton Bern mit dem zweitgrössten Bevölkerungsanteil weist mit 5.9 Mio. CHF die höchsten Kosten aus. Auf den Kanton Zürich sind 4.5 Mio. CHF zurückzuführen.

Abbildung 14-32: Externe Unfallkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende 2021, Schienenverkehr, nach Verkehrsart und Kanton

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich	3.7	0.7	4.5
Bern	4.0	1.9	5.9
Luzern	1.0	0.1	1.1
Uri	0.2	0.4	0.6
Schwyz	0.7	0.5	1.2
Obwalden	0.1	0.0	0.1
Nidwalden	0.1	0.0	0.1
Glarus	0.2	0.1	0.2
Zug	0.3	0.1	0.4
Freiburg	0.9	0.1	1.0
Solothurn	0.8	0.8	1.6
Basel-Stadt	0.2	0.1	0.3
Basel-Landschaft	0.7	0.5	1.2
Schaffhausen	0.2	0.0	0.2
Appenzell A.Rh.	0.2	0.0	0.2
Appenzell I.Rh.	0.1	-	0.1
St. Gallen	1.4	0.3	1.7
Graubünden	1.1	0.6	1.7
Aargau	2.0	2.2	4.2
Thurgau	0.8	0.2	1.0
Tessin	0.8	1.3	2.1
Waadt	2.3	0.9	3.2
Wallis	1.2	0.7	1.9
Neuenburg	0.5	0.3	0.8
Genf	0.3	0.1	0.4
Jura	0.2	0.0	0.3
Total	23.9	11.9	35.9

d) Luftverkehr

Die gesamten Kosten des Luftverkehrs betragen 21.8 Mio. CHF, was nur gerade 0.5% der gesamten Unfallkosten entspricht.³⁶⁷ Die höchsten externen Unfallkosten fallen dabei beim Personenverkehr an (21 Mio. CHF). Im Güterverkehr sind die Kosten gering (0.7 Mio. CHF). Die Kosten sind fast ausschliesslich auf Personenschäden zurückzuführen. Zwar fallen auch Polizei- und Rechtsfolgekosten an, diese liegen aber unter 40'000 CHF.

Abbildung 14-33: Externe Unfallkosten des Luftverkehrs 2021, nach Verkehrsart und Kostenbestandteil

in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Personenschäden	21.1	0.7	21.8
Medizinische Heilungskosten	0.2	0.0	0.2
Produktionsausfall	2.1	0.0	2.1
Wiederbesetzungskosten	0.1	0.0	0.1
Administrativkosten	1.1	0.0	1.2
Immaterielle Kosten	17.6	0.6	18.2
Sachschäden	-	-	-
Sachschäden	-	-	-
Administrativkosten	-	-	-
Polizei- und Rechtsfolgekosten	0.03	0.00	0.03
Polizeikosten	0.01	0.00	0.01
Rechtsfolgekosten	0.02	0.00	0.03
Administrativkosten	-	-	-
Total	21.2	0.7	21.8

Die Differenzierung nach Flughafentyp zeigt, dass langfristig etwa 58% der Unfallkosten bei Regionalflughäfen und weniger als die Hälfte (42%) auf Landesflughäfen anfallen. Die Business Aviation trägt mit 10 Mio. CHF (oder 46%) am meisten den Unfallkosten bei. Der Linien- und Charterverkehr verursacht 5 Mio. CHF (oder 25%) und der Rest der General Aviation 6 Mio. CHF (oder 29%). Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich beim Linien- und Charterverkehr um langfristige Erwartungswerte handelt, bei der General Aviation aber um tatsächlich registrierte Unfälle.

³⁶⁷ Wenn die vier Verkehrsträger Strassen-, Schienen- (ohne Dritte), Luft- und Schiffsverkehr betrachtet werden.

Abbildung 14-34: Externe Unfallkosten des Luftverkehrs 2021, nach Flughafentyp und Verkehrsart

in Mio. CHF	Landesflughäfen	Regionalflughäfen	Total
Linien- und Charterverkehr interkontinental	0.6	-	0.6
Linien- und Charterverkehr europäisch	4.7	-	4.7
Helikopter	-	0.3	0.3
Business Aviation	2.3	7.6	10.0
Rest General Aviation	1.5	4.8	6.3
Total	9.1	12.7	21.8

e) Schiffsverkehr

Im Schiffsverkehr betragen die im langjährigen Durchschnitt erwarteten externen Unfallkosten lediglich 1 Mio. CHF. 93% davon sind auf Personenschäden zurückzuführen. Differenziert nach Verkehrsart zeigt sich, dass der Güterverkehr 80% der Kosten und der Personenverkehr 20% trägt. Etwa 85% der externen Kosten sind auf immaterielle Kosten bei Personenschäden zurückzuführen.

Abbildung 14-35: Externe Unfallkosten des Schiffsverkehrs 2021, nach Verkehrsart und Kostenbestandteil

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Personenschäden	0.2	0.7	0.9
Sachschäden	-	-	-
Polizei- und Rechtsfolgekosten	0.0	0.1	0.1
Total	0.2	0.8	1.0

14.7.2 Soziale Kosten**a) Überblick Gesamtverkehr**

Wie bei den externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende, entstehen die meisten sozialen Unfallkosten im Strassenverkehr: Über 99% der 17.3 Mrd. CHF (bzw. 21.7 Mrd. CHF, wenn der Bereich «Sport & Freizeit» mitberücksichtigt wird). Im Schienenverkehr fallen im Personen- und Güterverkehr 59 Mio. CHF soziale Unfallkosten an. Zudem werden im Schienenverkehr zusätzliche 76 Mio. CHF von Dritten verursacht. Der Luftverkehr verursacht 53 Mio. CHF und der Schiffsverkehr lediglich rund 2 Mio. CHF. Im Fuss- und Veloverkehr verursacht der Bereich Sport & Freizeit zusätzlich 4.4 Mrd. CHF.

Abbildung 14-36: Überblick über die sozialen Unfallkosten 2021

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr		16'079.6	1'125.3	17'204.9	99.3%
Schienenverkehr		39.2	19.9	59.1	0.3%
Luftverkehr		50.7	1.8	52.5	0.3%
Schiffsverkehr		0.3	2.0	2.3	0.0%
Total		16'169.8	1'149.0	17'318.8	100.0%
in % des Totals		93.4%	6.6%	100.0%	

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Sport & Freizeit (Velo, fäG, Fuss)		4'393.7	-	4'393.7	20.2%
Total		20'563.5	1'149.0	21'712.5	100.0%

b) Strassenverkehr

In der nachfolgenden Abbildung sind die sozialen Unfallkosten im Strassenverkehr zusätzlich nach Fahrzeugkategorie aufgeschlüsselt. Knapp 5.8 Mrd. CHF der sozialen Unfallkosten werden durch Personenwagen verursacht. Der Veloverkehr verursacht mit rund 4.8 Mrd. CHF die zweithöchsten sozialen Unfallkosten. Beim privaten motorisierten Individualverkehr tragen auch die Motorräder mit über 3.1 Mrd. CHF wesentlich zum Total bei, wenn auch etwas weniger als der Veloverkehr, zu den sozialen Unfallkosten bei. Etwa 1.1 Mrd. CHF sind auf den Güterverkehr zurückzuführen. Der öffentliche Verkehr trägt hingegen deutlich weniger zu den Kosten bei: 95 Mio. CHF, oder weniger als 1% der gesamten Kosten.

Abbildung 14-37: Soziale Unfallkosten im Strassenverkehr 2021, nach Fahrzeugkategorien

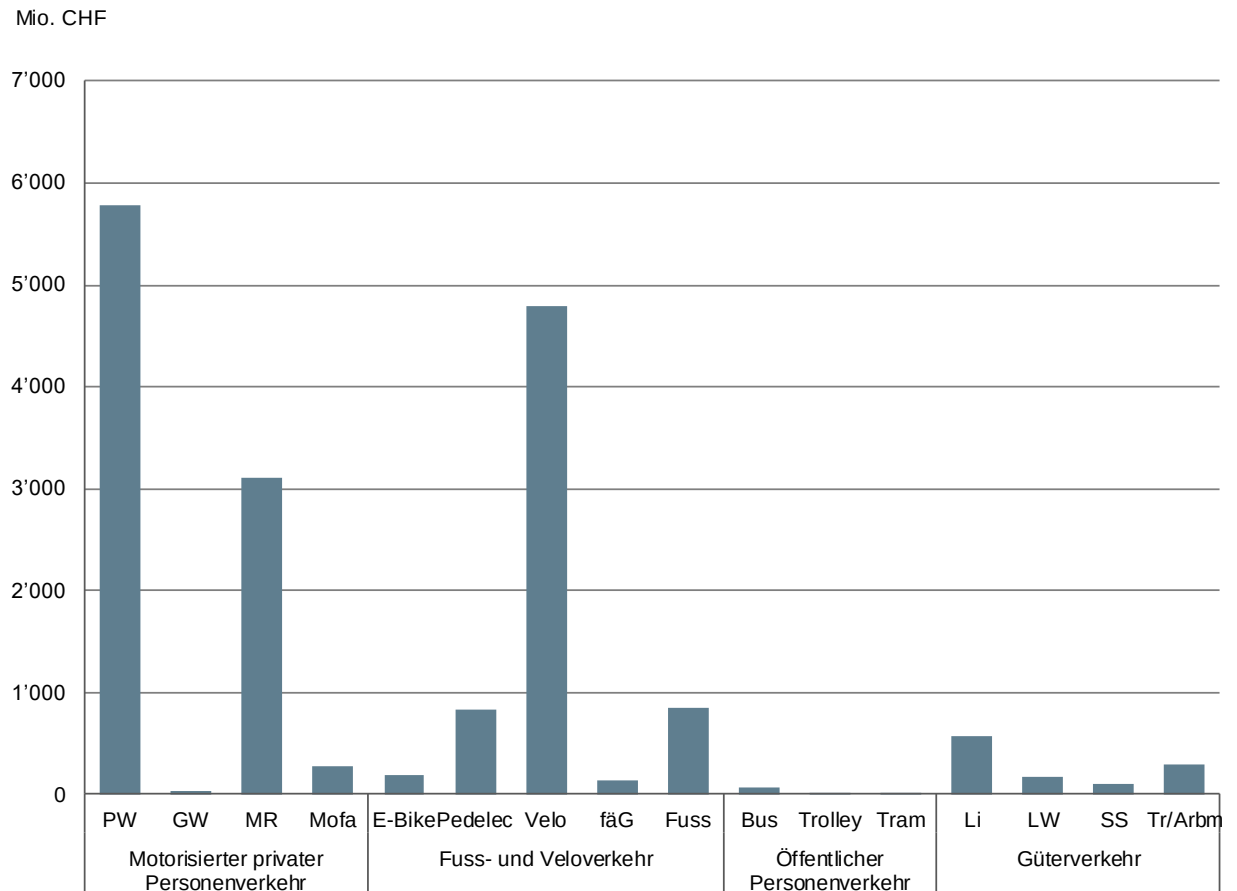


Abbildung 14-38: Soziale Unfallkosten im Strassenverkehr 2021, nach Fahrzeugkategorien und Kostenart

	Personenverkehr										Güterverkehr						Gesamt- total
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr		Li				LW	SS	
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram					
Personenschäden	4'279.8	17.9	3'054.2	269.7	183.7	820.1	4'768.8	131.5	839.9	46.5	5.8	14.9	288.6	128.9	73.6	261.2	15'185.2
Medizinische Heilungskosten	144.4	0.7	101.2	9.9	6.7	28.0	181.4	5.0	29.3	1.8	0.2	0.6	10.0	2.9	1.3	9.0	532.5
Produktionsausfall	251.2	0.7	161.6	12.6	8.4	44.2	203.4	5.4	41.9	1.9	0.2	0.6	16.5	12.5	8.6	13.9	783.6
Wiederbesetzungskosten	3.3	0.0	2.1	0.1	0.1	0.6	2.1	0.1	0.5	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1	0.2	9.6
Administrativkosten	207.9	0.9	155.8	13.9	9.6	41.2	249.7	7.0	43.0	2.4	0.3	0.8	14.0	5.2	2.6	13.1	767.4
Immaterielle Kosten	3'672.9	15.5	2'633.6	233.1	159.0	706.3	4'132.2	114.1	725.2	40.3	5.1	12.9	247.8	108.2	61.0	225.0	13'092.1
Sachschäden	1'229.6	8.0	25.0	3.3	1.6	5.2	4.8	0.5	0.4	20.6	0.9	5.0	257.8	26.2	13.9	23.9	1'626.6
Sachschäden	910.8	5.9	18.5	2.4	1.2	3.9	3.6	0.4	0.3	15.3	0.7	3.7	190.9	19.4	10.3	17.7	1'204.9
Administrativkosten	318.8	2.1	6.5	0.9	0.4	1.4	1.3	0.1	0.1	5.3	0.2	1.3	66.8	6.8	3.6	6.2	421.7
Polizei- und Rechtsfolgekosten	281.2	1.0	23.8	3.1	1.6	7.8	17.0	1.4	3.3	1.4	0.0	0.2	29.9	9.4	6.7	5.4	393.1
Polizeikosten	35.6	0.1	3.0	0.4	0.2	1.0	2.2	0.2	0.4	0.2	0.0	0.0	3.8	1.2	0.8	0.7	49.8
Rechtsfolgekosten	218.9	0.7	18.6	2.4	1.2	6.0	13.3	1.1	2.6	1.1	0.0	0.1	23.3	7.3	5.2	4.2	306.1
Administrativkosten	26.7	0.1	2.3	0.3	0.1	0.7	1.6	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	2.8	0.9	0.6	0.5	37.3
Total Fahrzeugkategorien	5'790.6	26.9	3'103.1	276.1	186.9	833.1	4'790.7	133.3	843.6	68.5	6.8	20.1	576.3	164.4	94.2	290.4	17'204.9
in % des Gesamttotals	33.7%	0.2%	18.0%	1.6%	1.1%	4.8%	27.8%	0.8%	4.9%	0.4%	0.0%	0.1%	3.3%	1.0%	0.5%	1.7%	100.0%
Total Teilbereiche	9'196.6				6'787.6					95.3			1'125.3				17'204.9
in % des Gesamttotals	53.5%				39.5%					0.6%			6.5%				100.0%

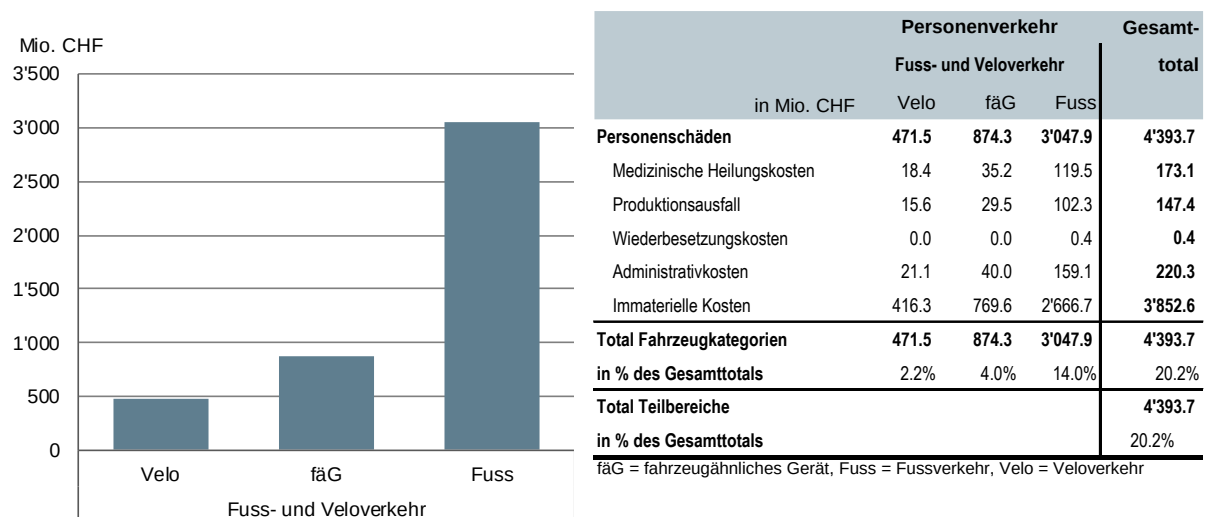
PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tr = Traktor, Arbm = Arbeitsmaschine

Auch bei den sozialen Kosten ist die Bedeutung der Personenschäden mit etwa 88% sehr hoch.³⁶⁸ 76% sind allein auf die immateriellen Kosten zurückzuführen. Sachschäden (inkl. Administrativkosten) sind für rund 9% der Kosten verantwortlich, Polizei- und Rechtsfolgekosten für die verbleibenden rund 2%.

Separate Betrachtung Bereich Sport & Freizeit im Fuss- und Veloverkehr

Wie bereits beim Überblick dargestellt, umfasst der Bereich Sport & Freizeit zusätzlich soziale Unfallkosten im Umfang von 4.4 Mrd. CHF. Dabei handelt es sich ausschliesslich um Personenschäden, wobei diese überwiegend als immaterielle Kosten anfallen: 3.9 Mrd. CHF, oder 88%. Verglichen mit den Gesamtkosten von 21.7 Mrd. CHF, führt der Bereich Sport & Freizeit zu 20% der Kosten. Über die Hälfte der 4.4 Mrd. CHF ist auf den Fussverkehr zurückzuführen (wobei die Abgrenzungsfrage zur Zuordnung von Alleinunfällen im Fussverkehr auch hier gestellt werden kann).

Abbildung 14-39: Soziale Unfallkosten im Strassenverkehr 2021, Sport & Freizeit, nach Fahrzeugkategorien und Kostenart (nur Personenschäden)



Differenzierung nach Antriebsarten

Wie bei den externen Kosten ist die Mehrheit der sozialen Kosten des Strassenverkehrs auf das Verkehrsaufkommen von Fahrzeugen mit fossilem Antrieb zurückzuführen, konkret gut 10 Mrd. CHF. Der Anteil der fossil angetriebenen Fahrzeuge an den sozialen Kosten ist mit knapp 60% jedoch tiefer als bei den externen Kosten (81%). Der Anteil der Muskelkraft, der mehrheitlich auf den Veloverkehr zurückzuführen ist, ist mit gut einem Drittel hingegen wesentlich höher (15%). Elektrofahrzeuge verursachen gemäss ihrem Anteil an der Fahrleistung insgesamt Kosten von 1.1 Mrd. CHF (7%), wovon 1.0 Mrd. CHF auf Pedelecs und E-Bikes zurückzuführen sind und nur 57

³⁶⁸ Wenn die vier Verkehrsträger Strassen-, Schienen- (ohne Dritte), Luft- und Schiffsverkehr betrachtet werden.

Mio. CHF auf Personenwagen (1.0% der Kosten von Personenwagen). Beim fossilen Antrieb dominiert der private Personenverkehr, insbesondere Personenwagen (5.7 Mrd. CHF) und Motorräder (3.1 Mrd. CHF).

Abbildung 14-40: Soziale Unfallkosten 2021, Strassenverkehr ohne Sport & Freizeit, nach Fahrzeugkategorien und Antriebsart

	Personenverkehr									Güterverkehr				Gesamt- total			
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr								
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	Tr/Arbm	
Fossil	5'682.9	26.8	3'089.7	276.1	-	-	-	-	-	66.4	-	-	571.1	163.8	93.8	290.4	10'261.0
Elektrisch	57.0	0.0	13.4	-	186.9	833.1	-	-	-	0.9	6.8	20.1	3.3	0.2	0.1	-	1'121.8
Rest	50.7	-	-	-	-	-	-	-	-	1.2	-	-	1.8	0.5	0.3	-	54.5
Muskelkraft	-	-	-	-	-	-	4'790.7	133.3	843.6	-	-	-	-	-	-	-	5'767.6
Total	5'790.6	26.9	3'103.1	276.1	186.9	833.1	4'790.7	133.3	843.6	68.5	6.8	20.1	576.3	164.4	94.2	290.4	17'204.9
Anteil Fossil	98.1%	99.9%	99.6%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	96.9%	0.0%	0.0%	99.1%	99.6%	99.6%	100.0%	59.6%
Anteil Elektrisch	1.0%	0.1%	0.4%	0.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.4%	100.0%	100.0%	0.6%	0.1%	0.1%	0.0%	6.5%
Anteil Rest	0.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.7%	0.0%	0.0%	0.3%	0.3%	0.3%	0.0%	0.3%
Anteil Muskelkraft	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%	100.0%	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	33.5%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tr = Traktor, Arbm = Arbeitsmaschine

Differenzierung nach Kantonen

Die folgende Abbildung stellt die Aufteilung der sozialen Unfallkosten auf die Kantone dar, differenziert nach Verkehrsmittel (ohne Traktoren/Arbeitsmaschinen). Erwartungsgemäss folgen die Kostenanteile auch hier den Bevölkerungsanteilen der Kantone, da diese auch mit der Fahrleistung korrelieren. In Zürich betragen die sozialen Unfallkosten im Strassenverkehr etwa 2.9 Mrd. CHF, im Kanton Bern gut 2.1 Mrd. CHF. Dem Kanton Waadt können knapp 1.5 Mrd. CHF und dem Aargau gut 1.4 Mrd. CHF soziale Unfallkosten zugeschrieben werden.

Abbildung 14-41: Soziale Unfallkosten 2021, Strassenverkehr ohne Sport & Freizeit, nach Fahrzeugkategorien und Kanton

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total	
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr						
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
Zürich	902.2	4.7	483.4	60.1	40.7	181.3	922.6	25.0	158.4	13.0	8.0	88.4	28.7	12.2	2'928.8
Bern	749.8	3.7	401.8	32.0	21.7	96.6	569.6	14.6	92.3	7.9	2.2	73.2	22.6	11.6	2'099.6
Luzern	320.2	1.6	171.6	11.5	7.8	34.7	191.6	5.3	33.7	4.6	-	29.9	10.0	6.9	829.5
Uri	34.1	0.3	18.3	0.8	0.5	2.3	16.7	0.4	2.7	0.5	-	3.6	1.6	1.7	83.6
Schwyz	127.8	0.5	68.5	3.1	2.1	9.5	64.3	2.1	13.3	1.3	-	11.8	3.0	1.6	308.9
Obwalden	21.3	0.1	11.4	0.6	0.4	1.7	14.1	0.4	2.8	0.2	-	2.6	0.7	0.2	56.7
Nidwalden	26.8	0.2	14.3	0.9	0.6	2.7	17.1	0.6	3.6	0.3	-	3.1	1.1	0.7	72.0
Glarus	28.4	0.2	15.2	0.8	0.6	2.5	19.8	0.6	4.0	0.3	-	3.5	1.3	0.7	77.9
Zug	83.4	0.3	44.7	4.1	2.8	12.5	70.6	2.4	15.5	1.5	-	8.9	1.6	0.7	249.1
Freiburg	217.7	1.0	116.6	9.0	6.1	27.1	157.4	3.8	24.3	2.0	-	17.5	5.9	3.7	591.9
Solothurn	199.4	1.4	106.9	7.9	5.4	24.0	151.4	3.9	24.7	2.4	0.1	20.6	8.4	5.5	561.9
Basel-Stadt	68.8	0.3	36.9	7.8	5.3	23.6	147.8	4.3	27.0	2.3	3.6	5.7	2.0	0.9	336.5
Basel-Landschaft	171.2	1.0	91.7	9.6	6.5	28.9	174.0	4.5	28.6	2.2	2.0	20.0	6.0	3.9	550.2
Schaffhausen	49.4	0.2	26.5	2.0	1.4	6.1	40.5	1.3	8.4	0.9	-	5.3	1.4	0.8	144.1
Appenzell A.Rh.	41.5	0.1	22.2	1.6	1.1	4.7	25.3	0.5	3.2	0.3	-	3.9	0.8	0.3	105.4
Appenzell I.Rh.	9.9	0.0	5.3	0.4	0.2	1.1	7.6	0.2	1.0	0.0	-	1.0	0.2	0.1	27.0
St. Gallen	391.3	1.7	209.7	14.6	9.9	44.1	278.9	7.4	47.0	5.5	-	40.2	10.5	6.4	1'067.1
Graubünden	133.4	1.0	71.5	4.0	2.7	12.0	89.4	2.6	16.3	2.4	-	18.2	6.1	2.5	362.0
Aargau	543.0	2.4	291.0	18.6	12.6	56.1	327.4	9.1	57.5	5.9	-	51.7	14.9	12.0	1'402.2
Thurgau	217.8	1.0	116.7	6.6	4.5	20.0	132.2	3.4	21.7	1.5	-	18.6	5.9	4.0	554.0
Tessin	314.0	1.2	168.3	10.9	7.4	32.8	190.3	6.1	38.8	3.5	-	28.7	7.3	5.0	814.3
Waadt	498.1	1.9	266.9	28.5	19.3	85.9	466.4	13.5	85.3	5.2	1.0	53.0	11.3	6.6	1'542.6
Wallis	212.9	1.1	114.1	8.0	5.4	24.1	155.7	4.9	31.0	3.5	-	24.2	6.6	3.5	594.9
Neuenburg	99.5	0.3	53.3	4.8	3.3	14.5	92.8	3.4	21.8	1.4	0.2	10.7	1.8	0.8	308.6
Genf	275.5	0.5	147.6	26.3	17.8	79.4	432.3	11.8	74.5	6.3	2.9	27.9	3.3	1.2	1'107.3
Jura	53.4	0.2	28.6	1.6	1.1	4.8	35.0	1.0	6.3	0.5	-	4.0	1.4	0.6	138.3
Total	5'790.6	26.9	3'103.1	276.1	186.9	833.1	4'790.7	133.3	843.6	75.3	20.1	576.3	164.4	94.2	16'914.5

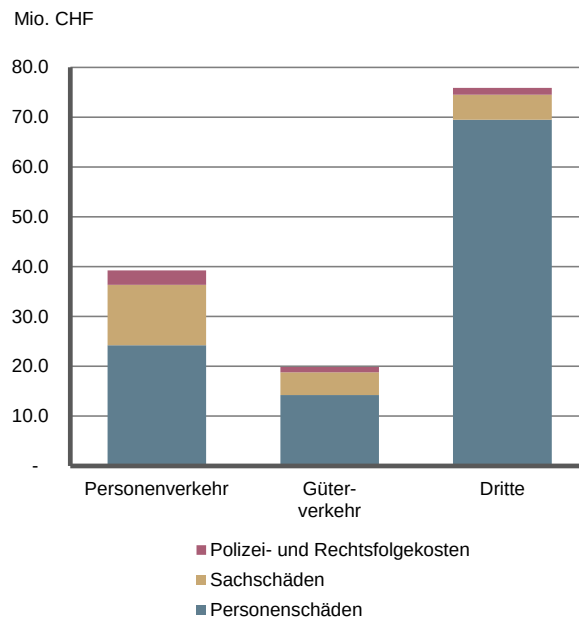
PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tra/Arbm = Traktoren und Arbeitsmaschinen

c) Schienenverkehr

Im Schienenverkehr fallen soziale Unfallkosten von rund 135 Mio. CHF an. Davon entfallen 39 Mio. CHF (29%) auf den Personenverkehr und 20 Mio. CHF (15%) auf den Güterverkehr. Auf durch Dritte (schienenverkehrsfremde) verursachte Unfälle entfallen mit 76 Mio. CHF über die Hälfte (56%) der sozialen Unfallkosten.

Im unteren Teil der folgenden Abbildung ist die Aufschlüsselung der sozialen Unfallkosten im Schienenverkehr nach Kostenbestandteilen dargestellt. Auch im Schienenverkehr machen die Personenschäden mit 108 Mio. CHF (oder 80%) einen Grossteil der Unfallkosten aus. Im Vergleich zum Strassenverkehr entstehen aber auch hohe Sachschäden (22 Mio. CHF, oder 16% des Totals). Weniger ausgeprägt sind die Polizei- und Rechtsfolgekosten (5 Mio. CHF, oder 4%).

Abbildung 14-42: Soziale Unfallkosten im Schienenverkehr 2021, nach Verkehrsart und Kostenbestandteil



	Personenverkehr	Güterverkehr	Dritte	Total
in Mio. CHF				
Personenschäden	24.2	14.2	69.5	107.9
Medizinische Heilungskosten	0.8	0.4	1.3	2.5
Produktionsausfall	0.9	1.8	8.3	11.1
Wiederbesetzungskosten	0.0	0.0	0.2	0.2
Administrativkosten	1.1	1.0	3.3	5.4
Immaterielle Kosten	21.5	10.9	56.4	88.8
Sachschäden	12.1	4.6	5.0	21.7
Sachschäden	9.0	3.4	3.7	16.1
Administrativkosten	3.1	1.2	1.3	5.6
Polizei- und Rechtsfolgekosten	2.9	1.1	1.4	5.3
Polizeikosten	0.4	0.1	0.2	0.7
Rechtsfolgekosten	2.2	0.8	1.1	4.2
Administrativkosten	0.3	0.1	0.1	0.5
Total	39.2	19.9	75.9	135.0

Differenzierung nach Kantonen

Die Aufteilung der sozialen Kosten auf die Kantone folgt dem gleichen Muster wie bei den externen Kosten (vgl. Kapitel 14.7.1c). Der grösste Kostenanteil betrifft den Kanton Bern, der 9.7 Mio. CHF soziale Unfallkosten ausweist. Zürich trägt 7.3 Mio. CHF soziale Unfallkosten. Auch die bei den

externen Kosten erwähnten, vergleichsweise hohen Anteile bei einzelnen Kantonen finden sich bei den sozialen Kosten wieder, weil die Aufteilung nach den gleichen Kriterien erfolgt ist.

Abbildung 14-43: Soziale Unfallkosten 2021, Schienenverkehr, nach Verkehrsart und Kanton

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich	6.1	1.2	7.3
Bern	6.5	3.2	9.7
Luzern	1.6	0.2	1.8
Uri	0.4	0.7	1.1
Schwyz	1.1	0.9	1.9
Obwalden	0.2	0.0	0.2
Nidwalden	0.1	0.0	0.1
Glarus	0.3	0.1	0.4
Zug	0.5	0.2	0.7
Freiburg	1.5	0.2	1.7
Solothurn	1.3	1.3	2.6
Basel-Stadt	0.3	0.2	0.4
Basel-Landschaft	1.1	0.8	1.9
Schaffhausen	0.4	0.0	0.4
Appenzell A.Rh.	0.3	0.0	0.3
Appenzell I.Rh.	0.1	-	0.1
St. Gallen	2.2	0.5	2.8
Graubünden	1.8	0.9	2.8
Aargau	3.3	3.6	6.9
Thurgau	1.4	0.3	1.7
Tessin	1.3	2.1	3.4
Waadt	3.8	1.6	5.3
Wallis	2.0	1.1	3.1
Neuenburg	0.8	0.5	1.3
Genf	0.5	0.1	0.6
Jura	0.4	0.0	0.4
Total	39.2	19.9	59.1

n

d) Luftverkehr

Im Luftverkehr betragen die sozialen Unfallkosten 53 Mio. CHF, die zu 97% im Personenverkehr anfallen. Auch hier sind Personenschäden, insbesondere die immateriellen Kosten, am bedeutendsten. Sie entsprechen 80% der Gesamtkosten (die immateriellen Kosten allein 65%). Sachschäden erklären einen Fünftel (rund 10 Mio. CHF) der Kosten. Polizei- und Rechtsfolgekosten sind hingegen marginal.

Abbildung 14-44: Soziale Unfallkosten im Luftverkehr 2021, nach Fahrzeugkategorien und Kostenbestandteil

	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
in Mio. CHF			
Personenschäden	41.1	0.9	41.9
Medizinische Heilungskosten	0.4	0.0	0.4
Produktionsausfall	5.9	0.1	6.0
Wiederbesetzungskosten	0.1	0.0	0.1
Administrativkosten	1.1	0.0	1.2
Immaterielle Kosten	33.6	0.7	34.3
Sachschäden	9.6	0.9	10.5
Sachschäden	7.1	0.7	7.8
Administrativkosten	2.5	0.2	2.7
Polizei- und Rechtsfolgekosten	0.07	0.00	0.07
Polizeikosten	0.01	0.00	0.01
Rechtsfolgekosten	0.05	0.00	0.06
Administrativkosten	0.01	0.00	0.01
Total	50.7	1.8	52.5

Ähnlich wie bei den externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmenden ist im Luftverkehr ein Grossteil der sozialen Kosten auf die Business Aviation (49%) und restliche General Aviation (30%) zurückzuführen, aber nur 18% auf den gesamten Linien- und Charterverkehr. Etwas mehr als die Hälfte (55%) der Kosten ist auch hier auf Regionalflughäfen zurückzuführen, 45% auf die Landesflughäfen.

Abbildung 14-45: Soziale Unfallkosten im Luftverkehr 2021, nach Flughafentyp und Verkehrsart

	Landesflughäfen	Regionalflughäfen	Total
in Mio. CHF			
Linien- und Charterverkehr interkontinental	1.0	-	1.0
Linien- und Charterverkehr europäisch	8.4	-	8.4
Helikopter	-	1.6	1.6
Business Aviation	8.8	16.7	25.5
Rest General Aviation	5.5	10.5	16.0
Total	23.8	28.7	52.5

e) Schiffsverkehr

Im Schiffsverkehr fallen Unfallkosten in Höhe von 2.3 Mio. CHF (2 Mio. CHF im Güterverkehr und 0.3 Mio. CHF im Personenverkehr) an. Die Personenschäden und Sachschäden sind im Schiffsverkehr je für rund 1 Mio. CHF verantwortlich. Polizei- und Rechtsfolgekosten sind auch hier marginal.

Abbildung 14-46: Soziale Unfallkosten im Schiffsverkehr 2021, nach Fahrzeugkategorien und Kostenbestandteil

in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Personenschäden	0.2	0.9	1.1
Sachschäden	0.0	1.0	1.0
Polizei- und Rechtsfolgekosten	0.0	0.1	0.1
Total	0.3	2.0	2.3

14.7.3 Externe Kosten aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr

Die Sicht Verkehrsart Schwerverkehr im Strassenverkehr wird als Anteil an den externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende berechnet. Aufgrund der angewendeten Methodik unterscheiden sich die externen Kosten der Verkehrsart Schwerverkehr nur bei den immateriellen Kosten von den externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende. Die Sachschäden werden nicht gezeigt, da diese im Schwerverkehr immer private Kosten darstellen (externe Kosten sind Null).

Die Ergebnisse aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Insgesamt fallen aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr externe Kosten im Umfang von 173 Mio. CHF an.
- Über die Hälfte der externen Kosten aus Sicht Schwerverkehr betreffen Lastwagen: 97 Mio. CHF, oder 56%.
- Auch Sattelschlepper verursachen mit 67 Mio. CHF einen wesentlichen Teil der Kosten (39%).
- Auf Gesellschaftswagen sind 8 Mio. CHF, oder knapp 5% der Kosten zurückzuführen.

Im Vergleich zu den externen Unfallkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende ist der Unterschied bei den Lastwagen, respektive Sattelschleppern klein: 98% der externen Unfallkosten der Lastwagen und Sattelschlepper sind auch aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr extern. Die kleine Differenz zwischen den externen immateriellen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende und Sicht Verkehrsart für diese Verkehrsmittel rührt daher, dass nur ein sehr kleiner Teil der nicht-unfallverursachenden Opfer innerhalb des Schwerverkehrs zu finden sind. Bei den Gesellschaftswagen ist der Anteil der innerhalb des Schwerverkehrs zu findenden nicht-unfallverursachenden Opfer hingegen wesentlich grösser: Der Anteil der externen Kosten aus Sicht Verkehrsart an den externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende beträgt deshalb bei den Gesellschaftswagen nur 49%.

Abbildung 14-47: Externe Kosten aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr 2021, nach Fahrzeugkategorien und Kostenbestandteil

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr		Gesamt-
	GW	LW	SS	
Personenschäden	7.9	92.7	64.4	165.1
Medizinische Heilungskosten	0.4	1.8	0.7	2.9
Produktionsausfall	0.2	9.0	7.0	16.2
Wiederbesetzungskosten	0.0	0.2	0.1	0.4
Administrativkosten	0.5	2.6	1.3	4.4
Immaterielle Kosten	6.9	79.1	55.2	141.2
Polizei- und Rechtsfolgekosten	0.4	4.1	2.9	7.5
Polizeikosten	0.1	0.8	0.6	1.5
Rechtsfolgekosten	0.3	3.3	2.3	6.0
Total Fahrzeugkategorien	8.4	96.8	67.3	172.5
in % des Gesamttotals	4.8%	56.1%	39.0%	100.0%

Hinweis: Sachschäden werden nicht dargestellt, da diese im Schwerverkehr vollständig privat sind.

14.8 Sensitivitätsanalyse

14.8.1 Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten

Die Unfallkosten werden auf Basis der besten vorliegenden Datengrundlagen zum Mengen- und Wertgerüst ermittelt:

- Insbesondere durch die auf verschiedenen Annahmen basierenden Herleitung des **Mengengerüsts** zum Gesamtunfallgeschehen (Dunkelziffer) im Strassenverkehr entstehen Unsicherheiten. Hier untersuchen wir den Einfluss einer alternativen Basis der Schätzung (d.h. Verwendung der Personenkilometer statt der polizeilich registrierten Verletzten) auf die Ergebnisse, wobei hier mehr der Einfluss auf die Verteilung auf die Fahrzeugkategorien als die Summe der Kosten von Interesse ist. Gleiches gilt für die Annahme, dass 90% der nicht-registrierten Verletzten auf Selbstunfälle zurückzuführen sind. Wir untersuchen den Einfluss einer Reduktion dieses Anteils auf 75%.
- Das Mengengerüst zu Unfallraten im Luft- und Schiffsverkehr unterliegt einer gewissen Unsicherheit, weil die Daten zeitlich weit zurückliegen. Die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse bringt diesbezüglich jedoch keine zusätzlichen Erkenntnisse, da die Unfallkosten bei Skalierung des Mengengerüsts mit einem konstanten Faktor um denselben Faktor zu- bzw. abnehmen.

- Die grösste Unsicherheit im **Wertgerüst** bei der Ermittlung der sozialen und externen Kosten besteht in der Zahlungsbereitschaft für immaterielle Kosten (VOSL). Für diese führen wir eine Sensitivitätsanalyse mit einer grossen Bandbreite durch ($\pm 50\%$).

Abbildung 14-48: Übersicht über Inputdaten, Annahmen und Bandbreiten bei den Unfallkosten

Bereich / Annahme	Wissenstand (vgl. Kapitel 3.3.1)	Vorgehen in Basisberechnung	Bandbreite Sensitivitätsanalyse
Mengengerüst			
Polizeilich registrierte Unfälle und Unfallopfer (Verursacherprinzip)	Gesichertes Wissen	Datenauswertung	ASTRA vs. PKM 75% statt 90%
Schätzung Gesamtunfallgeschehen im Strassenverkehr	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	
Annahme Anteil Selbstunfälle bei nicht-registrierten Verletzten	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	
Mengengerüst im Schienenverkehr	Gesichertes Wissen	Datenauswertung	
Mengengerüst im Luft- und Schiffsverkehr (Erwartungswert)	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	
Mengengerüst zu Sport- und Freizeit im Fuss- und Veloverkehr	Gesichertes Wissen	Datenauswertung	
Wertgerüst			
Zahlungsbereitschaft für immaterielle Kosten	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-50% / +50%
Medizinische Heilungskosten	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	
Anteil der Transferleistungen der Sozialversicherungen am Eigenkonsum der Unfallopfer	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	
Regressierter Anteil der Transferleistungen an NUV	Wissen mit Unsicherheiten	Datenauswertung	

14.8.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen den starken Einfluss des Value of Statistical Life (VOSL) auf die Unfallkosten, da sie direkt den Kostensatz der immateriellen Kosten beeinflussen. Die immateriellen Kosten machen wie gezeigt einen hohen Anteil der gesamten sozialen und externen Unfallkosten aus. Die Variation des VOSL um $\pm 50\%$ führt zu Veränderungen in den externen bzw. sozialen Kosten um $\pm 33\%$ bzw. $\pm 38\%$ im Strassenverkehr, um $\pm 44\%$ bei den sozialen Kosten im Bereich Sport & Freizeit und um $\pm 41\%$ bei den externen Kosten aus Sicht Schwerverkehr.

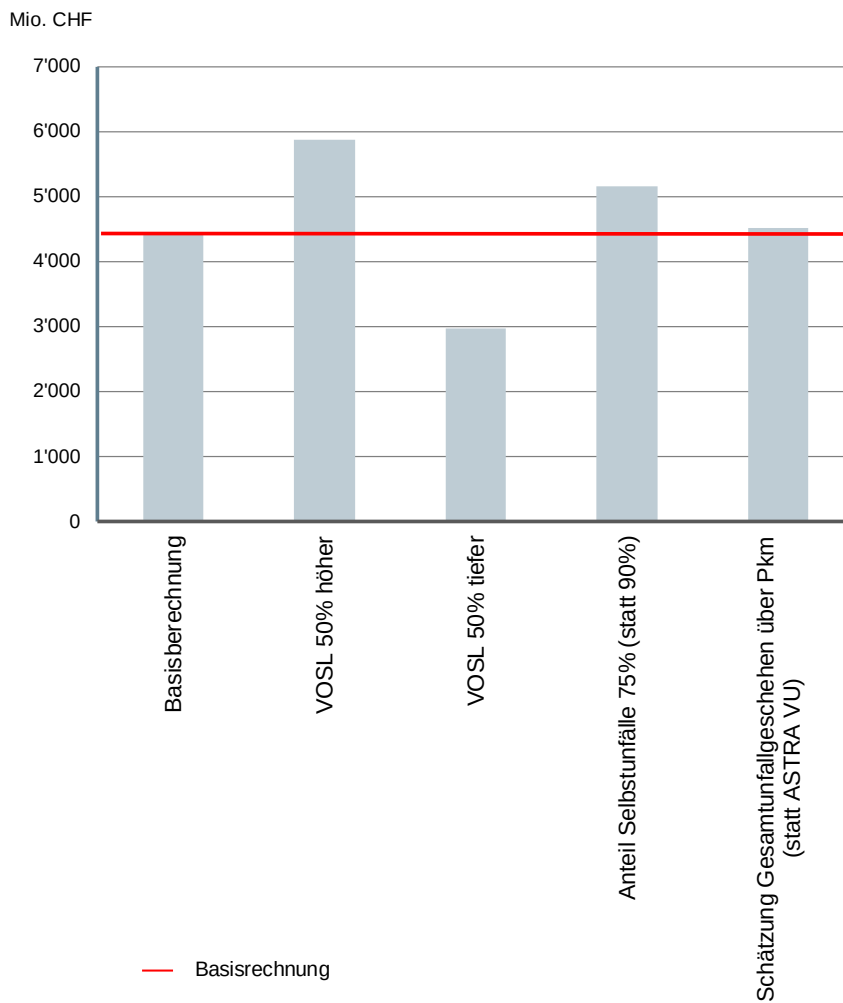
Wird im Mengengerüst zu den Strassenverkehrsunfällen der Anteil der Alleinunfälle bei den nicht-registrierten Verletzten auf 75% (statt 90%) reduziert, steigen die externen Kosten um 17%, aufgrund der veränderten Zuteilung auf Fahrzeugkategorien und verursachende/nicht-verursachende Opfer (insgesamt mehr nicht-verursachende Opfer aufgrund von mehr Kollisionen) sowie entsprechend anderen Internalisierungsmechanismen. Die sozialen Kosten verändern sich nicht, da die Gesamtzahl der Verletzten gleichbleibt. Wenn die Schätzung des Gesamtunfallgeschehens über die Personenkilometer erfolgt, statt über die polizeilich registrierten Unfälle, steigen die externen Kosten um 2%. Bei diesen beiden Analysen ist deutlich spannender, wie sich die Verteilung der Kosten auf die Fahrzeugkategorien verändert (vgl. Ausführungen zu Abbildung 14-51).

Abbildung 14-49: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Unfallkosten, pro Sichtweise, für den Strassenverkehr und den Bereich Sport & Freizeit

	Externe Kosten Sicht Verkehrsteilnehmende		Soziale Kosten		Externe Kosten aus Sicht Schwerverkehr
	Strassenverkehr	Sport & Freizeit	Strassenverkehr	Sport & Freizeit	Strassenverkehr
Basisberechnung	4'425.6	418.6	17'204.9	4'393.7	172.5
VOSL 50% höher	5'872.5	418.6	23'751.0	6'320.0	243.1
VOSL 50% tiefer	2'978.6	418.6	10'658.9	2'467.4	101.9
Anteil Selbstunfälle 75% (statt 90%)	5'169.9	418.6	17'205.0	4'393.7	195.2
Schätzung Gesamtunfallgeschehen über Pkm (statt ASTRA VU)	4'513.3	418.6	17'433.6	4'393.7	172.1
Abweichung von Basisrechnung in %					
VOSL 50% höher	33%	0%	38%	44%	41%
VOSL 50% tiefer	-33%	0%	-38%	-44%	-41%
Anteil Selbstunfälle 75% (statt 90%)	17%	0%	0%	0%	13%
Schätzung Gesamtunfallgeschehen über Pkm (statt ASTRA VU)	2%	0%	1%	0%	0%

Hinweis: Im Bereich Unfälle weichen die externen Kosten aus Sicht Schwerverkehr von der Sicht Verkehrsteilnehmende ab, weshalb hier der Schwerverkehr separat ausgewiesen wird. Die Unfälle in «Sport und Freizeit» werden aufgrund der Abgrenzungsfragen beim Fussverkehr separat ausgewiesen.

Abbildung 14-50: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse. Externe Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende für den Strassenverkehr (ohne Sport & Freizeit)



Im Strassenverkehr haben die beiden Sensitivitäten «Anteil Selbstunfälle 75%» (statt 90% bei nicht-registrierten Unfallopfern) sowie «Schätzung Gesamtunfallgeschehen über Personenkilometer» (statt über pol. reg. Unfälle) vor allem Auswirkungen auf die Verteilung der Kosten auf die Fahrzeugkategorien. Die folgende Abbildung zeigt den Einfluss dieser Eckwerte des Mengengerüsts auf die externen Kosten der verschiedenen Fahrzeugkategorien.

- Eine Reduktion des Anteils der Selbstunfälle bei nicht-registrierten Opfern führt zu einer starken Erhöhung der externen Kosten beim PW und bei Lieferwagen, und reduziert jene der Velos und des öffentlichen Personenverkehrs deutlich.
- Werden die Personenkilometer als Merkmal zur (groben, vorausschauenden) Schätzung des Gesamtunfallgeschehens verwendet, erhöht sich die Gesamtsumme beim PW, beim Velo und beim Fussverkehr. Eine spürbare Reduktion kann bei Motorrädern, Pedelecs und Mofas sowie bei Traktoren/Arbeitsmaschinen festgestellt werden.

Abbildung 14-51: Veränderung der Verteilung der externen Kosten auf die Fahrzeugkategorien bei Veränderung zentraler Annahmen zum Mengengerüst im Strassenverkehr

	Personenverkehr										Güterverkehr				Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr								
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW		SS	Tra/Arb m
in Mio. CHF																	
Basisberechnung	2'596	17	477	40	25	101	518	21	105	44	5	14	218	99	68	78	4'426
Anteil Selbstunfälle 75%	3'233	17	488	44	29	109	493	24	107	40	5	13	288	116	74	89	5'170
Schätzung über PKM	2'694	16	472	38	25	97	524	21	108	40	5	13	217	99	68	76	4'513
Veränderung gg. Basisberechnung (in Mio. CHF)																	
Anteil Selbstunfälle 75%	637.6	0.1	11.0	3.8	4.2	8.7	-25.3	2.7	1.7	-4.1	-0.1	-1.4	70.1	17.7	5.9	11.7	744.4
Schätzung über PKM	98.5	-0.9	-5.0	-1.6	-0.7	-3.2	6.2	-0.8	2.6	-3.4	-0.4	-1.0	-1.1	0.0	0.0	-1.5	87.8
Veränderung gg. Basisberechnung in %																	
Anteil Selbstunfälle 75%	24.6%	0.8%	2.3%	9.6%	16.5%	8.6%	-4.9%	12.6%	1.6%	-9.3%	-2.2%	-10.1%	32.2%	17.9%	8.7%	15.1%	16.8%
Schätzung über PKM	3.8%	-5.2%	-1.0%	-3.9%	-3.0%	-3.2%	1.2%	-3.6%	2.5%	-7.8%	-7.8%	-7.5%	-0.5%	0.0%	0.1%	-1.9%	2.0%

14.8.3 Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen

Tendenziell werden die Unfallkosten leicht unterschätzt, zum Ausmass können keine Aussagen gemacht werden. Wir gehen von folgenden bekannten Unter- bzw. Überschätzungen aus:

- Kosten durch gesundheitliche Spätschäden: Verletzungen können zu gesundheitlichen Spätschäden führen, die erst viele Jahre nach dem Unfallereignis auftreten. Diese Kosten werden nicht berücksichtigt, dürften aber auch vergleichsweise gering sein.
- Die Kosten der Feuerwehr³⁶⁹, falls durch den Unfall ein Brand entsteht (0.97% der Kosten von Unfällen in Belgien), werden vernachlässigt.
- Die Kosten der Besucher, die ihre Angehörigen oder Freunde im Spital besuchen (0.08% der Kosten von Unfällen in Belgien), sind nicht berücksichtigt.

³⁶⁹ Bei Flughäfen mit eigener Feuerwehr sind diese Kosten enthalten.

- Die Zahl der Verletzten im Gesamtunfallgeschehen im Strassenverkehr beinhaltet keine Bagatellverletzungen (Verletzte ohne Arztbesuch). Die Gesamtkosten werden deshalb tendenziell unterschätzt.
- Die Zahl der Verletzten im Gesamtunfallgeschehen im Strassenverkehr ist im Inländerprinzip ermittelt worden. Die Unfallkosten von Ausländern in der Schweiz sind nicht berücksichtigt, dafür die Unfallkosten von Schweizern im Ausland. Weil mutmasslich mehr Ausländer in der Schweiz verunfallen (insbesondere aufgrund der hohen Zahl an Grenzgängern und des Transitverkehrs) dürfte dies zu einer Unterschätzung der Unfallkosten gemäss Territorialitätsprinzip führen.
- Im Schienen- und Luftverkehr liegen keine Daten zur Aufteilung der Schwerverletzten (Bahn, bzw. erheblich Verletzten im Luftverkehr) auf Invaliditätsfälle, Schwerverletzte und Mittelschwerverletzte vor. Die Schwerverletzten werden mit einem gewichteten durchschnittlichen Kostensatz bewertet, wobei der Durchschnitt mangels besserer Daten über die Anzahl der Invaliditätsfälle, Schwerverletzte und Mittelschwerverletzte im Strassenverkehr gebildet wurde. Da im Schienen- und insbesondere im Luftverkehr ein sehr hoher Anteil von Getöteten beobachtet wird (gemessen an der Gesamtzahl der Opfer), dürfte im Schienen- und Luftverkehr die durchschnittliche Verletzungsschwere der Schwerverletzten höher sein als im Strassenverkehr. Die wahren Kosten dürften also höher liegen als hier berechnet.
- Bei der Berechnung im Luftverkehr wird die Zahl der Leichtverletzten unterschätzt, weil nur die Zahl der Unfälle mit maximal Leichtverletzten verfügbar ist, aber nicht die voraussichtlich deutlich höhere Zahl der Leichtverletzten.
- Im Strassenverkehr erfolgt die Aufteilung der polizeilich registrierten Schwerverletzten auf die detaillierten Verletzungsschweren Invaliditätsfälle, Schwerverletzte und Mittelschwerverletzte für alle Fahrzeugkategorien gleich. Das Gesamtergebn stimmt somit, doch dürften die Kosten der schweren Fahrzeugkategorien (z.B. Lastwagen) damit unterschätzt werden, diejenigen der leichten Kategorien (z.B. Velo) überschätzt.
- Bei den zusätzlich einbezogenen Unfällen in Sport & Freizeit im Fuss- und Veloverkehr auf öffentlichen Strassen und Plätzen dürfte die Zahl der ursächlich im Zusammenhang mit den Gefahren der Fortbewegung stehenden Ereignissen tendenziell überschätzt werden. Zum Ausmass der Überschätzung liegen jedoch keine Analysen oder Daten vor.

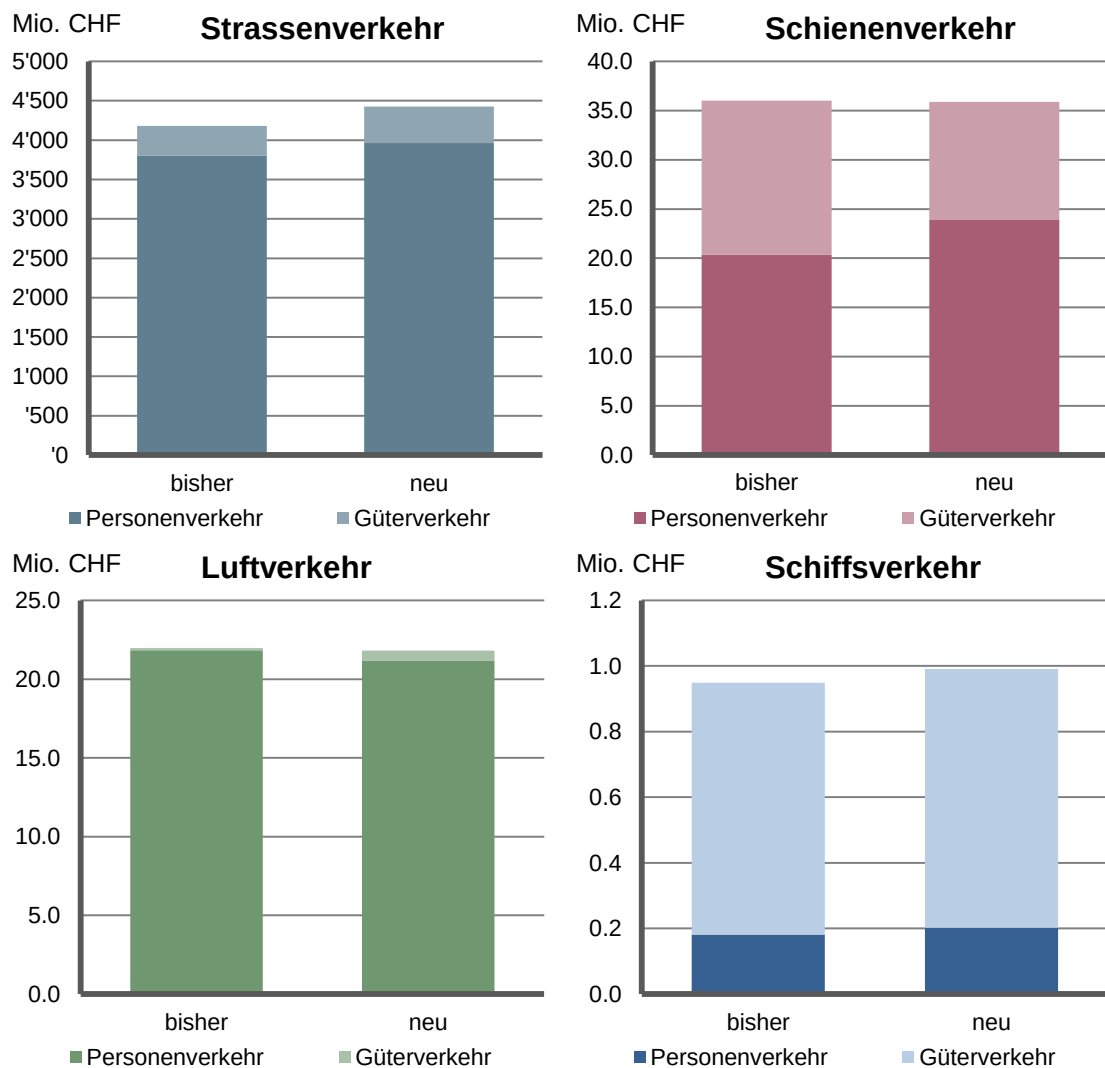
14.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

Im Strassenverkehr sind die «bisherigen Berechnungen» mit dem gleichen Mengengerüst zum Gesamtunfallgeschehen berechnet wie in der neuen Berechnung (geschätzt für 2021). Grund: Die aktuelle Hochrechnung der BFU für 2021 liegt noch nicht vor. Die nachfolgend gezeigten Vergleiche demonstrieren im Strassenverkehr somit die Veränderungen, die sich aus der Anpassung im Verursacherprinzip sowie im Wertgerüst ergeben. Allfällige Unterschiede, die sich aus der kurzfristigen Schätzung des Gesamtunfallgeschehens zur Originalquelle (BFU-Hochrechnung) ergeben würden, sind nicht abgebildet. Auch für Unfälle in Sport- und Freizeit im Fuss- und Veloverkehr liegen keine aktuellen Werte für 2021 vor, weshalb wir uns hier (voraussichtlich auch in Zukunft) auf die Zahlen des Vorjahres (2020) abstützen.

Im Schienenverkehr ergibt sich eine Verschiebung vom Verursacher Güterverkehr hin zum Personenverkehr. Dies ist darauf zurückzuführen, dass neu die aktuellen Daten der Ereignisdatenbank zur Identifizierung der Verursacher verwendet werden und nicht mehr die konstanten Anteile aus dem Jahr 2015. Hier gab es in den letzten Jahren gemäss den Daten des BAV eine Verschiebung von durch Dritten verursachten Unfällen mit verletzten Reisenden (gelten als Unfallverursacher) hin zu durch den Schienenverkehr (Personenverkehr) verursachten Unfällen mit verletzten Reisenden (gelten als Nicht-Unfallverursacher).

Im Luftverkehr ergibt sich eine leichte Verschiebung hin zum Güterverkehr, welche aber in der Gesamtsumme nicht ins Gewicht fällt.

Abbildung 14-52: Vergleich der externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende



Achtung: Die Skalen der vier Verkehrsträger sind unterschiedlich

Abbildung 14-53: Vergleich der externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	3'800.22	379.35	4'179.6
Schienenverkehr	20.4	15.6	36.0
Luftverkehr	21.8	0.1	22.0
Schiffsverkehr	0.2	0.8	0.9
Total	3'842.6	395.9	4'238.5
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	3'963.3	462.3	4'425.6
Schienenverkehr	23.9	11.9	35.9
Luftverkehr	21.2	0.7	21.8
Schiffsverkehr	0.2	0.8	1.0
Total	4'008.6	475.7	4'484.3
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	4.3%	21.9%	5.9%
Schienenverkehr	17.6%	-23.7%	-0.3%
Luftverkehr	-3.1%	363.9%	-0.7%
Schiffsverkehr	11.5%	2.8%	4.4%
Total	4.3%	20.1%	5.8%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	163.1	82.9	246.0
Schienenverkehr	3.6	-3.7	-0.1
Luftverkehr	-0.7	0.5	-0.2
Schiffsverkehr	0.0	0.0	0.0
Total	166.0	79.8	245.8

Durch die neue Methodik zur Herleitung des Verursacherprinzips im Strassenverkehr – mit Verwendung des Kriteriums «Hauptverursacher» – ergibt sich eine Verschiebung zwischen den Fahrzeugkategorien, insbesondere vom Fuss- und Veloverkehr hin zu Personenwagen. Der Anteil der Personenwagen erhöht sich um 10%-Punkte, derjenige von Velos verringert sich um 7%-Punkte. Ein Teil der Reduktion beim Veloverkehr ist auch mit der Einführung der Pedelecs als neue Kategorie zu erklären, die bisher implizit bei den Velos enthalten waren. Eine beinahe 1:1-Verschiebung von Mofas zu E-Bikes kann analog mit dem separaten Ausscheiden der Kategorie E-Bike erklärt werden.

Abbildung 14-54: Veränderung der Verteilung der externen Unfallkosten im Strassenverkehr auf die Fahrzeugkategorien

in Mio. CHF	Personenverkehr									Güterverkehr				Gesamt- total			
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr								
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li		LW	SS	Tra/Arbm
Bisherige Ergebnisse 2021	1'868	41	453	64	-	-	736	90	205	5	2	8	239	75	51	14	3'850
Neue Ergebnisse 2021	2'596	17	477	40	25	101	518	21	105	44	5	14	218	99	68	78	4'426
Differenz (in Mio. CHF)	728	-24	24	-24	25	101	-218	-68	-100	39	3	6	-21	23	18	63	576
Differenz in %	39%	-59%	5%	-37%	k.W.	k.W.	-30%	-76%	-49%	839%	143%	78%	-9%	31%	35%	442%	15%
Anteilsdifferenz (%-Punkte)	10%	-1%	-1%	-1%	1%	2%	-7%	-2%	-3%	1%	0%	0%	-1%	0%	0%	1%	0%
Anteilsdifferenz nach Verkehrsform	7.7%				-9.4%					1.0%			0.6%				0.0%

k.W.: = kein Wert berechnet / berechenbar

15 Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr

15.1 Berechnungsgegenstand

Die körperliche Betätigung im Fuss- und Veloverkehr wirkt sich positiv auf die Gesundheit aus und führt zu zusätzlichen Lebensjahren sowie vermiedenen Krankheitsfällen. Damit können medizinische Behandlungskosten, Produktionsausfälle, Wiederbesetzungskosten und immaterielle Kosten eingespart werden.

Die Nutzen aus der körperlichen Aktivität im Fuss- und Veloverkehr sind primär privat, d.h. diejenige Person, die körperlich aktiv ist, profitiert auch von der besseren Gesundheit. Von einem Teil der positiven Auswirkungen profitieren aber auch Dritte: Der verbesserte Gesundheitszustand führt zu einer Reduktion von Krankheitsfällen, was Einsparungen bei den medizinischen Heilungskosten, bei den Produktionsausfällen und bei den Wiederbesetzungskosten zur Folge hat. Da diese Kosten auf Krankenkassen (bei den medizinischen Heilungskosten), Gesellschaft (bei den Netto-produktionsausfällen) und Arbeitgeber (bei den Wiederbesetzungskosten) überwält werden, entstehen durch die körperliche Aktivität nicht nur private Nutzen bei den Teilnehmern des Fuss- und Veloverkehrs, sondern auch externe Nutzen (in Form von eingesparten Kosten) bei Dritten. Zudem können durch die Vermeidung von frühzeitigen Todesfällen Hinterlassenenrenten (Witwen-, Witwer- und Waisenrenten) eingespart werden, die von der AHV und damit von der Allgemeinheit zu bezahlen wären.

Neben den externen Nutzen sollen aber auch die sozialen Nutzen des Fuss- und Veloverkehrs bestimmt werden, um das gesamte Ausmass der entstehenden Nutzen aufzuzeigen und wie in allen anderen Bereichen (Kapitel 4 bis 14) auch die sozialen Effekte darstellen zu können. Die sozialen Nutzen fliessen zwar nicht in die BFS-Statistik der Kosten und Finanzierung des Verkehrs ein,³⁷⁰ fallen aber als Zwischenergebnis auf dem Weg der Berechnung der externen Nutzen ohnehin an und werden deshalb hier auch mit ausgewiesen.

Bei den eingesparten Gesundheitskosten (z.B. eingesparte medizinische Heilungskosten) als Folge der körperlichen Aktivität im Fuss- und Veloverkehr handelt es sich um echte Ressourceneinsparungen: Wenn man auf die Ortsverschiebung mit dem Fuss- und Veloverkehr verzichtet und zuhause bleibt (Referenzfall³⁷¹), dann fehlt der positive Effekt auf den Gesundheitszustand und die Personen wären potenziell häufiger krank und würden mehr Kosten verursachen. In diesem Sinne handelt es sich aus volkswirtschaftlicher Sicht um eine Ressourceneinsparung, die als Nutzen zu betrachten ist.

³⁷⁰ BFS Bundesamt für Statistik (2019b)

³⁷¹ Der Referenzfall der gesamten Transportrechnung (bzw. der Bestimmung der externen Kosten) ist immer der Zustand ohne Aktivität im Verkehr (bzw. man bleibt zu Hause).

15.2 Bewertungsmethodik und wesentliche Anpassungen

15.2.1 Wesentliche Anpassungen in der Bewertungsmethodik

Die Bewertungsmethodik kann im Wesentlichen aus den bisherigen Arbeiten übernommen werden und wird in Kapitel 15.2.2 erläutert. Im Folgenden soll jedoch kurz auf die wesentlichen Änderungen zur bisherigen Methodik eingegangen werden:

- Neu können neben den Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr auch die **Gesundheitsnutzen durch Pedelec und E-Bike** miteinbezogen und separat berechnet werden. Die Gesundheitseffekte werden basierend auf Belastungs-Wirkungs-Beziehungen für körperliche Aktivität hergeleitet. Die unterschiedlichen Effektstärken für Fussverkehr, Velo, Pedelec und E-Bike werden mittels Schätzer für die Intensität dieser Aktivitäten berücksichtigt. Hierzu gibt es mittlerweile auch Studien zu Pedelecs und E-Bikes.³⁷² Die unterschiedlichen Weglängen und Nutzungshäufigkeiten von Elektrovelos werden aus den MZMV-Daten abgeleitet (Mikrozensus Mobilität und Verkehr). Unterschiedliche Altersverteilungen der Bevölkerungssegmente, die neu durch Elektrovelos erreicht werden, ergeben sich ebenfalls aus den MZMV-Daten, und werden durch altersspezifische Sterbe- und Krankheitsraten in der Gesundheitsnutzenberechnung berücksichtigt.
- Das generelle Aktivitätsverhalten (Baseline körperliche Aktivität) hat einen erheblichen Einfluss auf die Nutzen aus der Aktivität aus dem Fuss- und Veloverkehr – wenig aktive Menschen profitieren stärker als bereits sehr aktive. Die Berücksichtigung der Baseline Aktivität wird überarbeitet unter Verwendung von Daten aus der Schweizerischen Gesundheitsbefragung (SGB) 2017, welche eine verfeinerte Berücksichtigung der Gesamtaktivität, bzw. deren Zuordnung zu Nutzern des Fuss- und Veloverkehrs erlaubt. Allerdings unterscheidet die SGB nicht zwischen Fuss und Velo, geschweige denn Pedelec und E-Bikes. Trotz dieser und weiterer Limitationen stellen die SGB-Daten die bestmögliche, aktuelle, wenn auch nicht ideale Grundlage für eine realistische Berücksichtigung der Baseline Aktivität dar. Die SGB-Daten ermöglichen es die nicht-linearen Belastungs-Wirkungs-Beziehung zwischen körperlicher Aktivität, bzw. zwischen Fuss- und Veloverkehr und Gesundheitsfolgen realistischer anzuwenden, und insbesondere der Tatsache besser Rechnung zu tragen, dass z.B. Velofahrende und zu Fussgehende generell aktiver sind als die Durchschnittsbevölkerung. Trotz der verbesserten Datengrundlage (gegenüber der bisher verwendeten Sport Schweiz Befragung) muss sich die Verknüpfung von SGB- und MZMV-Daten auf Annahmen abstützen. Dies betrifft insbesondere die Umrechnung der Aktivitätsvariablen in Metabolische Äquivalenzeinheiten (METs), den Abgleich der Fuss- und Velo-Aktivität, welche in der SGB deutlich gröber erfasst wird als im MZMV (z.T. keine Unterscheidung von Fuss und Velo; keine Unterscheidung von E-Bikes), sowie Annahmen zur Interpretation der erhobenen Aktivitätsgrößen (Stichwort: Vergleichsanordnung, vgl. Kapitel 15.3.1f).
- Für die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen werden neue Studien berücksichtigt, insbesondere Garcia et al. 2023 für Herzkreislauf- und Krebserkrankungen, und deren weitere Analysen zu

³⁷² Für fäG (fahrzeugähnliche Geräte) fehlen jedoch weiterhin Schätzungen zur Intensität der körperlichen Aktivität.

Diabetes und Demenz.³⁷³ Prinzipiell müsste auch die Wahl der betrachteten Krankheitsbilder überprüft und bei Bedarf angepasst werden. Dies kann aufgrund des dafür erforderlichen Aufwandes im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt werden.

- Bei Diabetes und Demenz werden neu neben den Kosten aufgrund von Spitalaufenthalten auch weitere Kosten miteinbezogen, wie z.B. Pflegekosten (bei Demenz hoch), Arztkosten, Medikamentenkosten, Produktionsausfälle und immaterielle Kosten aufgrund der Krankheiten (vgl. Kapitel 20.4). Dies basiert auf der Abschätzung vermiedener Inzidenzen (Neuaufreten einer Krankheit), welche die bisherige Abschätzung vermiedener Spitaleintritte ergänzt. Für die übrigen vier Krankheitsbilder (Herz- / Kreislauferkrankungen, Brustkrebs, Kolonkrebs und Depression) können die Inzidenzen jedoch nicht bewertet werden, weil wir auftragsgemäss auf die Erhebung entsprechender Kostensätze verzichtet haben.
- Herz- / Kreislauferkrankungen werden neu aufgrund der aktualisierten Evidenz zu den Expositions-Wirkungs-Beziehungen viel breiter berücksichtigt als bisher,³⁷⁴ was zu einer deutlich höheren Anzahl Fälle führt.
- Bei den übrigen Krankheitsbildern wird die bisherige Bewertungsmethodik im Wesentlichen weiterverwendet. Es werden jedoch teilweise bessere Datengrundlagen benutzt. So können die Spitalkosten aufgrund neuer Datengrundlagen genauer ermittelt werden. Ansonsten werden die Kostensätze mit den aktuellen Datengrundlagen für 2021 aufdatiert.
- Neu werden bei den Sensitivitätsanalysen die Berechnung der Baseline Aktivität und die Vergleichsanordnung variiert.
- Zudem erfolgt neu wie bei allen Kostenbereichen die Differenzierung nach den Kantonen.³⁷⁵

15.2.2 Verwendete Bewertungsmethodik

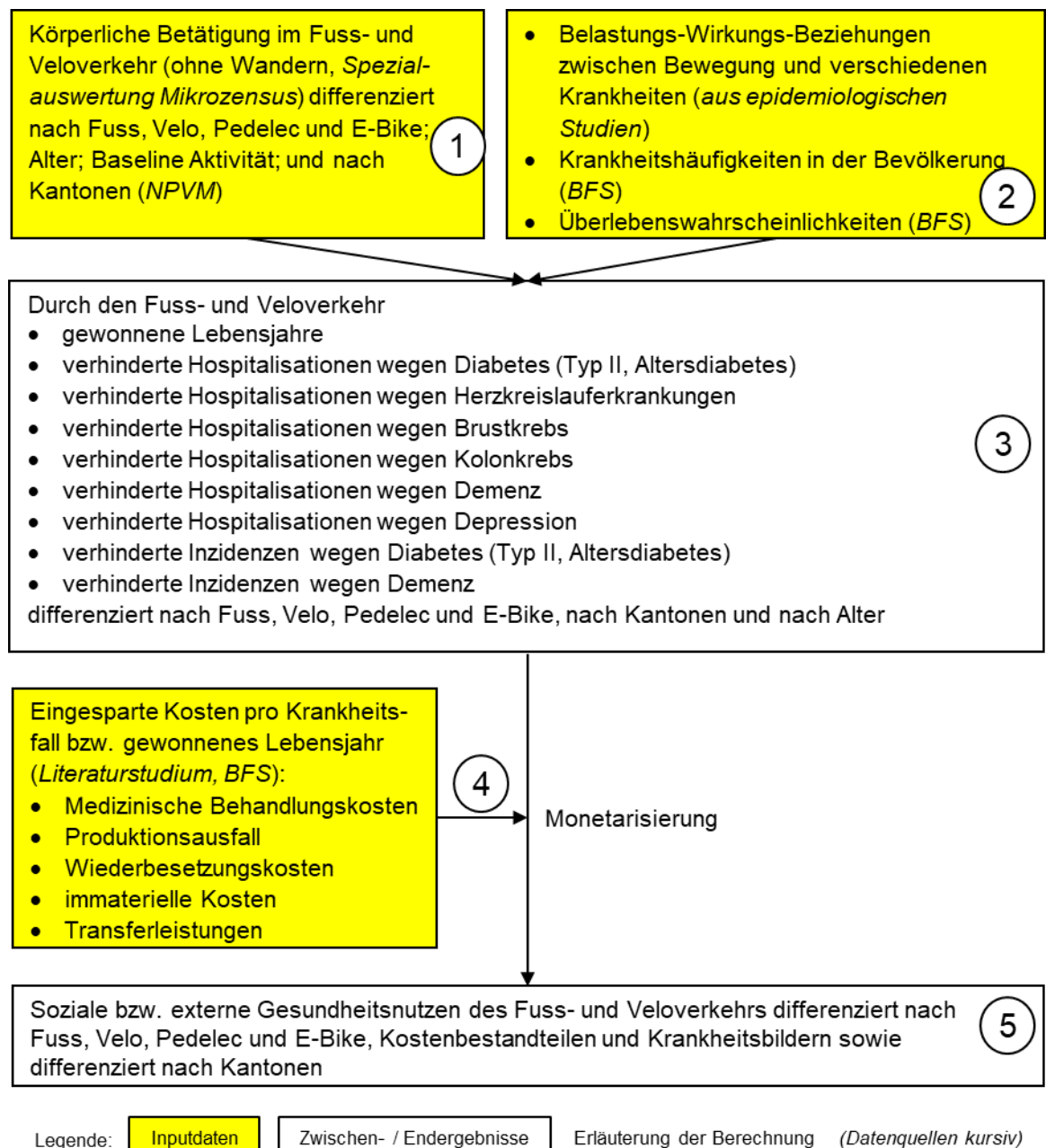
Die Bewertungsmethodik für die Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs in der Schweiz orientiert sich stark an der Methodik der Gesundheitskosten durch Luft- und Lärmbelastung. Die gewonnenen Lebensjahre und die verhinderten Krankheitsfälle (Schritt 3 in Abbildung 15-1) errechnen sich aus dem Ausmass der körperlichen Betätigung im Fuss- und Veloverkehr (Schritt 1) und den Belastungs-Wirkungs-Beziehungen zwischen Bewegung und verschiedenen Krankheitsbildern (Schritt 2). Diese werden mit den gleichen Kostensätzen pro Krankheitsfall bzw. gewonnenem Lebensjahr monetarisiert wie die Gesundheitskosten durch Luft- und Lärmbelastung, wobei die Transferleistungen (Hinterlassenenrenten) aus dem Unfallbereich übernommen werden (Schritt 4). Zudem sind bei der Luft- und Lärmbelastung die gesamten Gesundheitskosten extern, bei den Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehr ist ein Teil der Nutzen jedoch privat. Wie gross dieser Anteil ist, wird in Kapitel 15.4.2 bestimmt. Schliesslich ergeben sich die sozialen bzw. externen Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs (Schritt 5).

³⁷³ Garcia; Pearce; Abbas; u. a. (2023); Garcia; Woodcock (2023)

³⁷⁴ Es wird die gesamte ICD10-Gruppe I berücksichtigt (früher nur ausgewählte Krankheitsbilder aus ICD10 I).

³⁷⁵ Auf eine Differenzierung nach Antriebsart kann verzichtet werden, da dies mit der Differenzierung nach den Fahrzeugkategorien Fuss, Velo, Pedelec und E-Bike bereits abgedeckt ist. Die Differenzierung nach Raumtypen ist bei den Gesundheitsnutzen nicht vorgesehen (vgl. Kapitel 2.4.2).

Abbildung 15-1: Bewertungsmethodik für die Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr



15.3 Mengengerüst

15.3.1 Methodik

Die Berechnungen für das Mengengerüst haben zum Ziel, die Anzahl verhinderter frühzeitiger Todesfälle und Krankheitsfälle zu berechnen.

Die Gesundheitswirkungsanalyse wird differenziert nach Altersklassen und Geschlecht durchgeführt. Innerhalb dieser Strata wird für den Fuss- und Veloverkehr die körperliche Aktivität, bzw. die daraus resultierende Verringerung des Gesundheitsrisikos berechnet.

Für die Altersstratifizierung werden zwei unterschiedliche Definitionen für die Altersklassen angewendet, welche jeweils den Definitionen in den unterschiedlichen Sekundärdaten entsprechen (Mortalität, Morbidität).

Bei den hergeleiteten Variablen, namentlich Geschwindigkeit und körperliche Aktivität, ergeben sich mehrere Möglichkeiten wie disaggregierte, bzw. aggregierte Zwischenvariablen verwendet werden können: Herleitung der Variable in disaggregiertem Zustand, danach Aggregation der Endvariable, oder Aggregation der Zwischenvariablen (z.B. Durchschnittsdistanz, Durchschnittsdauer) und danach Herleitung der Schlussvariable basierend auf Mittelwerten. Während die erstere Variante die Individuelle Streuung eins-zu-eins berücksichtigt, puffert letztere Variante die individuellen Extremwerte. Da nicht offensichtlich ist, welche Variante die korrektere ist, wird der Mittelwert aus beiden verwendet.³⁷⁶ Bei der Bestimmung der durchschnittlichen körperlichen Aktivität werden vier Varianten berechnet und es wird wiederum der Mittelwert verwendet.³⁷⁷

a) Verkehrsleistungen des Fuss- und Veloverkehrs

Die Verkehrsleistungen des Fuss- und Veloverkehrs werden in Kapitel 20.1.2 erläutert. Diese Daten stammen aus dem MZMV 2021.

b) Körperliche Aktivität aus dem Fuss- und Veloverkehr

Die Geschwindigkeit wird zur Herleitung der Intensität der körperlichen Aktivität verwendet, welche – multipliziert mit der Dauer – die Belastung durch die körperliche Aktivität ergibt.

Um die körperliche Aktivität im Fuss-, Velo-, Pedelec- und E-Bike-Verkehr herzuleiten, wurde auf Grund der Etappengeschwindigkeit aus den MZMV Daten (vgl. Abbildung 20-3) eine Intensität der Aktivität berechnet, welche multipliziert mit der Etappendauer den Umfang der körperlichen Aktivität bestimmt. Für das zu Fuss Gehen und das Velofahren stehen genügend Intensitätsschätzer zur Verfügung, um kontinuierliche Funktionen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit herzuleiten.³⁷⁸

³⁷⁶ Für die Berechnung der Durchschnitts-Geschwindigkeit ergeben sich also 2 Varianten, sowie der Durchschnitt aus beiden:

- Geschwindigkeit_dis = Durchschnitt (individuelle Geschwindigkeiten (=ind. Distanz / ind. Dauer))
- Geschwindigkeit_agg = Durchschnitt (individuelle Distanzen) / Durchschnitt (individuelle Dauer)

Verwendet wird der Durchschnitt: Geschwindigkeit_ave = Durchschnitt (v_dis, v_agg)

³⁷⁷ Die Berechnung der durchschnittlichen körperlichen Aktivität erfordert einen weiteren Rechnungsschritt. Die Intensität wird in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit berechnet, wobei neben den drei Varianten für die Durchschnittsgeschwindigkeit zusätzlich auch mit der individuellen Geschwindigkeit gerechnet wird.

- Aktivität_1 = Dauer_i * Intensität_i (= Geschwindigkeit_i (=Distanz_i / Dauer_i))
- Aktivität_2 = Dauer_i * Intensität_i (= Geschwindigkeit_dis)
- Aktivität_3 = Dauer_i * Intensität_i (= Geschwindigkeit_agg)
- Aktivität_4 = Dauer_i * Intensität_i (= Geschwindigkeit_ave)

Schlussendlich wird der Durchschnitt aus diesen vier Varianten verwendet.

³⁷⁸ Ainsworth; Haskell; Herrmann; u. a. (2011a)

Für Elektrovelos (Pedelegs und E-Bikes) ist dies nicht der Fall. Für diese stützen wir uns auf den Konsens einer WHO-Expertengruppe ab, welche im Rahmen des HEAT-Projekts³⁷⁹ die Intensität von Elektrovelofahren relativ zu Fuss- und Veloverkehr wie folgt einschätzte: Elektrovelo 5.5 METs³⁸⁰ (gilt für Pedelegs und E-Bikes), zu Fuss Gehen 4 METs, Velofahren 6.8 METs. Für Elektrovelos wenden wir daher das Verhältnis zwischen Elektrovelo und Velo gemäss HEAT (d.h. 5.5 / 6.8) auf die Velo-Intensitätsfunktion an.

Fahrzeugähnliche Geräte (fäG) werden nicht untersucht, weil für die Intensität der körperlichen Betätigung bei fäG keine Daten vorhanden sind³⁸¹. Diese Vernachlässigung ist nicht entscheidend, weil die fäG-Nutzung relativ gering ist (0.8% aller Etappen) und weil die fäG in erster Linie von jungen Leuten genutzt werden, bei denen die Gesundheitseffekte weniger stark ins Gewicht fallen.

c) Gesundheitseffekte der körperlichen Aktivität aus dem Fuss- und Veloverkehr

Die positiven Auswirkungen des Fuss- und Veloverkehrs auf die Gesundheit werden anhand der aus dem zu Fuss Gehen und dem Velofahren resultierenden körperlichen Aktivität ermittelt. Insbesondere wurden dabei folgende Effekte berücksichtigt:

- Reduktion der Gesamtmortalität, d.h. gewonnene Lebensjahre und Erwerbsjahre (bzw. verhinderte frühzeitige Todesfälle)
- Reduktion von Hospitalisationen
 - Diabetes (Typ II – Altersdiabetes)
 - Herz- / Kreislauferkrankungen
 - Brustkrebs
 - Kolonkrebs³⁸²
 - Demenz
 - Depression
- Geringere Inzidenz (Neuauftreten einer Krankheit) von
 - Diabetes (Typ II – Altersdiabetes)
 - Demenz (ab 40 Jahren – wie bei Luftbelastung)

Es werden also nicht nur die Auswirkungen auf die Mortalität untersucht, sondern auch die Auswirkungen bzw. positiven Effekte auf sechs Krankheitsbilder (wobei bei allen sechs Krankheitsbildern die Hospitalisationen berücksichtigt werden sowie zusätzlich bei zwei Krankheitsbildern die Inzidenzen). Weitere Krankheitsbilder, die durch körperliche Aktivität gemildert werden, werden in dieser Studie nicht berücksichtigt (z.B. Hirnschlag, Osteoporose, weitere Krebsarten).³⁸³ Die wichtigsten Schritte werden im Folgenden erläutert.

³⁷⁹ World Health Organization Regional Office for Europe (2024)

³⁸⁰ Das metabolische Äquivalent (engl. metabolic equivalent of task) – kurz MET – wird verwendet, um den Energieverbrauch eines Menschen bei verschiedenen Aktivitäten zu vergleichen.

³⁸¹ Ainsworth; Haskell; Herrmann; u. a. (2011b)

³⁸² Der Kolon (oder Colon) ist der mittlere Abschnitt des Dickdarms (auch Grimmdarm genannt).

³⁸³ Garcia; Pearce; Abbas; u. a. (2023); Garcia; Woodcock (2023); Physical Activity Guidelines Advisory Committee (2018)

d) Belastungs-Wirkungs-Beziehungen

Im Rahmen des vorliegenden Projektes werden die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen gemäss Stand der neusten Literatur aktualisiert. Hierzu wird insbesondere ein grosses Meta-Analyse-Projekt der University of Cambridge herangezogen, welches für eine grosse Anzahl Krankheitsbilder, inklusive der hier betrachteten Herz- / Kreislauf- und Krebserkrankungen sowie Demenz und Depression, kontinuierliche Belastungs-Wirkungs-Beziehungen, d.h. in Abhängigkeit von körperlicher Aktivität (gemessen in MET-Stunden pro Woche (METhrs/wk)), hergeleitet hat.³⁸⁴ Somit liegen neu für sämtliche betrachteten Krankheitsbilder methodisch robuste und vergleichbare Belastungs-Wirkungs-Beziehungen vor. Für gewisse Krankheitsbilder (Herz-Kreislauf, Brustkrebs) basieren diese auf Krankheits-spezifischen Todesfällen. Für diese wird angenommen, dass die Belastungs-Wirkungs-Beziehung für nicht-tödliche Fälle dieselbe ist.

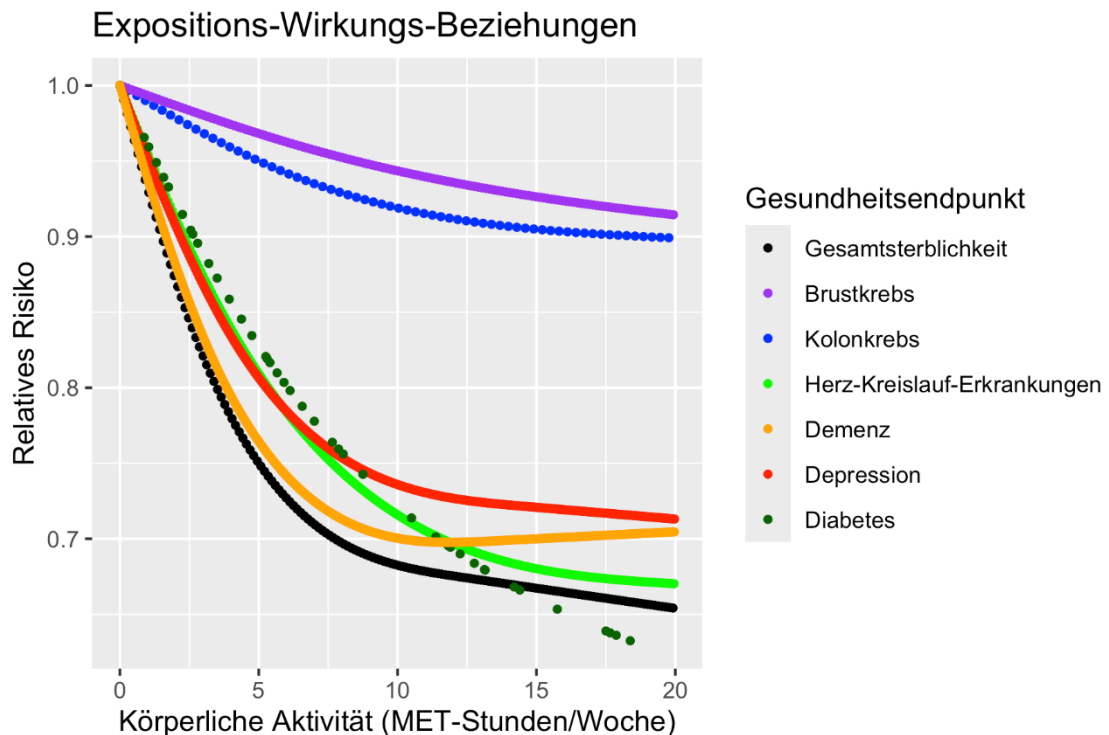
Ein weiterer Effekt der neuen Meta-Analysen ist, dass die Bandbreiten der Unsicherheiten (i.e. 95% Konfidenzintervalle) gering sind, in der Regel weniger als 10%. Daher werden diese in den Sensitivitätsanalysen nicht berücksichtigt.

Die folgende Abbildung zeigt die nicht-linearen Belastungs-Wirkungs-Beziehungen für die betrachteten Krankheitsbilder.³⁸⁵ Zu bemerken ist hier u.a., dass die Belastungs-Wirkungs-Beziehung für Herz-Kreislaufkrankheiten neu einen deutlich stärkeren Zusammenhang mit körperlicher Aktivität aufzeigt, als bisher bekannt war.

³⁸⁴ Garcia; Pearce; Abbas; u. a. (2023); Garcia; Woodcock (2023)

³⁸⁵ Diese Belastungs-Wirkungs-Beziehungen sind sogenannte «splined curves», d.h. sie sind als grosse Tabellen mit Schätzern für kleine Intervalle definiert und können nicht als einfache Formeln ausgedrückt werden. Deshalb werden sie im Folgenden in einer Abbildung dargestellt.

Abbildung 15-2: Belastungs-Wirkungs-Beziehung zwischen körperlicher Aktivität und den betrachteten Gesundheitsendpunkten³⁸⁶



e) Körperliche Aktivität aus anderen Tätigkeiten (Baseline Aktivität)

Die Expositions-Wirkungs-Beziehungen zwischen körperlicher Aktivität und Gesundheit sind nicht-linear. Das heisst, dass Personen, die generell wenig aktiv sind, einen grösseren Gesundheitsnutzen erhalten als Personen, die bereits aktiver sind. Das generelle Aktivitätsverhalten (d.h. Baseline Aktivität, bzw. andere Aktivitäten als im Fuss- und Veloverkehr) hat somit einen erheblichen Einfluss auf den Nutzen der Aktivität aus dem Fuss- und Veloverkehr – wenig aktive Menschen profitieren stärker als bereits sehr Aktive. Hieraus ergeben sich wichtige methodische Konsequenzen: einerseits gilt es, „andere Aktivität“ einzuschätzen, zudem hat die „Vergleichsanordnung“, d.h. wie die Wirkung der Fuss- und Veloaktivität mit der Wirkung anderer Aktivität verglichen wird, Einfluss auf die Ergebnisse.

Baseline Aktivität aus der SGB

Die Berücksichtigung der Baseline Aktivität, welche bisher auf einer relativ rudimentären Erfassung von sportlicher Aktivität basierte, wurde ersetzt und überarbeitet unter Verwendung von Daten aus

³⁸⁶ Sämtliche Belastungs-Wirkungs-Beziehungen für körperliche Aktivität und die betrachteten Krankheitsbilder, inkl. der ihnen zu Grunde liegenden Daten, sind in der folgenden Web-Applikation einsehbar: <https://shiny.mrc-epid.cam.ac.uk/meta-analyses-physical-activity/> Garcia; Pearce; Abbas; u. a. (2023); Garcia; Woodcock (2023); Pearce; Garcia; Abbas; u. a. (2022). Die Punktedichte der Kurven reflektiert die unterschiedlich umfangreiche Datengrundlage.

der Schweizerischen Gesundheitsbefragung (SGB) 2017.³⁸⁷ Im Gegensatz zur Sport Schweiz Befragung von 2010 erfragt die SGB 2017 die Gesamtaktivität direkt, bzw. über ein Konstrukt von 4 Fragen.³⁸⁸ Für die hierzu gestellten Fragen gibt es Umrechnungsalgorithmen, welche die Antworten in kontinuierliche Aktivitätsskala in MET-h/Woche übersetzen.³⁸⁹

Da die Befragung zudem Fragen zum zu Fuss Gehen und Velofahren beinhaltet, lässt sich annäherungsweise abschätzen, wie hoch die Baseline Aktivität von Fussgängern und Velofahrern ist, und diese in Kombination mit den MZMV-Daten verwenden, wo keine Angaben zur Baseline Aktivität zur Verfügung stehen.

Trotz der verbesserten Datengrundlage und klarer konzeptueller Vorteile gegenüber der Sport Schweiz Befragung stellen sich auch für die Verknüpfung von SGB- und MZMV-Daten erhebliche Herausforderungen. Dies betrifft insbesondere die Umrechnung der Aktivitätsvariablen in Metabolische Äquivalenzeinheiten (METs), den Abgleich der Fuss- und Velo-Aktivität zwischen SGB und MZMV, sowie die Plausibilisierung der SGB-Werte zu Gesamt- und Fuss-Velo-Aktivität. Die wichtigsten Herausforderungen werden hier aufgeführt:

- In der SGB wurden Fuss- und Veloaktivität nicht getrennt erfasst, weshalb wir die Annahme treffen müssen, dass das Verhältnis zwischen Fuss- bzw. Veloaktivität und Baseline Aktivität bei Fussgängern und Velofahrenden gleich ist.
- Des Weiteren reduziert die unterschiedliche Erhebungsmethode (SGB: Kategorische Frage nach Häufigkeit; MZMV: detailliertes Wegetagebuch), sowie die unterschiedlichen Fragekonstrukte die Vergleichbarkeit der erhobenen Werte.
- Die Erfassung der Gesamtaktivität gilt als anspruchsvoll, da mehrere Aktivitätsaspekte stark vereinfacht erfasst und kombiniert werden müssen. Es wird die Häufigkeit und Dauer von Aktivitäten erfragt, welche zu erhöhtem Atmen oder Schwitzen führen.³⁸⁸ Ein Vergleich mit Fuss-Velo-Angaben und Sport-Angaben ebenfalls aus der SGB deutet darauf hin, dass diese Größen nur sehr grob erfasst werden können, und Inkonsistenzen auf individueller Ebene häufig sind.
- Eine weitere Herausforderung stellt die Standardisierung der Aktivitätsvariablen dar. Hierzu werden die Angaben der diversen kategorischen Aktivitätsvariablen in MET-h/Woche umgerechnet. Aus der SGB stehen Variablen zu Gesamtaktivität, Fuss- und Veloverkehr, und "Sport" (Gymnastik, Fitness, Sport) zur Verfügung, aus dem MZMV die Etappendauer, unterschieden nach Verkehrsmittel. Das relevante Mass für körperliche Aktivität setzt sich aber zusammen aus

³⁸⁷ In der Ausgabe 2022 der SGB wurden diese Fragen durch Fragen zu COVID ersetzt.

³⁸⁸ 1. Kommen Sie in Ihrer Freizeit mindestens einmal pro Woche durch körperliche Betätigung zum Schwitzen? z.B. durch Rennen, Velofahren, Sport treiben usw.
2. An wie vielen Tagen pro Woche im Durchschnitt?
3. Jetzt geht es um weniger intensive Bewegungsformen. Also um Aktivitäten, wo Sie zumindest ein bisschen ausser Atem kommen, aber nicht unbedingt ins Schwitzen. Das sind zum Beispiel zügiges Laufen, Wandern, Tanzen, Gartenarbeiten: An wievielen Tagen pro Woche machen Sie solche körperliche Aktivitäten?
4. Wie lange sind Sie an jedem von diesen Tagen aktiv, im Durchschnitt?

³⁸⁹ Ainsworth; Haskell; Herrmann; u. a. (2011b)

Dauer und Intensität der Aktivität. Intensität wird nicht direkt erfragt, sondern durch Aktivitätsattribute angenähert (z.B. schwitzen, ausser Atem kommen, zu Fuss gehen, Velofahren), für welche dann Standardwerte für die Intensität zur Verfügung stehen.³⁹⁰

- In der SGB werden nicht einzelne Aktivitäten erfragt, sondern Indikatoren für die Gesamtaktivität aus einer Kombination von Fragen zu Intensität, Häufigkeit und Dauer von körperlicher Aktivität abgeleitet. Für Sport wird nur die Häufigkeit, aber nicht die Dauer oder Intensität erfragt. Für den Fuss- und Veloverkehr die Dauer, wie oben beschrieben.
- Des Weiteren sind die Fragen in der SGB kategorisiert, mit teils offenen Kategorien (weniger als, mehr als). Für die Umrechnung in MET-h/Woche werden die Kategorie-Mittelwerte verwendet, für die offenen Kategorien Werte nach dem best-guess Prinzip zugewiesen (z.B. der offenen Kategorie «2 Stunden oder mehr» wird ein Wert von 2.5h zugewiesen).

Es wurden detaillierte Kalibrierungsschritte und Vergleiche vorgenommen, um die Plausibilität der Daten sicherzustellen. Hieraus ergaben sich insbesondere folgende Schlussfolgerungen (für Details, siehe Anhang B, Kapitel 21):

- Die aus der SGB und dem MZMV hergeleiteten Angaben zur Fuss- und Velonutzung (Dauer) sind vergleichbar. Die Altersverteilung wird von beiden Befragungen gut erfasst. Die MZMV-Werte sind tendenziell höher, bis zu max. 20%, ausser für die ältesten Altersgruppen (vgl. Abbildung 21-1), was mit der unterschiedlichen, genaueren Erfassung im MZMV erklärbar ist. Es werden die genaueren Daten aus dem MZMV verwendet.
- Die Daten deuten darauf hin, dass «Gesamtaktivität» aus der SGB als «andere Aktivität als Fuss- und Velo-Aktivität» zu interpretieren ist, und nicht als «Gesamtaktivität inklusive Fuss- und Velo-Aktivität». Um trotzdem einen gewissen Grad an Überlappung (Doppelzählung) zu berücksichtigen, wird angenommen, dass 20% der Gesamtaktivität im Fuss- und Veloverkehr entsteht. In der Sensitivitätsanalyse wird auch die volle Gesamtaktivität als unabhängig vom Fuss- und Veloverkehr betrachtet (d.h. 0% Überlappung), was zu geringeren Gesundheitsnutzen führt.
- Die Verknüpfung von SGB- und MZMV-Daten wird basierend auf Altersgruppe und Geschlecht durchgeführt. Eine Verknüpfung basierend auf Fuss-Velo-Aktivität ist auf Grund der Kombination von Fuss- und Velonutzung, sowie der rel. groben Kategorisierung (4 Kategorien) nicht sinnvoll.
- Um den Einfluss der Verteilung der Baseline Aktivität nicht zu verwässern, werden die «Baseline Aktivitätskategorien» innerhalb jeder Altersgruppe beibehalten, und bis zur Berechnung der Wirkungen disaggregiert weitergeführt.

f) Vergleichsanordnung hinsichtlich Fuss- und Velo-Aktivität gegenüber anderer Aktivität

Die nicht-Linearität der Belastungs-Wirkungs-Beziehungen ist zudem für die Vergleichsanordnung relevant. Es ist entscheidend, wie die körperliche Aktivität aus dem Fuss- oder Veloverkehr in der Vergleichsanordnung berücksichtigt wird. Hierbei ergeben sich unterschiedliche Ansätze, andere

³⁹⁰ Ainsworth; Haskell; Herrmann; u. a. (2011b)

Aktivität zu berücksichtigen. Je nach Betrachtungsweise findet die Fuss- und Velo-Aktivität auf einem anderen Aktivitätsniveau statt, was einen Einfluss auf die Schutzwirkung hat und sich somit direkt auf die Resultate auswirkt.

- A) **Fuss- und Veloaktivität zusätzlich oder nachträglich zur anderen Aktivität:** Hier besteht das Vergleichsszenario zum Status quo aus einer Situation ohne Fuss- und Veloaktivität aber mit unveränderter anderer Aktivität“. Dieser Ansatz führt zu den tiefsten Gesundheitsnutzen durch Fuss- und Velo-Aktivität.
- B) **Fuss- und Veloaktivität vor jeglicher anderen Aktivität:** Hier wird der Nutzen durch Fuss- und Veloaktivität der Baseline Aktivität vorgezogen und letztere als “zusätzlich” betrachtet. Dieser Ansatz führt zu den höchsten Gesundheitsnutzen durch Fuss- und Velo-Aktivität.
- C) **Fuss- und Veloaktivität und andere Aktivität gleichzeitig oder gleichwertig:** In der Realität finden Fuss-, Velo- und andere Aktivität nicht gestaffelt, sondern im gleichen Bereich auf der Aktivitätsskala statt. Dieser Ansatz berücksichtigt dies, in dem die Schutzwirkung zuerst für alle Aktivitäten kombiniert berechnet wird, und dann anteilmässig zugewiesen wird. Dieser Ansatz liefert Schutzwirkungen zwischen den Werten von Ansatz a und b.

Auch wenn argumentiert werden könnte, dass Fuss- und Velowege vor anderen Aktivitäten erfolgen (z.B. Arbeitsweg, Weg zum Sport), wird der Ansatz C als best-guess verwendet. Die zwei anderen Ansätze werden in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt.

Für jede Vergleichsanordnung ergeben sich aus den Aktivitätswerten für Baseline und Fuss- und Velonutzung ein Aktivitätswert für den Referenzfall (“ohne Fuss- und Velonutzung”) und einen Aktivitätswert für den Vergleichsfall (“mit Fuss- und Velonutzung”). Jedem Aktivitätswert ordnen wir dann ein entsprechendes relatives Risiko zu, gemäss den Expositions-Wirkungs-Daten. Die Differenz zwischen Referenzfall und Vergleichsfall entspricht der relativen Risikoreduktion durch die Fuss- und Velonutzung, welche im nächsten Schritt mit den Grundrisiken multipliziert wird.

g) Grundrisiken für Mortalität und Krankheitsbilder (Baseline risk)

Die aus den Belastungs-Wirkungs-Beziehungen hergeleiteten relativen Risikoreduktionen³⁹¹ werden mit den altersspezifischen Grundrisiken für die jeweiligen Krankheitsbilder (d.h. Mortalitätsrisiko, Spitaleintrittsrisiko, etc.) verrechnet, um die durch den Fuss- und Veloverkehr verhinderten Fälle zu bestimmen.

Bei der Mortalität werden dabei Sterbetafeln nach 1-Jahres-Altersklassen verwendet (Spezialauswertung BFS – vgl. Kapitel 20.6). Bei den Spitaleintritten werden die Daten des BFS in der folgenden Abbildung verwendet. Für die Inzidenzen von Diabetes und Demenz werden dieselben Daten verwendet wie bei der Luftbelastung.

³⁹¹ D.h., spezifische relative Risikoschätzer je Krankheitsbild für jede Altersgruppe unter Berücksichtigung der körperlichen Aktivität aus dem Fuss- und Veloverkehr, sowie anderen Tätigkeiten.

Abbildung 15-3: Spitaleintritte und Inzidenzen nach Altersklassen für die betrachteten Krankheitsbilder 2021

Krankheitsbild	ICD-10-Code	Hospitalisationen 0-14 Jährige	Hospitalisationen 15-39 Jährige	Hospitalisationen 40-69 Jährige	Hospitalisationen ≥70 Jährige	Hospitalisationen total
Herz-Kreislaufkrankungen	I00–I99	644	4'741	54'033	94'737	154'155
Diabetes Typ2	E11	11	139	2'178	3'034	5'362
Demenz	F00-F03, G30-31	6	18	534	4'214	4'772
Depression	F32-F33	919	9'928	13'673	3'408	27'928
Brustkrebs	C50	-	583	6'452	3'754	10'789
Kolonkrebs	C18	6	137	1'874	3'108	5'125
Krankheitsbild	ICD-10-Code	Inzidenzen 0-14 Jährige	Inzidenzen 15-39 Jährige	Inzidenzen 40-69 Jährige	Inzidenzen ≥70 Jährige	Inzidenzen total
Inzidenz Diabetes Typ2	E11	0	3'283	21'783	3'972	29'037
Inzidenz Demenz	F00-F03, G30-31	0	0	2'092	17'265	19'357

Quelle: Hospitalisationen: BFS, Medizinische Statistik der Krankenhäuser für das Jahr 2021. Inzidenzen: Abbildung 4-6.

Zu bemerken gilt es hier insbesondere, dass die berücksichtigten Fälle für Herz-Kreislaufkrankungen im Vergleich zu früheren Berechnungen deutlich höher sind. Auf Grund der neuen Berücksichtigung aller Herz-Kreislaufkrankheiten (ICD-10 I00 bis I99³⁹²), verdoppelt sich die Anzahl Spitaleintritte, bez. die Aufenthaltsdauer im Baseline Risiko. Diese Ausweitung wird auf Grund der Aktualisierung der Expositions-Wirkungs-Beziehung gemacht, da diese neu auf alle Herz-Kreislaufkrankheiten zutrifft (siehe hierzu auch Resultatvergleich 15.9).

h) Handhabung von Alter

Die Handhabung des Alters ist ein zentrales Element in der Berechnung von Gesundheitswirkungen, da das Alter eine der wichtigsten Determinanten der betrachteten Gesundheitsendpunkte darstellt. Daher wird grundsätzlich nach Altersklassen stratifiziert, soweit das mit den zur Verfügung stehenden Daten möglich ist. Theoretisch wird für die gesamte Altersbandbreite gerechnet, diese wird aber durch die verfügbaren Daten eingeschränkt. Die wichtigsten Überlegungen werden im Folgenden kurz aufgeführt:

- Verkehrsleistungen aus dem MZMV:
 - Ab 6 Jahren
 - Auswertung nach 5-Jahres-Altersklassen
 - Körperliche Aktivität aus dem Fuss- und Veloverkehr
- Körperliche Aktivität generell (Baseline Aktivität) aus SGB:
 - Ab 15 Jahren Werte der jüngsten Altersklasse werden auch auf die unter 15-jährigen angewendet.
 - 10-Jahres Altersklassen
- Belastungs-Wirkungs-Beziehungen

³⁹² ICD steht für «International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems» und die Ziffer 10 weist auf die zehnte Revision der Codes hin.

- Studien für Altersklassen unter 20 Jahren werden aus pragmatischen Gründen kaum durchgeführt, da in dieser Altersklasse die Grundhäufigkeiten der chronischen Krankheiten und Mortalität so klein sind, dass riesige Stichproben nötig wären, um Effekte zeigen zu können. Es kann aber angenommen werden, dass die Risiko-mindernden Effekte auch für Kinder gelten dürften. Trotzdem werden für diese Studie – in Absprache mit der Begleitgruppe – die Effekte für Kinder auf Null gesetzt (numerisch fällt diese Annahme nicht ins Gewicht, da das Grundrisiko für chronische Krankheiten bei Kindern gering ist).
- In den epidemiologischen Studien werden die Effektstärken zudem nicht nach Alter unterschieden. Die Effektschätzer sind relative Risiken welche auf das Grundrisiko (Baseline risk) angewendet werden, welches die Altersunterschiede reflektiert.
- Grundrisiken für Mortalität und Krankheitsbilder
 - Mortalität: 1-Jahres Altersklassen
 - Krankheitsbilder (Spitaleintritte): 0-14, 15-39, 40-69, 70+
 - Inzidenzen: vereinfachend analog Spitaldaten aufgeteilt

Auf Grund dieser Konstellation verwenden wir für die Berechnung eine untere Altersgrenze von 15 Jahren (Krankheiten) und 20 Jahren (Mortalität) und rechnen mit zwei Sets von Altersklassen, basierend auf den Daten aus dem MZMV (5-Jahres-Altersklassen) und den Spitaleintritten (4 Altersklassen). Die Ausnahme bilden die Inzidenzen von Demenz, die – wie bei der Luftbelastung – erst ab 40 Jahren berücksichtigt werden.

15.3.2 Ergebnisse zum Mengengerüst

a) Gewonnene Lebensjahre bzw. vermiedene frühzeitige Todesfälle

Durch körperliche Betätigung im Fuss und Veloverkehr im Jahr 2021 konnten insgesamt gut 216'000 Lebensjahre gewonnen werden (vgl. folgende Abbildung). Davon entfallen 76% auf den Fussverkehr (165'000 Lebensjahre), 18% auf den Veloverkehr (39'000), 5% auf Pedelecs (12'000) und 0.7% auf E-Bikes (1'400). Für die Bewertung relevant sind aber die abdiskontierten gewonnenen Lebensjahre, die ca. 12% tiefer ausfallen (insgesamt 191'000 Lebensjahre), weil künftige Lebensjahre mit einem Diskontsatz von 1.2% diskontiert werden (vgl. Kapitel 20.3).

Die meisten dieser gewonnenen Lebensjahre betreffen das Rentenalter, doch konnten durch die Bewegung im Fuss- und Veloverkehr auch insgesamt 22'600 Erwerbsjahre gewonnen werden (abdiskontiert).

Diese gewonnenen Lebens- und Erwerbsjahre sind auf insgesamt knapp 18'400 verhinderte frühzeitige Todesfälle zurückzuführen. Davon entfallen 15'300 verhinderte Todesfälle auf den Fussverkehr, gut 2'200 auf den Veloverkehr, und weitere 850 bzw. 60 auf Pedelecs und E-Bikes.

Durchschnittlich können pro verhinderten Todesfall knapp 12 Lebensjahre gewonnen werden. Da ältere Personen selten E-Bike fahren, können bei den E-Bikes gar 23 Jahre pro verhinderten Todesfall gewonnen werden, im Veloverkehr 18 Jahre. Pedelec werden hingegen oft auch von älteren

Personen gefahren, für die ein normales Velo zu anstrengend wäre, so dass 14 Jahre pro verhinderten Todesfall gewonnen werden. Noch ältere Personen können bzw. wollen sich oft nur noch zu Fuss fortbewegen (oder im ÖV und MIV, aber nicht mit einem Velo), so dass im Fussverkehr nur 11 Jahre pro verhinderten Todesfall gewonnen werden können.

Abbildung 15-4: Gewonnene Lebensjahre und vermiedene frühzeitige Todesfälle 2021

	E-Bike	Pedelec	Velo	Fuss	Total
Anzahl gewonnene Lebensjahre	1'424	11'625	38'515	164'880	216'444
- abdiskontiert	1'202	10'244	33'130	146'481	191'058
Anzahl gewonnene Erwerbsjahre	298	1'212	6'739	16'770	25'019
- abdiskontiert	269	1'103	6'069	15'139	22'579
Anzahl verhinderte frühzeitige Todesfälle	63	855	2'219	15'250	18'387
- davon von Erwebstätigen	33	149	716	1'908	2'805
Gewonnene Lebensjahre pro Todesfall	22.6	13.6	17.4	10.8	11.8

b) Verhinderte Krankheitsfälle

Bei den Krankheitsfällen können insgesamt knapp 99'000 Hospitalisationen verhindert werden. Ein Grossteil davon (79'000 Spitaleinweisungen) sind auf Herz-Kreislauf-erkrankungen zurückzuführen. Weitere knapp 13'000 Fälle auf Depressionen, bei den übrigen vier Krankheitsbildern können je weniger als 3'000 Spitaleinweisungen verhindert werden. Der Fussverkehr ist jeweils für 71% bis 78% der verhinderten Hospitalisationen verantwortlich, der Veloverkehr für 15% bis 24%, Pedelecs für 4.5% bis 6.0% und E-Bikes für die verbleibenden 0.2% bis 1.1%.

Zudem können durch den Fuss- und Veloverkehr insgesamt fast 17'000 Inzidenzen von Diabetes und knapp 10'000 Demenz-Inzidenzen verhindert werden, wobei obige Prozentzahlen zur Verteilung auf die einzelnen Kategorien auch hier gelten.

Bei der Demenz ist anzumerken, dass häufig die Spitaleinweisung aufgrund einer anderen Krankheit oder eines Unfalls erfolgt, aber der Spitalaufenthalt aufgrund der Demenz verlängert wird.³⁹³ Hier werden jedoch nur die Kosten durch Hospitalisationen mit Hauptdiagnose Demenz erfasst, was zu einer Unterschätzung der Kosten der Demenz führt.

³⁹³ Ecoplan (2010) Kapitel 4.3

Abbildung 15-5: Vermiedene Krankheitsfälle

Verkehrsmittel	Altersklasse	Hospitalisationen						Inzidenzen	
		Diabetes (II)	Herz-Kreislauf	Brustkrebs	Kolonkrebs	Demenz	Depression	Diabetes (II)	Demenz
E-Bike	15-39	1	28	1	0	0	56	19	-
	40-69	13	331	7	3	4	81	127	14
	70+	-	-	-	-	-	-	-	-
	Total	13	359	8	3	4	137	145	14
Pedelec	15-39	2	69	2	1	0	137	46	-
	40-69	57	1'480	33	14	16	358	572	64
	70+	73	2'434	17	21	126	85	96	514
	Total	132	3'983	52	36	142	580	714	579
Velo	15-39	16	563	14	4	2	1'088	388	-
	40-69	295	7'384	168	69	78	1'730	2'953	304
	70+	172	5'607	41	49	284	194	225	1'164
	Total	484	13'554	222	123	364	3'011	3'567	1'468
Fuss	15-39	59	1'803	47	14	6	3'243	1'397	-
	40-69	940	21'154	520	192	195	4'613	9'404	764
	70+	1'294	38'146	292	319	1'654	1'202	1'694	6'776
	Total	2'293	61'103	858	525	1'855	9'058	12'495	7'540
Total FVV	Total	2'923	79'000	1'141	687	2'365	12'786	16'921	9'601

15.4 Wertgerüst

15.4.1 Einleitung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten sind die oben bestimmten Auswirkungen in Geldeinheiten zu bewerten (Schritt 4 in Abbildung 15-1). Dabei sind für die Bestimmung der sozialen Nutzen in Form von eingesparten Kosten dieselben Kostenkomponenten relevant wie bei den Gesundheitskosten der Luftbelastung und des Lärms (vgl. Kapitel 4.4 und 9.4 bzw. insbesondere 20.4):

- Verminderte medizinische Behandlungskosten
- Verminderte Produktionsausfälle
- Verminderte Wiederbesetzungskosten
- Verminderte immaterielle Kosten

Methodisch kann somit analog wie bei der Bewertung der luftverschmutzungsbedingten oder lärmbedingten Gesundheitskosten vorgegangen werden.

Der Unterschied zwischen den Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs und den Gesundheitskosten der Luftverschmutzung und des Lärms ist, dass Luftbelastung und Lärm fremdverursacht sind, der Nutzen im Fuss- und Veloverkehr jedoch selbstverursacht. Dies hat Konsequenzen

bei der Ermittlung der externen Kosten bzw. Nutzen: Bei Luftbelastung und Lärm werden die Kosten von den betroffenen Personen und nicht von den Verursachenden (z.B. von den Autolenkerinnen und -lenkern) getragen. Es handelt sich daher in vollem Umfang um externe Kosten. Bei den Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs hingegen profitiert der Verursacher selbst (weil ich viel Velo fahre, erfreue ich mich einer guten Gesundheit). Somit ist der selbst getragene Teil der Gesundheitsnutzen prinzipiell vollständig privat.³⁹⁴ Für die Bestimmung der externen Gesundheitsnutzen muss untersucht werden, welcher Teil der Nutzen im Rahmen von Überwälzungen (z.B. eingesparte Leistungen von Krankenversicherungen) bzw. eingesparten Transferzahlungen (z.B. für Hinterlassenenrenten) externalisiert wird. Dies wird im folgenden Teilkapitel 15.4.2 untersucht.

15.4.2 Externe Nutzen durch den Fuss- und Veloverkehr

Die verwendeten sozialen Kostensätze für die verschiedenen Krankheitsbilder werden im Anhang A hergeleitet (siehe Kapitel 20.4). Für die Bewertung der externen Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs muss hier wie erwähnt hergeleitet werden, welche Anteile der verschiedenen Kostenbestandteile der sozialen Kosten extern sind:

- **Medizinische Heilungskosten:** Bei den medizinischen Heilungskosten treffen wir die folgenden vereinfachenden Annahmen: Bei den Arzt- und Medikamentenkosten gehen wir davon aus, dass die Patientinnen und Patienten 10% der Kosten selbst bezahlen müssen und somit 90% extern sind. Grund ist der Selbstbehalt von 10%, der Rest wird über die Krankenversicherungen externalisiert. Bei den Spitalkosten nehmen wir hingegen an, dass der Selbstbehalt, der maximal 700 CHF pro Jahr beträgt, bereits durch Arztbesuche, Medikamente etc. aufgebraucht ist und somit die Spitalkosten zu 100% von den Krankenkassen beglichen werden und damit extern sind (diese Annahme haben wir auch bisher³⁹⁵ getroffen). Für die Aufteilung der Demenzbedingten Heim- und Spitexkosten nutzen wir Daten des BFS zu Kosten und Finanzierung des Gesundheitswesens³⁹⁶ (Durchschnitt der letzten 5 verfügbaren Jahre 2016-2020), die zeigen, dass 96% der hier betrachteten Heimkosten extern sind³⁹⁷ und 79% der Spitexkosten (vgl. folgende Abbildung). Die Kosten der informellen Pflege durch Angehörige sind zu 100% extern. Damit ergibt sich ein gewichteter Durchschnitt von 96.2% externe medizinische Kosten bei der

³⁹⁴ Ergänzend hierzu stellt sich die Frage, ob sich die Velofahrer und Fussgänger der positiven Auswirkungen der körperlichen Aktivität auf ihre Gesundheit voll bewusst sind. Es wäre möglich, dass die positiven Auswirkungen unter- bzw. überschätzt werden. Dies hätte zur Folge, dass man sich zu wenig bzw. zu viel im Fuss- und Veloverkehr bewegt. Solange dieses ineffiziente Ergebnis aber nur den Entscheidungsträger selbst trifft (private Kosten), ist dies kein Grund für ein staatliches Eingreifen. Jedoch wird in Kapitel 15.4.2 erläutert, dass bei einer körperlichen Aktivität nicht nur private Nutzen anfallen, sondern – aufgrund verschiedener Überwälzungsmechanismen – ein Teil der Nutzen auch extern ist. In einer solchen Situation wäre grundsätzlich ein staatliches Eingreifen angezeigt, um dafür sorgen zu können, dass zu Fuss Gehende oder Velofahrende nicht nur die privaten, sondern auch die externen Nutzen mitberücksichtigen, wenn sie vor der Entscheidung stehen, zu Fuss zu gehen oder mit dem Velo zu fahren oder ein anderes Verkehrsmittel zu verwenden.

³⁹⁵ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

³⁹⁶ BFS Bundesamt für Statistik (2022a)

³⁹⁷ Bei den Heimkosten werden nur die Kosten für die Pflichtleistungen nach dem Bundesgesetz über die Krankenversicherung (KVG) angerechnet (siehe Kapitel 20.5.2b). Der Anteil der privaten Kosten wird daher in Bezug auf die von den Patienten selber getragenen Kosten in der obligatorischen Krankenpflegeversicherung (OKP) (Franchise und Selbstbehalt) berechnet.

Demenz (ohne Spitalkosten). Eine Zusammenstellung der Anteile der externen an den sozialen Kosten wird in folgender Abbildung gegeben.

Abbildung 15-6: Berechnung des Anteils der externen Kosten an den sozialen Kosten für die medizinischen Kosten der Demenz

	CHF pro Fall und Jahr (2021)	Anteil extern
Spitalkosten	1'789	100.0%
Heimkosten	17'486	96.2%
Spitexkosten	2'737	78.9%
Arztkosten	228	90.0%
Medikamentenkosten	102	90.0%
Kosten der interdisziplinären Diagnostik (memory clinics)	173	90.0%
Informelle Pflege und Betreuung	12'756	100.0%
Total	35'272	96.4%
Total ohne Spital	33'483	96.2%

- **Produktionsausfall:** Beim Produktionsausfall sind die privaten Bestandteile abzuziehen, wenn die externen Nutzen bestimmt werden sollen, d.h. der Eigenkonsum ist herauszurechnen und statt dem Brutto- nur der Nettoproduktionsausfall zu berücksichtigen, wobei der **Nettoproduktionsausfall** nur **26%** des Bruttoproduktionsausfalls ausmacht (vgl. Abbildung 15-7).

Es gibt jedoch bei den Produktionsausfällen noch weitere externe Anteile zu beachten: Die Teilnahme am Fuss- und Veloverkehr führt zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit eines (vorzeitigen) Todesfalls und damit zu **weniger Waisen-, Witwen- oder Witwerrenten an die Hinterlassenen** durch die AHV. Zudem erhalten **weniger** Demenzpatienten **Invalidenrenten** von der IV. Die Transferleistungen der Sozialversicherungen werden durch die Allgemeinheit finanziert und sind damit extern. Damit wird auch ein Teil des Eigenkonsums an die Allgemeinheit übertragen. In Analogie zu den Unfallkosten beschränken sich diese externen Nutzen somit auf die durch bessere Gesundheit verhinderten Transferleistungen der AHV und IV an Fussgängerinnen und Velofahrer bzw. deren Hinterlassenen.³⁹⁸ Dabei wird nur auf verhinderte frühzeitige Todesfälle (Gesamtmortalität) und verhinderte Demenzerkrankungen abgestellt. Bei den übrigen Krankheitsbildern entstehen kaum Transfers der Sozialversicherungen an die Hinterbliebenen oder an Invalide. Die vermiedenen Leistungen der Sozialversicherungen werden wie folgt ermittelt:

- **Todesfälle**

Bei einem Todesfall einer erwachsenen Person (18-65 Jahre)³⁹⁹ erhalten die Angehörigen der

³⁹⁸ Die bei den Unfallkosten relevante Differenzierung zwischen Unfallverursacher und Nicht-Unfallverursacher ist bei der Ermittlung der Gesundheitsnutzen durch den Fuss- und Veloverkehr nicht erforderlich, da es hier nur „Verursacher“ gibt bzw. da jene, die den Fuss- und Veloverkehr nutzen, unmittelbar selbst davon profitieren.

³⁹⁹ Bei Kindern sind keine Hinterlassenenrenten zu berücksichtigen (sie sind weder verheiratet noch haben sie schon Kinder). Senioren erhalten eine Altersrente, keine Hinterlassenenrente und ihre Kinder sind (meist) schon aus dem unterstützungspflichtigen Alter herausgewachsen.

verstorbenen Person eine Hinterlassenenrente (Witwen-, Witwer- oder Waisenrente). Mit der erhöhten körperlichen Aktivität (aus der Teilnahme am Fuss- und Veloverkehr) verschiebt sich durch die erhöhte Lebenserwartung der Zeitpunkt des Todesfalls. Entsprechend später fallen die Hinterlassenenrenten an, wodurch die Sozialversicherungen entlastet werden. Dies ist somit ein externer Nutzen des Fuss- und Veloverkehrs. Die Berechnung erfolgt nach folgendem Schema:

- Aus den Berechnungen zu den gewonnen Lebensjahren geht hervor, dass pro verhinderter Todesfall eines Erwachsenen (18-65 Jahre) durchschnittlich 26 Lebensjahre (Männer) bzw. 30 Lebensjahre (Frauen) gewonnen werden.
- Umgelegt auf die statistische Lebenserwartung entspricht dies bei beiden Geschlechtern einem Alter von etwas über 56 Jahren. Anschliessend wird eine durchschnittliche Hinterlassenenrente für die Angehörigen einer Person dieses Alters ermittelt. Hinzu kommen allfällige Ergänzungsleistungen.

Dies ergibt pro vermiedenen Todesfall eines Erwachsenen eine Ersparnis von rund 248'000 CHF. Da die bezahlte Rente je nach Alter des Todesopfers deutlich schwankt und da das Alter nur abgeschätzt werden kann, untersuchen wir im Rahmen der Sensitivität, wie sich das Ergebnis verändert, wenn die Rentenleistungen um 30% höher oder tiefer ausfallen.

- **Demenz**

Bei Spitaleintritten aufgrund von Demenz werden die Betroffenen zu 100% arbeitsunfähig bzw. invalid. Es wird angenommen, dass sie nicht wieder eingegliedert werden können.⁴⁰⁰ Sie beziehen daher ab dem Alter der Erkrankung bis zur Erreichung des AHV-Alters eine volle Invalidenrente inklusive allfälliger Ergänzungsleistungen.

Das durchschnittliche Alter der Erkrankten (60 Jahre und 80 Jahre – wie bei der Bestimmung des Produktionsausfalls, vgl. Kapitel 20.5.3) wird verwendet, um die abdiskontierte Summe der IV-Rente bis zur Erreichung des AHV-Alters zu berechnen (für 80-Jährige Null).

Gewichtet mit der Zahl aller Demenzfälle nach Alter ergibt sich pro vermiedenen Fall eine durchschnittliche Ersparnis von 10'500 CHF.⁴⁰¹

- Die **Wiederbesetzungskosten** fallen nicht bei der Velofahrerin oder beim Fussgänger selbst an, sondern beim Arbeitgeber. Diese Nutzen sind somit vollständig extern.
- Im Gegensatz dazu sind die **immateriellen Kosten** durch Schmerz und Leid vollständig privat.

⁴⁰⁰ Bei Demenzerkrankungen ohne Spitaleintritt berücksichtigen wir hingegen keine Produktionsausfälle.

⁴⁰¹ Wiederum hängt die Rentenleistung stark vom Alter ab, das nicht genau bestimmt werden kann. Deshalb wurde in den bisherigen Berechnungen für 2015 (INFRAS; Ecoplan (2019)) im Rahmen einer Sensitivität die Höhe der IV-Rente um $\pm 30\%$ variiert. Es zeigt sich jedoch, dass die externen Nutzen dadurch nur um $\pm 0.4\%$ schwanken, weshalb auf die Sensitivität nun verzichtet wird.

Abbildung 15-7: Zusammenfassung der Anteile der externen an den sozialen Kosten

Krankheitsbild	Spitalkosten pro Hospitalisation	Sonst. med. Kosten pro Inzidenz	Produktionsausfall pro Hospitalisation	Produktionsausfall sonst pro Inzidenz	Wiederbesetzungskosten (Mann / Frau)	Immaterielle Kosten pro Hospitalisation	Immaterielle Kosten sonst pro Inzidenz
Pro Todesfall / pro gewonnenes Lebensjahr	-	-	-	n.a.	-	-	0%
Pro gewonnenes Erwerbsjahr / pro Todesfall	-	-	-	26%	100%	-	-
Herz-/Kreislauferkrankungen	100%	-	26%	-	-	0%	-
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	100%	90%	26%	26%	-	0%	0%
Demenz	100%	96.2%	43.3%	-	100%	-	0%
Depression	100%	-	26%	-	-	0%	-
Brustkrebs	100%	-	26%	-	-	0%	-
Kolonkrebs	100%	-	26%	-	-	0%	-

15.4.3 Zusammenfassung der verwendeten Kostensätze zur Bewertung der Nutzen

Die verwendeten **sozialen Kostensätze** für die gewonnen Lebensjahre und die verschiedenen vermiedenen Krankheitsfälle werden im Anhang A in Kapitel 20.4 hergeleitet und in der folgenden Abbildung zusammenfassend dargestellt. Auffallend sind die hohen Kostensätze aufgrund von verlorenen Lebensjahren (249'000 CHF) und Erwerbsjahren (105'000 CHF), die hohen medizinischen Kosten der Demenz (169'000 CHF durch Pflege in Heimen und durch Angehörige) sowie die hohen immateriellen Kosten durch Demenz (80'000 CHF) und Diabetes (35'000 CHF).

Abbildung 15-8: Übersicht über die verwendeten Ansätze zur Bewertung der sozialen Nutzen (in CHF)

Krankheitsbild	ICD-10-Code	Spitalkosten pro Hospitalisation	Sonst. med. Kosten pro Inzidenz	Produktionsausfall pro Hospitalisation	Produktionsausfall sonst pro Inzidenz	Wiederbesetzungskosten (Mann / Frau) pro Hospitalisation	Immaterielle Kosten pro Hospitalisation	Immaterielle Kosten sonst pro Inzidenz
Pro verlorenes Lebensjahr	-	-	-	-	-	-	-	249'018
Pro verlorenes Erwerbsjahr bzw. pro Todesfall	-	-	-	-	104'874	40451 / 34391	-	-
Herz-/Kreislauferkrankungen	I00 - I99	20'047	n.a.	5'646	n.a.	-	7'185	n.a.
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	E11	18'751	18'194	1'768	8'180	-	9'189	35'318
Demenz	F00 - F03 und G30 - G31	23'664	168'800	60'945	n.a.	4'837	-	79'831
Depression	F32 - F33	26'312	n.a.	7'311	n.a.	n.a.	28'314	n.a.
Brustkrebs	C50	14'803	n.a.	3'667	n.a.	-	4'392	n.a.
Kolonkrebs	C18	25'649	n.a.	7'180	n.a.	-	9'644	n.a.

n.a. = not available (nicht verfügbar)

- = nicht relevant bzw. keine Kosten

Zudem wurde oben hergeleitet, welche Anteile dieser sozialen Kosten extern sind. Daraus ergeben sich die in der folgenden Abbildung dargestellten externen Kostensätze. Pro Todesfall entstehen Produktionsausfälle von 248'000 CHF. Die externen Spitalkosten sind gleich hoch wie die sozialen und je nach Krankheitsbild in der Grössenordnung von 20'000 CHF. Auch die sonstigen medizinischen Kosten sind mehrheitlich extern, so dass insbesondere bei der Demenz weiterhin ein hoher Kostensatz von 162'000 CHF zum Einsatz kommt. Die externen Nettoproduktionsausfälle sind deutlich geringer als sie sozialen Bruttoproduktionsausfälle, betragen pro Hospitalisation aufgrund von Demenz aber immer noch gut 26'000 CHF. Die externen Wiederbesetzungskosten sind identisch zu den sozialen. Schliesslich gibt es keine externen immateriellen Kosten.

Abbildung 15-9: Übersicht über die verwendeten Ansätze zur Bewertung der externen Nutzen (in CHF)

Krankheitsbild	Spitalkosten pro Hospi- talisierung	Sonst. med. Kosten pro Inzidenz	Produktions- ausfall pro Hospitalisation	Produktions- ausfall sonst pro Inzidenz	Wiederbeset- zungskosten (Mann / Frau)	Immaterielle Kosten pro Hospitalisation	Immaterielle Kosten sonst pro Inzidenz
Pro Todesfall	-	-	-	248'142	-	-	-
Pro gewonnenes Erwerbsjahr / pro Todesfall	-	-	-	27'224	40451 / 34391	-	-
Herz-/Kreislauferkrankungen	20'047	n.a.	1'466	n.a.	-	-	-
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	18'751	16'374	459	2'123	-	-	-
Demenz	23'664	162'312	26'359	n.a.	4'837	-	-
Depression	26'312	n.a.	1'898	n.a.	n.a.	-	-
Brustkrebs	14'803	n.a.	952	n.a.	-	-	-
Kolonkrebs	25'649	n.a.	1'864	n.a.	-	-	-

15.4.4 Internalisierungsbeiträge

Im vorliegenden Kostenbereich sind keine spezifischen Internalisierungsbeiträge zu beachten.

15.5 Vorgehen bei Differenzierungen

15.5.1 Differenzierung nach Antriebsart

Wie in Kapitel 20.1.2 erläutert, werden die Verkehrsleistungen des Fuss-, Velo-, Pedelec- und E-Bike-Verkehrs im MZMV separat erfasst. Zudem wird die Intensität der körperlichen Aktivität dieser vier Verkehrsmittel unterschieden und somit differenziert berücksichtigt. Mit diesen beiden wichtigen Inputs werden die Gesundheitsnutzen nach den vier Verkehrsmitteln differenziert, wobei jedes Verkehrsmittel seine eigene Antriebsart hat (Fuss und Velo mit Muskelkraft sowie Pedelec und E-Bike mit Elektroantrieb (unterstützt mit Muskelkraft)).

15.5.2 Differenzierung nach Kantonen

Die Differenzierung nach den Kantonen erfolgt über das nationale Personenverkehrsmodell (NPVM): Mit den gemeindefeinen Daten aus dem NPVM werden die Verkehrsleistungen nach Kantonen aufgeteilt (vgl. Kapitel 20.1.5). Diese Aufteilung erfolgt getrennt für den Fuss-, Velo- und Elektroveloverkehr, wobei für Pedelecs und E-Bikes dieselbe Verteilung verwendet wird (da keine differenzierten Daten verfügbar sind).

15.6 Überlegungen zu den Grenzkosten

Aufgrund der nicht linearen Belastungs-Wirkungs-Beziehungen sind die kurzfristigen Grenznutzen kleiner als die Durchschnittsnutzen (unter ceteris paribus-Bedingungen). Die Grenznutzen hängen insbesondere von der Baseline Aktivität und dem Alter der Fuss- und Veloverkehrsteilnehmenden ab. Würde die Zunahme im Fuss- und Veloverkehr – z.B. im Rahmen einer verstärkten Förderung des Fuss- und Veloverkehrs (die aber hier nicht berechnet wird) – in Zukunft beispielsweise vermehrt durch inaktive, ältere oder auch jene, die den Fuss- und Veloverkehr bisher wenig nutzen,

bedingt sein, wären die langfristigen Grenznutzen höher als die gegenwärtigen Durchschnittsnutzen. Wäre die Zunahme durch jüngere, besonders aktive, oder besonders häufige Fuss- und Veloverkehrsnutzende bedingt, wären die langfristigen Grenznutzen tiefer.

Auch die Altersstruktur der zusätzlichen NutzerInnen ist von Bedeutung, da ältere Menschen mehr von den Gesundheitsnutzen profitieren können, da bei ihnen das Risiko einer Erkrankung höher ist. Elektrovelos, die mit weniger körperlicher Anstrengung verbunden sind, können z.B. ältere Menschen zum Velofahren bringen.

15.7 Ergebnisse

15.7.1 Externe Nutzen

a) Überblick Gesamtverkehr

Die externen Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr betragen insgesamt 5.6 Mrd. CHF, wie aus der folgenden Abbildung ersichtlich ist.

Abbildung 15-10: Überblick über die externen Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr 2021

	in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr		5'617.2	-	5'617.2	100.0%
Schienenverkehr		-	-	-	0.0%
Luftverkehr		-	-	-	0.0%
Schiffsverkehr		-	-	-	0.0%
Total		5'617.2	-	5'617.2	100.0%
in % des Totals		100.0%	0.0%	100.0%	

b) Strassenverkehr

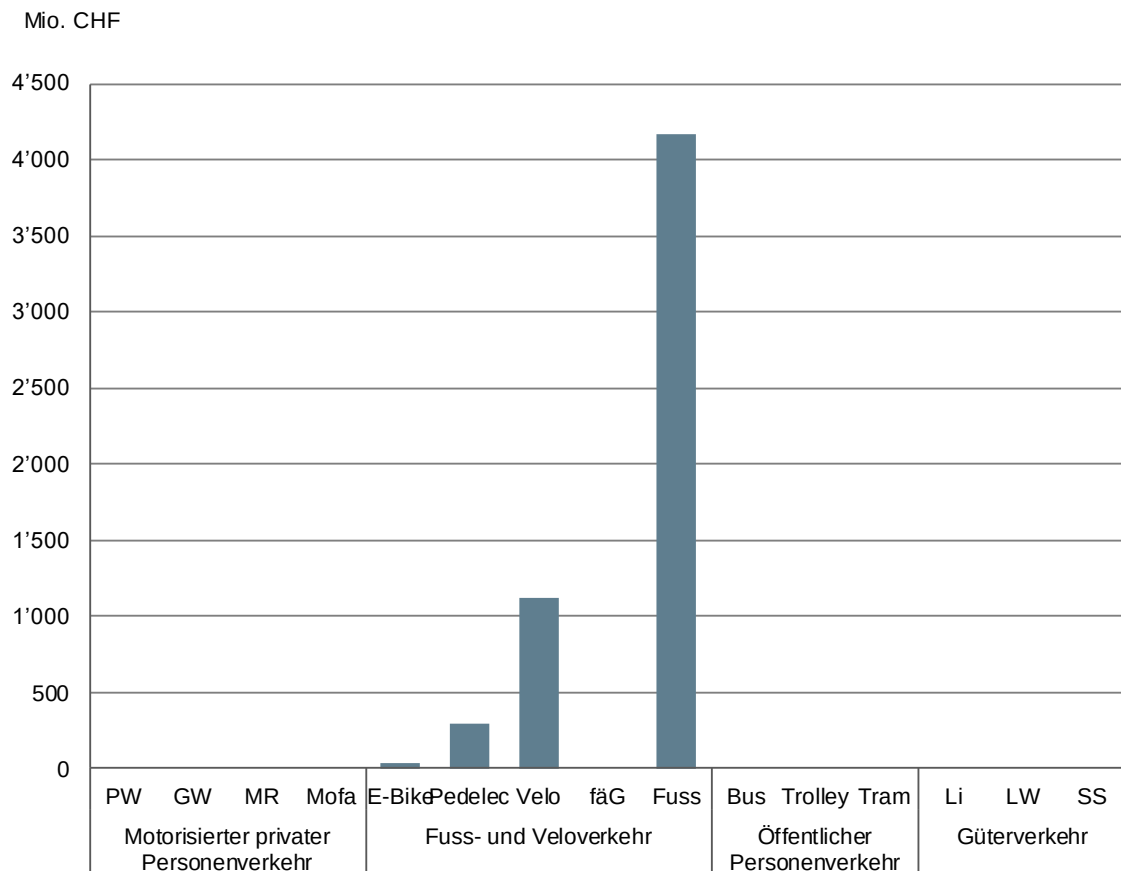
Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Ergebnisse etwas detaillierter, insbesondere wird ersichtlich, dass der Fussverkehr mit 4.2 Mrd. CHF knapp drei Viertel des gesamten Gesundheitsnutzens ausmacht. Der Veloverkehr trägt 1.1 Mrd. CHF (oder 20%) zum Gesundheitsnutzen bei. Gut 5% bzw. 0.6% (293 bzw. 36 Mio. CHF) sind auf Pedelects bzw. E-Bikes zurückzuführen.

Abbildung 15-11: Externe Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr 2021 nach Krankheitsbildern und Fahrzeugkategorien

	Personenverkehr												Güterverkehr			Gesamt- total
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr				Li	LW	SS	
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram				
Gewonnene Lebensjahre	-	-	-	-	18.2	71.2	393.4	-	962.6	-	-	-	-	-	-	1'445.4
Herz-/Kreislauferkrankungen	-	-	-	-	8.5	85.8	301.7	-	1'313.5	-	-	-	-	-	-	1'709.5
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	-	-	-	-	3.0	15.7	76.0	-	274.7	-	-	-	-	-	-	369.5
Demenz	-	-	-	-	2.6	102.1	259.1	-	1'330.1	-	-	-	-	-	-	1'693.9
Depression	-	-	-	-	3.9	16.4	85.6	-	255.9	-	-	-	-	-	-	361.8
Brustkrebs	-	-	-	-	0.1	0.8	3.6	-	13.6	-	-	-	-	-	-	18.1
Kolonkrebs	-	-	-	-	0.1	1.0	3.5	-	14.4	-	-	-	-	-	-	19.0
Total	-	-	-	-	36.4	293.0	1'122.9	-	4'164.9	-	-	-	-	-	-	5'617.2
in % des Gesamttotals	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	5.2%	20.0%	0.0%	74.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
Total Teilbereiche	0.0				5'617.2				0.0			0.0			5'617.2	
in % des Gesamttotals	0.0%				100.0%				0.0%			0.0%			100.0%	

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrgähähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

«0.0» bedeutet, dass das Ergebnis grösser 0, aber kleiner als 0.05 ist. «-» bedeutet, dass der Wert tatsächlich Null ist oder z.B. aufgrund fehlender Datengrundlagen nicht berechnet werden kann. Diese Bemerkung gilt auch für alle folgenden Abbildungen.

Abbildung 15-12: Externe Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr 2021 nach Fahrzeugkategorien

Externe Gesundheitsnutzen nach Krankheitsbildern und Kostenbereichen

Die nachstehende Abbildung zeigt die Detailergebnisse für den gesamten Fuss- und Veloverkehr. Drei Krankheitsbilder dominieren die Nutzen: Vermiedene Herz-/Kreislauferkrankungen tragen mit gut 1.7 Mrd. CHF bzw. 30% am meisten zu den Nutzen bei, davon 1.6 Mrd. CHF vermiedene Spitalkosten. Dicht gefolgt von vermiedenen Demenzzfällen, die Nutzen von knapp 1.7 Mrd. CHF (30%) verursachen. Dies ist vor allem auf die sonstigen medizinischen Kosten der Demenz von 1.6 Mrd. CHF zurückzuführen, insbesondere auf die Heim- und Spitexkosten sowie die Kosten der informellen Pflege. Weitere 26% (gut 1.4 Mrd. CHF) sind auf die gewonnenen Lebensjahre zurückzuführen. Die zwei Krankheitsbilder Diabetes und Depression machen je ca. 6.5% des Totals aus. Die Ersparnisse in den zwei verbleibenden Krankheitsbildern Brust- und Kolonkrebs sind im Vergleich beinahe unbedeutend und betragen je nur knapp 20 Mio. CHF (oder je 0.3% des Totals).

Bei den Kostenbestandteilen sind 37% des Nutzens auf vermiedene Spitalkosten zurückzuführen – vor allem aufgrund von Herz-/Kreislauferkrankungen und Depressionen. Weitere 33% werden durch die sonstigen medizinischen Kosten durch Inzidenzen verursacht – vor allem aufgrund der Demenz. Zudem sind 28% der Nutzen auf ausbleibende Produktionsausfälle zurückzuführen. Dabei spielen insbesondere die verhinderten frühzeitigen Todesfälle eine wichtige Rolle. Produktionsausfälle aufgrund von Hospitalisationen entsprechen hingegen nur 4% des Nutzens. Wiederbesetzungskosten sind lediglich für 2% des Nutzens verantwortlich. Keinen Beitrag leisten die immateriellen Kosten, die alle intern sind.

Abbildung 15-13: Externe Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr 2021 nach Krankheitsbild und Kostenbereich

in Mio. CHF	Spitalkosten	Sonst. med. Kosten durch Inzidenzen	Produktionsausfall durch Hospitalisationen	Produktionsausfall durch Inzidenzen	Wiederbesetzungskosten	Immaterielle Kosten durch Hospitalisationen	Immaterielle Kosten durch Inzidenzen	Total	Anteil am Total
Gewonnene Lebensjahre	-	-	-	1'337.3	108.2	-	-	1'445.4	25.7%
Herz-/Kreislauferkrankungen	1'583.7	-	125.8	-	-	-	-	1'709.5	30.4%
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	54.8	277.1	1.5	36.1	-	-	-	369.5	6.6%
Demenz	56.0	1'558.3	68.1	-	11.4	-	-	1'693.9	30.2%
Depression	336.4	-	25.4	-	-	-	-	361.8	6.4%
Brustkrebs	16.9	-	1.3	-	-	-	-	18.1	0.3%
Kolonkrebs	17.6	-	1.4	-	-	-	-	19.0	0.3%
Total	2'065.4	1'835.4	223.4	1'373.4	119.6	-	-	5'617.2	100.0%
Anteil am Gesamttotal	36.8%	32.7%	4.0%	24.4%	2.1%	0.0%	0.0%	100.0%	

Externe Gesundheitsnutzen nach Kantonen

Die externen Gesundheitsnutzen variieren stark zwischen den Kantonen. Die Unterschiede lassen sich hauptsächlich durch die Grösse der Bevölkerung erklären. Am wesentlichsten trägt folglich auch der Kanton Zürich mit 1.1 Mrd. CHF zum Nutzen bei, was 19.1% entspricht. Der – gemessen an der Bevölkerung – zweitgrösste Kanton Bern trägt mit 627 Mio. CHF zu 11.2% des Nutzens bei.

Die Auswertung nach Antriebsart zeigt definitionsgemäss, dass nur Muskelkraft (Fuss- und Veloverkehr) und elektrischer Antrieb (E-Bike und Pedelec) relevant sind. Der elektrische Antrieb entspricht nur 6% des totalen Nutzens.

Abbildung 15-14: Externe Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr 2021 nach Kantonen

in Mio. CHF	Motorisierter privater Personenverkehr				Personenverkehr					Öffentlicher Personenverkehr		Güterverkehr			Gesamt-total
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
Zürich	-	-	-	-	7.9	63.8	216.3	-	782.2	-	-	-	-	-	1'070.2
Bern	-	-	-	-	4.2	34.0	133.5	-	455.7	-	-	-	-	-	627.4
Luzern	-	-	-	-	1.5	12.2	44.9	-	166.2	-	-	-	-	-	224.9
Uri	-	-	-	-	0.1	0.8	3.9	-	13.4	-	-	-	-	-	18.2
Schwyz	-	-	-	-	0.4	3.3	15.1	-	65.6	-	-	-	-	-	84.4
Obwalden	-	-	-	-	0.1	0.6	3.3	-	13.9	-	-	-	-	-	17.9
Nidwalden	-	-	-	-	0.1	1.0	4.0	-	17.7	-	-	-	-	-	22.8
Glarus	-	-	-	-	0.1	0.9	4.6	-	19.6	-	-	-	-	-	25.2
Zug	-	-	-	-	0.5	4.4	16.6	-	76.3	-	-	-	-	-	97.8
Freiburg	-	-	-	-	1.2	9.5	36.9	-	119.9	-	-	-	-	-	167.5
Solothurn	-	-	-	-	1.0	8.4	35.5	-	121.8	-	-	-	-	-	166.7
Basel-Stadt	-	-	-	-	1.0	8.3	34.6	-	133.5	-	-	-	-	-	177.5
Basel-Landschaft	-	-	-	-	1.3	10.2	40.8	-	141.3	-	-	-	-	-	193.5
Schaffhausen	-	-	-	-	0.3	2.1	9.5	-	41.5	-	-	-	-	-	53.4
Appenzell A.Rh.	-	-	-	-	0.2	1.7	5.9	-	15.6	-	-	-	-	-	23.4
Appenzell I.Rh.	-	-	-	-	0.0	0.4	1.8	-	4.7	-	-	-	-	-	6.9
St. Gallen	-	-	-	-	1.9	15.5	65.4	-	231.9	-	-	-	-	-	314.7
Graubünden	-	-	-	-	0.5	4.2	21.0	-	80.4	-	-	-	-	-	106.2
Aargau	-	-	-	-	2.5	19.7	76.7	-	284.0	-	-	-	-	-	383.0
Thurgau	-	-	-	-	0.9	7.0	31.0	-	107.1	-	-	-	-	-	146.0
Tessin	-	-	-	-	1.4	11.5	44.6	-	191.8	-	-	-	-	-	249.3
Waadt	-	-	-	-	3.8	30.2	109.3	-	420.9	-	-	-	-	-	564.2
Wallis	-	-	-	-	1.1	8.5	36.5	-	153.2	-	-	-	-	-	199.3
Neuenburg	-	-	-	-	0.6	5.1	21.8	-	107.7	-	-	-	-	-	135.2
Genf	-	-	-	-	3.5	27.9	101.3	-	368.0	-	-	-	-	-	500.7
Jura	-	-	-	-	0.2	1.7	8.2	-	30.9	-	-	-	-	-	41.0
Total	-	-	-	-	36.4	293.0	1'122.9	-	4'164.9	-	-	-	-	-	5'617.2

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

15.7.2 Soziale Nutzen

a) Strassenverkehr

Wie in der folgenden Abbildung ersichtlich ist, betragen die sozialen Gesundheitsnutzen knapp 57 Mrd. CHF. Wie beim externen Nutzen, fallen soziale Nutzen ausschliesslich beim Fuss- und Veloverkehr an. Die Verteilung der sozialen Gesundheitsnutzen ist sehr ähnlich wie bei den externen

Nutzen (vgl. Abbildung 15-13). Der Fussverkehr macht auch hier ca. drei Viertel des totalen Nutzens aus. Dies entspricht bei den sozialen Nutzen 43.2 Mrd. CHF.⁴⁰² Der Veloverkehr trägt 10.1 Mrd. CHF (18%) bei. Pedelecs und E-Bike tragen 3.0 bzw. 0.4 Mrd. CHF, was zusammen 6% des Nutzens ausmacht.

Abbildung 15-15: Soziale Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr 2021 nach Krankheitsbild

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total		
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr							
	in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram		Li	LW
Gewonnene Lebensjahre	-	-	-	-	328.9	2'672.4	8'914.5	-	38'137.2	-	-	-	-	-	-	50'053.0
Herz-/Kreislauferkrankungen	-	-	-	-	14.6	131.5	484.6	-	2'005.0	-	-	-	-	-	-	2'635.8
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	-	-	-	-	5.1	25.7	127.1	-	449.8	-	-	-	-	-	-	607.7
Demenz	-	-	-	-	4.0	157.4	399.6	-	2'051.0	-	-	-	-	-	-	2'612.0
Depression	-	-	-	-	8.6	36.0	189.1	-	562.5	-	-	-	-	-	-	796.2
Brustkrebs	-	-	-	-	0.2	1.2	5.4	-	19.9	-	-	-	-	-	-	26.7
Kolonkrebs	-	-	-	-	0.2	1.5	5.6	-	22.3	-	-	-	-	-	-	29.6
Total	-	-	-	-	361.6	3'025.8	10'126.0	-	43'247.8	-	-	-	-	-	-	56'761.1
in % des Gesamttotal	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	5.3%	17.8%	0.0%	76.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	100.0%
Total Teilbereiche	0.0				56'761.1				0.0			0.0			56'761.1	
in % des Gesamttotal	0.0%				100.0%				0.0%			0.0%			100.0%	

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Soziale Gesundheitsnutzen nach Krankheitsbildern und Kostenbereichen

Unterschiede zu den externen Nutzen gibt es hingegen bei der Differenzierung nach Kostenbereichen (vgl. folgende Abbildung und Abbildung 15-13). Vor allem die immateriellen Kosten fallen bei der Betrachtung der sozialen Gesundheitsnutzen stark ins Gewicht (insgesamt 87% - extern 0%). Daneben sind vor allem die medizinischen Kosten mit 7% (oder 4 Mrd. CHF) relevant – je etwa hälftig sind diese auf Spitalkosten bzw. sonstige medizinische Kosten zurückzuführen. Zudem entstehen Produktionsausfälle von insgesamt 3.3 Mrd. CHF (5.7%) und Wiederbesetzungskosten von 0.1 Mrd. CHF (0.2%).

Die Berücksichtigung der immateriellen Kosten hat auch zur Folge, dass sich die Bedeutung der Krankheitsbilder gegenüber den externen Kosten deutlich verändert: Bei den sozialen Kosten sind die gewonnen Lebensjahre mit 88% der Nutzen entscheidend (gut 50 Mrd. CHF – bei den externen Kosten nur 26%). Vermiedene Herz-/Kreislauferkrankungen und Demenzfälle tragen je 4.6% (2.6 Mrd. CHF) zum sozialen Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr bei. Auf Depressionen und Diabetes entfallen noch 1.4% bzw. 1.1% (0.8 bzw. 0.6 Mrd. CHF) und schliesslich noch je knapp 30 Mio. CHF auf Brust- und Kolonkrebs (je 0.05%).

⁴⁰² Auf eine Abbildung der Anteile analog Abbildung 15-12 wird verzichtet. Die Verteilung sieht, abgesehen von der Skala, sehr ähnlich aus wie in Abbildung 15-12.

Abbildung 15-16: Soziale Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr 2021 nach Krankheitsbild und Kostenbereich

in Mio. CHF	Spitalkosten	Sonst. med. Kosten durch Inzidenzen	Produktionsausfall durch Hospitalisationen	Produktionsausfall durch Inzidenzen	Wiederbesetzungskosten	Immaterielle Kosten durch Hospitalisationen	Immaterielle Kosten durch Inzidenzen	Total	Anteil am Total
Gewonnene Lebensjahre	-	-	-	2'368.0	108.2	-	47'576.9	50'053.0	88.2%
Herz-/Kreislauferkrankungen	1'583.7	-	484.4	-	-	567.7	-	2'635.8	4.6%
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	54.8	307.9	5.6	139.1	-	26.9	73.4	607.7	1.1%
Demenz	56.0	1'620.6	157.5	-	11.4	-	766.4	2'612.0	4.6%
Depression	336.4	-	97.8	-	-	362.0	-	796.2	1.4%
Brustkrebs	16.9	-	4.8	-	-	5.0	-	26.7	0.0%
Kolonkrebs	17.6	-	5.4	-	-	6.6	-	29.6	0.1%
Total	2'065.4	1'928.5	755.6	2'507.1	119.6	968.2	48'416.8	56'761.1	100.0%
Anteil am Gesamttotal	3.6%	3.4%	1.3%	4.4%	0.2%	1.7%	85.3%	100.0%	

Soziale Gesundheitsnutzen nach Kantonen

Das Total der sozialen Kosten wird anteilmässig sehr ähnlich auf die Kantone verteilt wie die externen Kosten. Die nachfolgende Abbildung stellt die Ergebnisse dar.

Abbildung 15-17: Soziale Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr 2021 nach Kantonen

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total	
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr						
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
Zürich	-	-	-	-	78.7	658.6	1'950.1	-	8'122.5	-	-	-	-	-	10'809.8
Bern	-	-	-	-	41.9	351.0	1'204.0	-	4'731.6	-	-	-	-	-	6'328.5
Luzern	-	-	-	-	15.1	126.0	405.0	-	1'726.1	-	-	-	-	-	2'272.1
Uri	-	-	-	-	1.0	8.4	35.3	-	138.9	-	-	-	-	-	183.7
Schwyz	-	-	-	-	4.1	34.5	135.8	-	681.0	-	-	-	-	-	855.5
Obwalden	-	-	-	-	0.7	6.3	29.7	-	144.8	-	-	-	-	-	181.5
Nidwalden	-	-	-	-	1.2	10.0	36.1	-	183.6	-	-	-	-	-	230.8
Glarus	-	-	-	-	1.1	9.0	41.8	-	203.6	-	-	-	-	-	255.5
Zug	-	-	-	-	5.4	45.4	149.3	-	792.4	-	-	-	-	-	992.6
Freiburg	-	-	-	-	11.7	98.3	332.6	-	1'245.3	-	-	-	-	-	1'687.9
Solothurn	-	-	-	-	10.4	87.1	320.0	-	1'264.4	-	-	-	-	-	1'682.0
Basel-Stadt	-	-	-	-	10.3	85.9	312.3	-	1'386.7	-	-	-	-	-	1'795.1
Basel-Landschaft	-	-	-	-	12.6	105.1	367.7	-	1'466.8	-	-	-	-	-	1'952.2
Schaffhausen	-	-	-	-	2.6	22.1	85.7	-	430.5	-	-	-	-	-	540.9
Appenzell A.Rh.	-	-	-	-	2.0	17.0	53.4	-	161.8	-	-	-	-	-	234.2
Appenzell I.Rh.	-	-	-	-	0.5	3.9	16.0	-	48.9	-	-	-	-	-	69.3
St. Gallen	-	-	-	-	19.1	160.1	589.4	-	2'408.1	-	-	-	-	-	3'176.7
Graubünden	-	-	-	-	5.2	43.7	189.0	-	835.3	-	-	-	-	-	1'073.2
Aargau	-	-	-	-	24.3	203.7	692.1	-	2'949.4	-	-	-	-	-	3'869.6
Thurgau	-	-	-	-	8.7	72.7	279.5	-	1'112.4	-	-	-	-	-	1'473.2
Tessin	-	-	-	-	14.2	119.0	402.3	-	1'991.2	-	-	-	-	-	2'526.8
Waadt	-	-	-	-	37.3	311.9	985.7	-	4'370.9	-	-	-	-	-	5'705.8
Wallis	-	-	-	-	10.5	87.6	329.0	-	1'591.2	-	-	-	-	-	2'018.3
Neuenburg	-	-	-	-	6.3	52.7	196.2	-	1'118.8	-	-	-	-	-	1'374.0
Genf	-	-	-	-	34.5	288.5	913.7	-	3'821.0	-	-	-	-	-	5'057.7
Jura	-	-	-	-	2.1	17.3	74.1	-	320.8	-	-	-	-	-	414.3
Total	-	-	-	-	361.6	3'025.8	10'126.0	-	43'247.8	-	-	-	-	-	56'761.1

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

15.8 Sensitivitätsanalyse

15.8.1 Zusammenfassung der Annahmen und Unsicherheiten

Die oben dargestellten Ergebnisse sind mit Unsicherheiten verbunden. Die folgende Sensitivitätsanalyse zeigt auf, welche Auswirkungen die wichtigsten Unsicherheiten auf das Ergebnis haben. Nachstehend werden diese kurz vorgestellt (vgl. folgende Abbildung).⁴⁰³

Abbildung 15-18: Übersicht über Inputdaten, Annahmen und Bandbreiten bei den Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr

Bereich / Annahme	Wissenstand (vgl. Kapitel 3.3.1)	Vorgehen in Basis- berechnung	Bandbreite Sensitivitäts- analyse
Mengengerüst			
Körperliche Aktivität im Fuss- und Veloverkehr	Wissen mit Unsicherheiten	Datenauswertung	ca. $\pm 50\%$
Intensität der körperlichen Aktivität	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	
Berücksichtigung der generellen körperlichen Aktivität	Wissen mit Unsicherheiten	Datenauswertung	
Belastungs-Wirkungs-Beziehungen	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	
Gesamtaktivität ohne Fuss- und Veloverkehr	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	-20%
Wertgerüst			
Soziale immaterielle Nutzen (VOSL bzw. VLYL)	Wissen mit Unsicherheiten	at least	$\pm 50\%$
Soziale immaterielle Nutzen für Krankheiten	Wissen mit Unsicherheiten	best guess / at least	
Externe Produktionsausfälle pro gewonnenes Erwerbsjahr	Wissen mit Unsicherheiten	best guess	
Übriges Wertgerüst	Wissen mit Unsicherheiten	Datenauswertung / best guess	

- **Körperliche Aktivität aus dem Fuss- und Veloverkehr:** Der erste Input in die Berechnung ist die körperliche Aktivität im Fuss- und Veloverkehr. Diese wurde aus dem Mikrozensus Mobilität und Verkehr speziell für dieses Projekt ausgewertet (Ausschluss Wandern und Mountainbiken). Die Unsicherheit dieser Daten für den Velo- und Fussverkehr ist im Vergleich zu den anderen Unsicherheiten als relativ gering einzuschätzen (ca. $\pm 10\%$) und wird nicht weiter untersucht. Für die beiden Elektrovelo-Kategorien (Pedelec und E-Bike) sind die Unsicherheiten auf Grund der geringeren Stichproben und dem geringeren Kenntnisstand zur körperlichen Aktivität grösser.
- **Intensität der körperlichen Aktivität aus dem Fuss- und Veloverkehr:** Hierbei geht es um die Herleitung der Geschwindigkeiten der Fuss- und Velo-Etappen (d.h. Dauer/Distanz), sowie die Übersetzung der Geschwindigkeit in Intensitäts-Einheiten (METs). Um unrealistische Geschwindigkeiten auszuschliessen, müssen Ausschlusskriterien definiert werden, welche geringe und damit hier vernachlässigbare Unsicherheiten mit sich bringen.

⁴⁰³ Im Vergleich zum bisherigen Umfang wird die Sensitivitätsanalyse erweitert: Neu berücksichtigt werden insbesondere die Auswirkungen von Änderungen in den Belastungs-Wirkungs-Beziehungen sowie die Effekte einer unterschiedlich hohen Baseline Aktivität.

Die Übersetzung von Geschwindigkeit in Intensitätsmasse basiert auf Angaben aus der Literatur, welche für das Herleiten eine Umrechnungsfunktion verwendet werden. Die dafür getroffenen Annahmen bringen eine gewisse, aber ebenfalls hier vernachlässigbare Unsicherheit mit sich (< 10%).

- **Generelle körperliche Aktivität (Baseline Aktivität):** Der Nutzen des Fuss- und Veloverkehrs für die Gesundheit hängt auch davon ab, wie aktiv die Personen im Allgemeinen sind (da die erste Stunde körperlicher Betätigung viel mehr bringt als die letzte). Hierzu wird ein Daten-Matching zwischen der Schweizer Gesundheitsbefragung und dem MZMV durchgeführt. Zudem muss eine methodische Entscheidung getroffen werden, wie die Aktivität aus dem Fuss- und Veloverkehr relativ zur sonstigen Aktivität berücksichtigt wird (Vergleichsanordnung; siehe Kapitel 15.3.1f). Die Unsicherheiten und Entscheidungen hierzu werden als relativ einflussreich eingeschätzt ($\pm 50\%$).
- **Belastungs-Wirkungs-Beziehungen:** Die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen werden der aktuellen Fachliteratur entnommen. Diese basieren auf Meta-Analysen zahlreicher Studien. Die Unsicherheit der Belastungs-Wirkungs-Beziehungen kann im Vergleich zu anderen Unsicherheiten als relativ gering eingeschätzt werden (< 10%).
- **Gesamtaktivität ohne Fuss- und Veloverkehr:** In der Hauptrechnung wird unterstellt, dass 20% der Gesamtaktivität in der SGB im Fuss- und Veloverkehr erbracht wird. In der Sensitivität wird hingegen unterstellt, dass der Fuss- und Veloverkehr zur Gesamtaktivität in der SGB dazukommt.
- **Altersgrenze** Die untere Altersgrenze von 15 bzw. 20 Jahren reduziert die Gesundheitsnutzen um weniger als 10%. Der grösste Anteil der Nutzen verteilt sich auf die älteren Personen.
- **Wertgerüst:** Bei den Kostensätzen zur Bewertung der sozialen Nutzen werden dieselben Unsicherheiten unterstellt wie bei der Luft- und Lärmbelastung: Der VLYL wird um $\pm 50\%$ verändert.⁴⁰⁴

15.8.2 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse werden in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt und können wie folgt erläutert werden:

- Würde der VOSL um 50% höher oder tiefer ausfallen, so wären die sozialen Gesundheitsnutzen um 42% höher oder tiefer (81 oder 33 Mrd. CHF), die externen Gesundheitsnutzen verändern sich dadurch aber nicht.
- Die Grenznutzen der zusätzlichen Bewegung nehmen mit steigender sportlicher Aktivität ab. In der Basisberechnung wird unterstellt, dass alle Aktivitäten gleich behandelt werden (mit dem

⁴⁰⁴ Die immateriellen Nutzen der vermiedenen Krankheitsbilder schwanken auch um $\pm 50\%$, auf eine Auswertung dieser Sensitivität wird trotzdem verzichtet, da die Erkenntnisse aus der Studie für 2015 gezeigt haben, dass das Ergebnis dadurch lediglich um $\pm 0.5\%$ schwankt. Dasselbe gilt für die externen Rentenleistungen für gewonnene Lebensjahre und Demenzzfälle, deren Schwankungsbreite von $\pm 30\%$ das Ergebnis lediglich um $\pm 0.4\%$ verändert.

Zudem wird aus Aufwandgründen auf die bisher durchgeführte Sensitivität mit der alternativen Berechnung über die Zahl der verhinderten Todesfälle und den VOSL (anstatt über die Zahl der gewonnenen Lebensjahre und den VLYL) verzichtet. Es ist davon auszugehen, dass diese Sensitivität eine ähnliche Auswirkung hat wie früher (+142% auf die sozialen Nutzen, 0% auf externe Nutzen, INFRAS; Ecomplan (2019)).

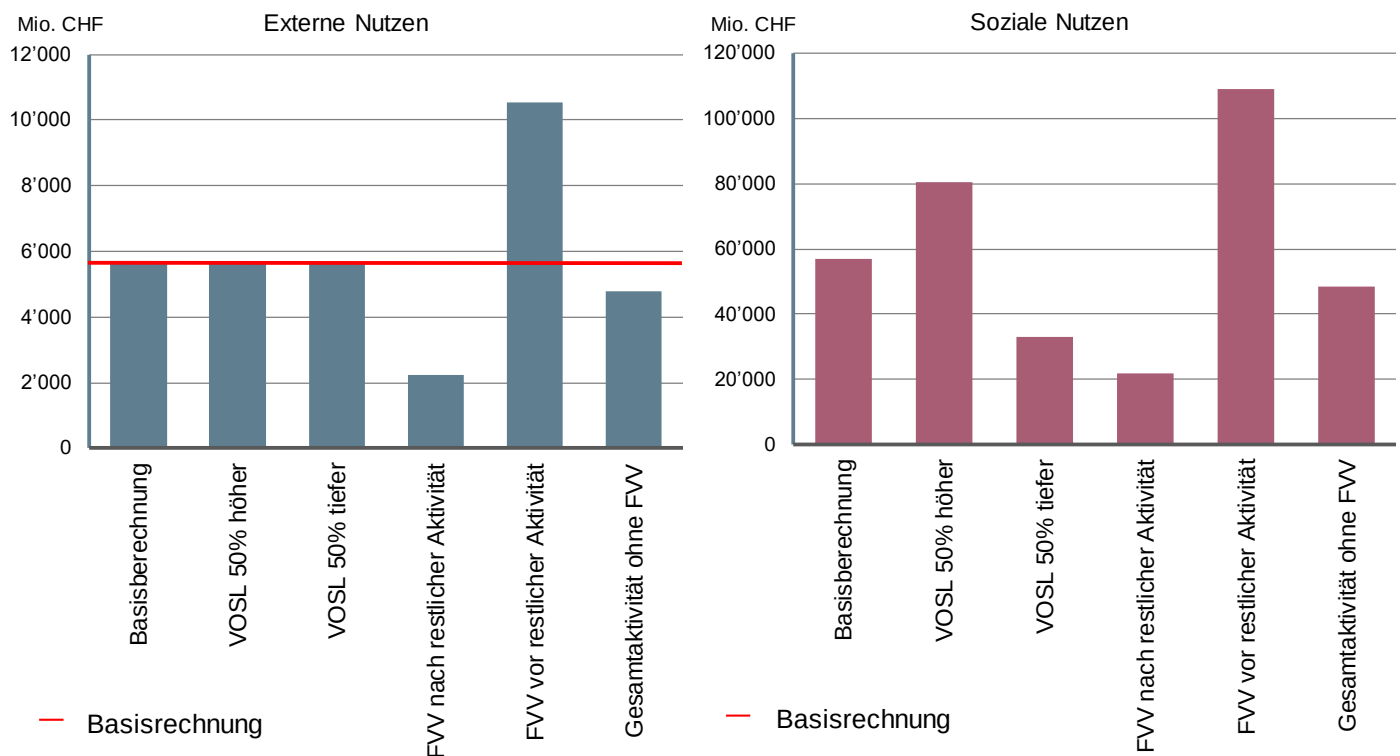
durchschnittlichen Effekt). Alternativ könnte auch unterstellt werden, dass die Aktivitäten im Fuss- und Veloverkehr nach (oder vor) allen anderen Aktivitäten erfolgen. Dort ist die Belastungs-Wirkungs-Beziehung flacher (steiler) und damit die Gesundheitseffekte geringer (grösser). Dadurch verändern sich die externen und sozialen Kosten um ca. –60% bzw. +90% und schwanken zwischen 2.2 und 10.5 Mrd. CHF (externe Nutzen) bzw. zwischen 22 und 109 Mrd. CHF (soziale Nutzen).

- Wenn der Fuss- und Veloverkehr zur Gesamtaktivität in der SGB dazukommt (und nicht teilweise darin enthalten ist), so ist das gesamte Aktivitätsniveau höher und damit der durchschnittliche Effekt der körperlichen Betätigung geringer. Folglich fallen die externen bzw. sozialen Nutzen um ca. 15% (auf 4.8 bzw. 49 Mrd. CHF).

Abbildung 15-19: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Gesundheitsnutzen

in Mio. CHF	Externe Nutzen	Soziale Nutzen
Basisberechnung	5'617.2	56'761.1
VOSL 50% höher	5'617.2	80'549.6
VOSL 50% tiefer	5'617.2	32'972.7
FVV nach restlicher Aktivität	2'237.8	21'777.1
FVV vor restlicher Aktivität	10'526.4	109'017.2
Gesamtaktivität ohne FVV	4'783.8	48'556.7
Abweichung von Basisrechnung in %		
VOSL 50% höher	0%	42%
VOSL 50% tiefer	0%	-42%
FVV nach restlicher Aktivität	-60%	-62%
FVV vor restlicher Aktivität	87%	92%
Gesamtaktivität ohne FVV	-15%	-14%
Absolute Abweichung von Basisrechnung		
VOSL 50% höher	-	23'788.44
VOSL 50% tiefer	-	-23'788.44
FVV nach restlicher Aktivität	-3'379.43	-34'984.02
FVV vor restlicher Aktivität	4'909.21	52'256.05
Gesamtaktivität ohne FVV	-833.41	-8'204.41

Abbildung 15-20: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Gesundheitsnutzen



Achtung: Die Skalen der externen bzw. sozialen Nutzen sind unterschiedlich.

15.8.3 Zusätzliche Unter- oder Überschätzungen

Die dargestellten Ergebnisse dürften eine **Unterschätzung der Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs** darstellen. Dies insbesondere aus folgenden Gründen:

Mengengerüst

- Es wurden sechs verschiedenen Krankheitsbilder berücksichtigt. Der Fuss- und Veloverkehr bzw. die Bewegung dürfte jedoch auch das Risiko auf **weitere Krankheitsbilder** reduzieren (z.B. Hirnschlag, Osteoporose, weitere Krebsarten).⁴⁰⁵
- **Langzeitwirkungen:** Mögliche Langzeiteffekte von körperlicher Aktivität auf das Krankheitsrisiko später im Leben (sog. Lag-Effekte) werden mit der derzeitigen Methode nicht berücksichtigt, da die Berechnung deutlich komplexer würde (sog. Life table analysis) und es hierzu kaum epidemiologische Studien gibt. Trotzdem ist davon auszugehen, dass der positive Effekt des Fuss- und Veloverkehrs auf die Gesundheit nicht nur vom aktuellen Niveau der körperlichen Betätigung im Fuss- und Veloverkehr abhängt, sondern auch vom Niveau in den vergangenen Jahren. In die vorliegenden Berechnungen ist jedoch nur das aktuelle Niveau eingeflossen, was tendenziell zu einer Unterschätzung der Nutzen führt.

⁴⁰⁵ Garcia; Pearce; Abbas; u. a. (2023); Garcia; Woodcock (2023); Physical Activity Guidelines Advisory Committee (2018)

- Es werden nur vermiedene Spitaleinweisungen berücksichtigt, bei denen die Hauptdiagnose einem der sechs betrachteten Krankheitsbilder entspricht. Hospitalisationen, die als **Nebendiagnose** eines der sechs Krankheitsbilder haben, werden folglich vernachlässigt. Dies führt insbesondere bei der Demenz zu einer Unterschätzung.

Wertgerüst

- Nur bei der Demenz und Diabetes werden nebst den vermiedenen Kosten durch Spitalaufenthalte weitere Kosten (Pflegekosten, Arztkosten, Medikamentenkonsum, Produktionsausfälle (ohne Spitalaufenthalt), immaterielle Kosten der Krankheit) berücksichtigt, obwohl auch bei den übrigen vier Krankheitsbilder (Herz- / Kreislauferkrankungen, Depression, Brustkrebs und Kolonkrebs) mit **Kosten ausserhalb der Spitalaufenthalte** (Medikamentenkonsum sowie Arzt- und Psychiatriebesuche, Kosten der IV) zur rechnen ist.
- Einige Krankheitssymptome von **Depressionen** und die damit verbundenen Kosten können nicht miteinbezogen werden: So werden **Produktionsausfälle durch leichte Depressionen** (durch verminderte Produktivität und Arbeitsausfälle) vernachlässigt. Zudem haben 9 von 10 depressiven Personen gleichzeitig körperliche Beschwerden oder Schmerzen. Zudem kann nach einer Depression möglicherweise nur noch eine **weniger anspruchsvolle Arbeit** erledigt werden – oder gar keine mehr. Dann können auch **Kosten bei der IV** und **Wiederbesetzungskosten** entstehen, die in den ausgewiesenen Nutzen ebenfalls fehlen.
- Die **vermiedenen administrativen Kosten** der Gesundheitsschäden werden nicht miteinbezogen. Ihre Bedeutung dürfte allerdings gering sein (in den Bereichen Luft- und Lärmbelastung belaufen sie sich auf weniger als 0.5% der Kosten, vgl. Kapitel 0 und 9.8.3).
- Bei der Bestimmung der **Kostensätze** zur Bewertung der Nutzen wurden gemäss dem at least Ansatz ebenfalls **vorsichtige Werte** verwendet bzw. teilweise fehlen Datengrundlagen, die eine Bewertung erlauben würden (vgl. Fussnote 156).

15.9 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

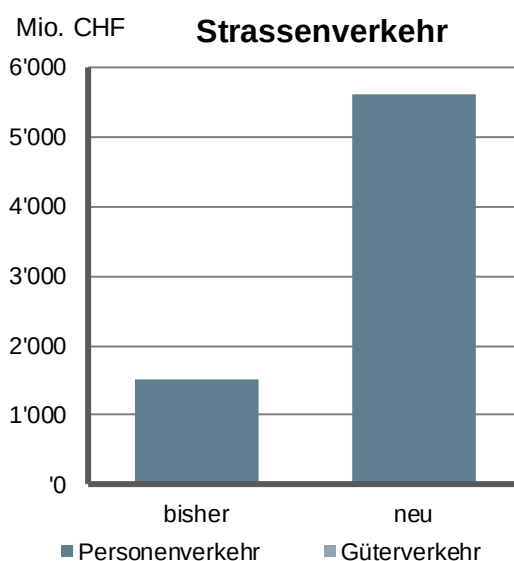
15.9.1 Externe Nutzen

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die externen Nutzen verglichen mit den bisherigen Ergebnissen für das Jahr 2021, die gemäss der bisherigen Methodik⁴⁰⁶ mit dem Aktualisierungstool für das Jahr 2021 berechnet wurden. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen, dass die externen Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr deutlich zugenommen haben: von 1.5 Mrd. CHF auf 5.6 Mrd. CHF oder um 270%. Es gibt viele Gründe für diese Zunahme um insgesamt 4.1 Mrd. CHF:

⁴⁰⁶ Gemäss INFRAS; Ecoplan (2019)

Abbildung 15-21: Vergleich zu den bisherigen Berechnungen: Externe Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	1'521.95	-	1'521.9
Schienenverkehr	-	-	-
Luftverkehr	-	-	-
Schiffsverkehr	-	-	-
Total	1'521.9	-	1'521.9
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	5'617.2	-	5'617.2
Schienenverkehr	-	-	-
Luftverkehr	-	-	-
Schiffsverkehr	-	-	-
Total	5'617.2	-	5'617.2
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	269.1%	0.0%	269.1%
Schienenverkehr	0.0%	0.0%	0.0%
Luftverkehr	0.0%	0.0%	0.0%
Schiffsverkehr	0.0%	0.0%	0.0%
Total	269.1%	0.0%	269.1%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	4'095.2	-	4'095.2
Schienenverkehr	-	-	-
Luftverkehr	-	-	-
Schiffsverkehr	-	-	-
Total	4'095.2	-	4'095.2

Abbildung 15-22: Vergleich zu den bisherigen Berechnungen: Externe Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr

- **Pedelec und E-Bikes** konnten bisher nicht berücksichtigt werden. Diese zusätzlich berücksichtigten Verkehrsmittel erklären 0.3 Mrd. CHF der Zunahme.
- Neu werden neben den Hospitalisationen auch die **Inzidenzen** von Demenz und Diabetes berücksichtigt. Darauf entfallen 1.8 Mrd. CHF (ohne Pedelec und E-Bike). Dies ist also der Hauptgrund für die deutliche Zunahme der externen Nutzen. Wie erläutert sind dies vor allem die Pflegekosten von demenzkranken Personen (Heim- und Spitexkosten sowie informelle Pflege).
- Bei den vermiedenen frühzeitigen Todesfällen (bzw. gewonnenen Erwerbsjahren) nehmen die externen Nutzen (ohne Pedelecs und E-Bikes) um 0.25 Mrd. CHF oder 23% zu, was vor allem auf eine Zunahme des Mengengerüsts zurückzuführen ist.
- Diese Veränderungen im **Mengengerüst** sind in erster Linie auf die neue Methodik zur Berücksichtigung der Baseline Aktivität zurückzuführen. Dabei zeigt sich, dass die Gesundheitseffekte im Fussverkehr stärker zunehmen als im Veloverkehr. Zudem ist zu beachten, dass neu angenommen wird, dass Aktivitäten im Fuss- und Veloverkehr als gleichwertig angesehen werden zu anderen sportlichen Aktivitäten (anstatt wie bisher als nachträglich zu anderen Aktivitäten, vgl. Kapitel 15.3.1f). Diese Effekte haben Einfluss auf Todes- und Krankheitsfälle. Wie die Sensitivitätsanalyse zeigte, wären die Gesundheitsnutzen um durchschnittlich 60% tiefer, wenn die Bewegung im Fuss- und Veloverkehr erst nach den anderen Aktivitäten stattfinden würde. Dieser Prozentsatz ist jedoch je nach Krankheitsbild unterschiedlich hoch (vgl. Abbildung 15-2).
- Zusätzlich wurden die **Belastungs-Wirkungs-Beziehungen** überarbeitet. Dies führt zusammen mit den obigen Anpassungen im Mengengerüst zu folgenden Veränderungen in der Zahl der Hospitalisationen (ohne Pedelec und E-Bike):
 - Herz-/Kreislauferkrankungen: +438% oder 1.3 Mrd. CHF. Denn es wird neu eine grössere Bandbreite von Krankheitsbildern berücksichtigt, da die neue Belastungs-Wirkungs-Beziehung breiter abgestützt ist als bisher. Dies führt dazu, dass ca. doppelt so viele Herz-/ Kreislauferkrankungen berücksichtigt werden wie bisher. Zudem ist die neue Expositions-Wirkungs-Beziehung deutlich stärker (ca. Faktor 2).
 - Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes): +149% oder 0.03 Mrd. CHF (ohne Inzidenzen).
 - Demenz: +45% oder 0.04 Mrd. CHF (ohne Inzidenzen).
 - Depression: +602% oder 0.3 Mrd. CHF. Bei Depressionen ist die neue Expositions-Wirkungs-Beziehung deutlich stärker als bisher (ca. Faktor 3).
 - Brustkrebs: +32% oder 0.004 Mrd. CHF
 - Kolonkrebs: -49% oder -0.02 Mrd. CHF. Hier ist die Belastungs-Wirkungs-Beziehung weniger stark als bisher.
- Schliesslich verändern sich auch die **Kostensätze**. Bei den externen Kosten sind vor allem die Spitalkosten relevant, die sich bei Demenz und Depression um gut 30% reduzieren, bei den anderen vier Krankheitsbildern jedoch um 37% (Brustkrebs) bis 196% (Kolonkrebs) erhöhen. Die externen Kostensätze bei den vermiedenen frühzeitigen Todesfällen verändern sich hingegen kaum.

15.9.2 Soziale Nutzen

Die sozialen Gesundheitsnutzen nehmen mit den neuen Berechnungen ebenfalls zu, jedoch «nur» um 63% bzw. um 22 Mrd. CHF (von 35 auf 57 Mrd. CHF). Die Gründe für diese Zunahme sind ähnlich wie bei den externen Nutzen. Die Zunahme fällt jedoch prozentmässig deutlich geringer aus, weil hier die immateriellen Kosten der verlorenen Lebensjahre einen Grossteil der Kosten ausmachen und sich diese weniger stark verändern:

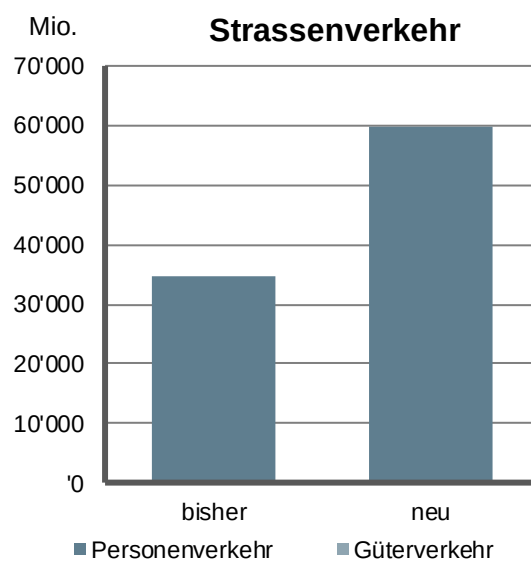
Abbildung 15-23: Vergleich zu den bisherigen Berechnungen: Soziale Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	34'799.48	-	34'799.5
Schienenverkehr	-	-	-
Luftverkehr	-	-	-
Schiffsverkehr	-	-	-
Total	34'799.5	-	34'799.5
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	56'761.1	-	56'761.1
Schienenverkehr	-	-	-
Luftverkehr	-	-	-
Schiffsverkehr	-	-	-
Total	56'761.1	-	56'761.1
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	63.1%	0.0%	63.1%
Schienenverkehr	0.0%	0.0%	0.0%
Luftverkehr	0.0%	0.0%	0.0%
Schiffsverkehr	0.0%	0.0%	0.0%
Total	63.1%	0.0%	63.1%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	21'961.6	-	21'961.6
Schienenverkehr	-	-	-
Luftverkehr	-	-	-
Schiffsverkehr	-	-	-
Total	21'961.6	-	21'961.6

- Ein Grossteil der sozialen Gesundheitsnutzen (47.6 Mrd. CHF) ist auf die gewonnenen Lebensjahre und den VLYL zurückzuführen. Die Zahl der gewonnen Lebensjahre nimmt im Fussverkehr um 67% zu, im Veloverkehr aber um 20% ab (zusammen ergibt dies eine Zunahme um 39%) – aufgrund der oben beschriebenen Veränderungen im Mengengerüst. Der Kostensatz (VLYL) verändert sich nicht. Insgesamt nehmen die Nutzen aus gewonnenen Lebensjahren um 13.1 Mrd. CHF zu (ohne Pedelecs und E-Bikes).
- Des Weiteren gelten die Ausführungen von oben: Neu sind Pedelecs und E-Bikes (+3.4 Mrd. CHF) sowie die Inzidenzen von Demenz und Diabetes (+2.7 Mrd. CHF). Zudem verändern sich die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen und die Kostensätze für Spitalkosten gleich wie oben

beschrieben. Bei den immateriellen Kosten der Krankheitsbilder wird von demselben Kostensatz pro Spitaltag ausgegangen wie bisher. Da sich aber die Zahl der Spitaltage pro Hospitalisation mit den neuen Spitaldaten verändert haben, verändern sich auch die immateriellen Kosten pro Hospitalisation je nach Krankheitsbild um -28% bis +14%. Bei der Demenz kann der immaterielle Kostensatz, der eigentlich für Inzidenzen gilt, neu auch tatsächlich für die Inzidenzen angewendet werden und muss nicht mehr approximativ für Hospitalisationen eingesetzt werden, wobei es knapp 6-mal mehr Inzidenzen als Hospitalisationen gibt.

Abbildung 15-24: Vergleich zu den bisherigen Berechnungen: Soziale Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr



16 Exkurs: Überlastungskosten

Die Kosten der Überlastung entstehen, wenn zu viele Menschen gleichzeitig ein öffentliches Gut nutzen. Bei Überlastungen der Kapazität der Strasseninfrastruktur, bei der die Kapazitäten nicht vorab zugeteilt werden, resultieren niedrigere Geschwindigkeiten der Fahrzeuge und damit höhere Kosten für die Nutzenden im Vergleich zu einer Situation ohne Überlastung (free-flow-Geschwindigkeit). Bei Überlastungen von kollektiv genutzten Verkehrsmitteln sinkt der Komfort. Aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden handelt es sich hierbei um Externalitäten: die Nutzung durch eine Person hat eine Wirkung auf die anderen Verkehrsteilnehmenden, ist aber im Preis für die Nutzung nicht enthalten, d.h. es findet keine entsprechende Transaktion am Markt statt.

Diese Überlastungskosten stellen eine spezielle Art von Externalität dar, die von den Nutzenden auf ihre Mitnutzenden übertragen wird. Hierbei bleibt die Externalität innerhalb des Systems (z.B. im Strassenverkehr). Wenn die gesamten Kosten betrachtet werden, ist keine Unterscheidung zwischen privatem und externem Anteil möglich. Die privaten und externen Kosten können nur in der Grenzbetrachtung ausgewiesen werden. Deshalb werden die Kosten der Überlastung von Verkehrsinfrastrukturen und Verkehrsmitteln getrennt von den anderen Kostenbereichen betrachtet. Sie werden also nicht zu den anderen externen Kosten addiert. Mittels einer Abgabe oder Steuer zur Internalisierung dieser Externalität kann eine optimale Nutzung der vorhandenen Kapazitäten erreicht werden. Die Überlastungskosten sind daher hauptsächlich für das Pricing relevant.

Aus Sicht der Verkehrsträger sind diese Kosten privat, weil sie sich die Verkehrsteilnehmenden eines Verkehrsträgers gegenseitig aber nicht der Allgemeinheit auferlegen. Die Kosten der Überlastung von Verkehrsinfrastrukturen und Verkehrsmitteln wurden in den bisherigen Berechnungen der externen Kosten des Verkehrs daher nicht berücksichtigt, weil die Sicht der Verkehrsträger im Vordergrund stand. Aus Sicht der Verkehrsart Schwerverkehr werden die Stauzeitkosten gemäss Bundesgerichtsentscheid ermittelt. Die Methodik weicht jedoch von den Überlastungskosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende ab. Sie sind daher nicht vergleichbar.

Die Kosten der Überlastung der Strasseninfrastruktur und von Verkehrsmitteln im ÖV aus Sicht der Verkehrsteilnehmenden wurden in der Schweiz im Jahr 2022 in einer Grundlagenstudie quantifiziert.⁴⁰⁷ Die Methodik und Datengrundlagen sind in der Grundlagenstudie ausführlich beschrieben und werden vorliegend nicht detailliert erläutert. Für die Strasse wurden die gesamten Zeitverlustkosten, der Wohlfahrtsverlust, die Grenzkosten und der externe Anteil für 2019 geschätzt. Für den ÖV wurden die gesamten Komfortkosten für 2019 geschätzt. Die gesamten Zeitverlustkosten auf der Strasse betrugen im Jahr 2019 rund 3 Mrd. CHF. Die Komfortverlustkosten im ÖV knapp 30 Mio. CHF. Für die Aktualisierung wurde dem ARE ein Tool (R Studio) bereitgestellt, welches für Berechnung der Kosten für das Jahr 2021 verwendet wird.

In Abbildung 16-1 sind die Ergebnisse für die Zeitverlustkosten des motorisierten Verkehrs auf der Strasse für das Jahr 2021 dargestellt, und in Abbildung 16-2 sind die Ergebnisse für die Komfortkosten im ÖV abgebildet. Die gesamten Zeitverlustkosten im Strassenverkehr betragen für das

⁴⁰⁷ INFRAS; EBP (2022). Mit dem EU Handbook für externe Verkehrskosten liegen grobe Schätzungen lediglich für die Zeitverlustkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende für die Schweiz vor. Die Komfortverlustkosten werden im EU Handbook nicht quantifiziert (van Essen; Fiorello; El Beyrouthy; u. a. (2019)).

Jahr 2021 insgesamt rund 2.6 Mrd. Franken.⁴⁰⁸ Das sind rund 13 % weniger als im Jahr 2019. Die Komfortverlustkosten betragen insgesamt gut 12 Mio. Franken. Das sind rund 60 % weniger als im Jahr 2019. Diese Unterschiede sind auf die Covid-19-Pandemie zurückzuführen. Während der Verkehr 2020-2021 stark zurückging, stieg nach Rückmeldung von ÖV-Unternehmen auch die Unsicherheit der Ergebnisse, da die Berechnungsmethode nicht für solch drastische Veränderungen ausgelegt ist. Die Ergebnisse für die Jahre 2020 und 2021 sind daher mit Vorsicht zu interpretieren.

Abbildung 16-1: Gesamte Zeitverlustkosten im Strassenverkehr für das Jahr 2021

Verkehrsmittel	Zeitverlustkosten (Mio. CHF/a)	Externe Grenzzzeitkosten (Mio. CHF/a)	Durchschnittlich verursachte Grenzzzeitkosten (Rp./Fzkm)
Personenwagen	2'155	798	0.44
Lieferwagen	311	105	0.80
Schwere Nutzfahrzeuge	159	87	0.46
Total	2'625	990	-

Abbildung 16-2: Gesamte Komfortverlustkosten im ÖV für das Jahr 2021

Verkehrsart Segment	Komfortverlustkosten (Mio. CHF/a)
Bahn	
Fernverkehr	0.38
Regionalverkehr	0.63
Regionalbusverkehr	0.15
Städtischer Nahverkehr	11.12
Summe	12.28

⁴⁰⁸ Aufgrund der Datenlage war kein separater Ausweis der Zeitverlustkosten für den ÖV möglich.

17 Exkurs: Zusatzkosten in städtischen Räumen

In früheren Studien wurden ergänzend zu den bisher dargestellten Effekten zusätzliche Kosten in städtischen Räumen berechnet. Dabei standen die Kosten aufgrund von **räumlichen Trennwirkungen** sowie die Kosten aufgrund von **Beeinträchtigungen des Ortsbilds und der Aufenthaltsqualität** durch Verkehr und Verkehrsinfrastrukturen im Vordergrund.

17.1 Räumliche Trenneffekte

In städtischen Räumen führen räumliche **Trenneffekte** des Verkehrs zu Kosten für die Verkehrsteilnehmenden. Die räumlichen Trennungseffekte beziehen sich auf die Wartezeiten bzw. Zeitverluste von Fussgehenden und Velofahrenden beim Queren von Strassen und Schienen. Zudem können grosse Infrastrukturen, wie Stadtautobahnen oder grosse Gleisfelder, Fussgänger und Velofahrerinnen dazu zwingen, Umwege zu nehmen, was zu Zeitverlusten führt. Die Kosten wurden in den früheren Studien für bestimmte Verkehrsmittel (Schiene und motorisierter Verkehr auf der Strasse) berechnet, unter der Annahme, dass die Zeitverluste durch andere Verkehrsmittel (insbesondere durch den Fuss- und Veloverkehr) vernachlässigbar waren.

Die vorliegende Studie nimmt eine individuelle Sicht der Externalität ein (und nicht nach Verkehrsträger als Gruppe). Die Entscheidung über die Priorisierung von Verkehrsmitteln und die Optimierung der Wartezeiten, die ein Verkehrsmittel dem anderen auferlegt, ist eine Entscheidung der Verkehrs- und Raumplanung auf kollektiver Ebene. Dies stellt nach Einschätzung des ARE keine Externalität dar, die auf eine individuelle Mobilitätsentscheidung zurückzuführen ist (vgl. Kap. 3.1.1). Zeitverluste individueller Entscheidungen auf der Strasse werden – wo berechenbar – in den Überlastungskosten behandelt. (vgl. Kap. 16).⁴⁰⁹

Fazit: Die Trenneffekte sind keine externen Effekte im Sinne der in diesem Projekt verwendeten Abgrenzung.

17.2 Beeinträchtigung des Ortsbilds und Verminderung der Aufenthaltsqualität

Starker Verkehr kann zu einer Beeinträchtigung des Ortsbilds sowie einer generellen Verminderung der Aufenthaltsqualität entlang von Verkehrsachsen führen. Die Folgen davon sind visuelle Beeinträchtigungen sowie eine Beeinträchtigung der Lebensqualität durch Trennwirkungen, potenzieller Unfallgefahr, vermindertem Sicherheitsgefühl etc. Die in den letzten Jahren in Angriff genommenen Investitionen in Aufwertungs- und Gestaltungsmaßnahmen bei Ortsdurchfahrten zeigen den Problemdruck und die Zahlungsbereitschaft der Gesellschaft zur Minderung dieser Effekte. Die Beeinträchtigung des Ortsbilds wurde in den früheren Studien nur für den Strassenverkehr als Verursacher ermittelt.

In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass die Kosten für die Ortsbildbeeinträchtigung nicht mit den anderen Bereichen der externen Kosten vergleichbar sind. Es wird daher auf eine

⁴⁰⁹ Vergleiche auch INFRAS; EBP (2022)

Berechnung dieser Kosten verzichtet. Die Kosten der Ortsbildbeeinträchtigung sind nicht als Externalität des Verkehrs, sondern als **Opportunitätskosten** zu betrachten (vgl. auch Kap. 3.1.1). Die Beeinträchtigung eines Ortsbilds umfasst bspw. die Zahlungsbereitschaft für «Blue and Green Amenities» (z.B. Wasserbezogene Annehmlichkeiten, Grünflächen) oder die Kosten für psychische Schäden durch Platzmangel bei Kindern. Diese Kosten gehören zur Problematik der **Flächennutzung** und sind keine Externalitäten des Verkehrs.

Dieses Vorgehen ist kohärent mit der internationalen Literatur. So werden auch im internationalen Vergleich die Zusatzkosten in städtischen Räumen nicht quantifiziert. Im EU-Forschungsprojekt «Handbook on external costs of transport»⁴¹⁰ werden die Trennungskosten in städtischen Gebieten beispielsweise lediglich erwähnt.

Fazit: Die Kosten für die Beeinträchtigung des Ortsbilds und der Aufenthaltsqualität werden vorliegend nicht als externe Kosten berücksichtigt, da es sich um Opportunitätskosten handelt. Die Bedeutung der Flächennutzung ist in der öffentlichen Diskussion gestiegen.

⁴¹⁰ European Commission (2020)

18 Exkurs: Ungedeckte marginale Infrastrukturkosten

Die Verkehrsteilnehmenden verursachen nicht nur externe Kosten. Wird eine effiziente Nutzung bzw. Bepreisung der bestehenden Infrastruktur in den Fokus gerückt, sind weitere Aspekte wie die Deckung der marginalen Infrastrukturkosten durch die Verkehrsteilnehmenden relevant. Gemäss der ökonomischen Wohlfahrtstheorie sind Preise in Höhe der Grenzkosten effizient, weil damit die Wohlfahrt maximal ist. Marginale Infrastrukturkosten (oder Infrastrukturgrenzkosten) sind die Kosten, die durch eine zusätzliche Fahrt verursacht werden. Beispielsweise verursacht ein Zug auf der Schieneninfrastruktur Kosten für den Betrieb und Unterhalt. Da es sich bei den betrachteten Infrastrukturen um natürliche Monopole handelt, die u.a. durch hohe Fixkosten gekennzeichnet sind und deren Durchschnittskostenkurve über der Grenzkostenkurve liegt, führt die ökonomisch effiziente Bepreisung in Höhe der Grenzkosten zu einem Defizit. Das Defizit kann einerseits mittels Aufschläge zum Abschöpfen der Zahlungsbereitschaften und/oder durch Subventionen des Staates finanziert werden, was letztlich ein politischer Entscheid ist.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde geprüft, inwiefern auch ungedeckte Infrastrukturgrenz-kosten in die Gesamtsicht integriert werden könnten. Die vorliegende Betrachtung ist daher komplementär zur Statistik der Kosten und der Finanzierung des Verkehrs (KFV) des BFS. Die KFV-Statistik des BFS fasst die gesamten Infrastrukturkosten zusammen. Die gesamten Infrastrukturkosten umfassen die Kosten für den Bau, den Substanzerhalt und den Betrieb der Infrastruktur. Sie baut dabei insbesondere auf der Strasseninfrastrukturrechnung und der Eisenbahnrechnung auf. Die KFV-Statistik zeigt sowohl die Kostenarten als auch die Kostenträger. Diese Zahlen ermöglichen es, für jeden Verkehrsträger zu zeigen, in welchem Umfang die Finanzierung dieser Kosten von den Nutzenden, der öffentlichen Hand, der Allgemeinheit oder von Transportunternehmen getragen werden.⁴¹¹ Sie zeigt zudem den Grad der Kostendeckung aus einer Gesamtopsik aus.

Von ungedeckten Infrastrukturgrenzkosten wird gesprochen, wenn diese nicht von den Verursachern getragen werden. Bisher wurden die Infrastrukturgrenzkosten der Strasse, Schiene, Binnenschifffahrt und der Flughäfen im Rahmen der ARE-Studien zu den externen Effekten des Verkehrs nicht berechnet. Der Fokus lag auf den externen Kosten des Verkehrs aus Sicht der Verkehrsträger. Rückt nun die Sicht der Verkehrsteilnehmenden und eine effiziente Ressourcenallokation in den Vordergrund, sind auch ungedeckte Grenzkosten in die Betrachtung einzubeziehen.

Für die Berechnung bzw. Schätzung der ungedeckten Infrastrukturgrenzkosten sind zwei grundlegende Fragen zu beantworten:

1. Wie hoch sind die Grenzkosten?
2. Wie hoch ist der Deckungsgrad der Grenzkosten bzw. wie hoch sind die ungedeckten Grenzkosten?

⁴¹¹ Die Schieneninfrastruktur wird beispielsweise sowohl von den Eisenbahnverkehrsunternehmen als Nutzende über den Trassenpreis finanziert als auch von allgemeinen Steuermitteln und teilweise von den Nutzenden der Strasse über einen Teil der Einnahmen aus der LSVa oder der Mineralölsteuer.

Für die Beantwortung der ersten Frage kann vereinfachend zwischen fixen und variablen Kosten unterschieden werden.⁴¹² Fixe Kosten der Infrastrukturbereitstellung fallen unabhängig von der Nutzung der Verkehrsinfrastruktur an. Variable Kosten sind dagegen abhängig von den auf der Infrastruktur gefahrenen Fahrzeugkilometern bzw. der Betriebsleistungen. Die Variabilität der Infrastrukturkosten hängt von der zeitlichen Perspektive ab. Je langfristiger der betrachtete Zeithorizont, desto mehr Kostenkomponenten können als variabel betrachtet werden. In der vorliegenden Studie wird eine kurzfristige Perspektive eingenommen. Die Infrastruktur wird als gegeben angenommen.

Aufgrund unserer Analyse kommen wir zum Schluss, dass **die (kurzfristigen) marginalen Infrastrukturkosten in der Schweiz gedeckt sind** und daher auf eine Berechnung verzichtet werden kann. Die Begründungen für die vier Verkehrsträger lauten wie folgt:

1. Der Anteil der variablen Strasseninfrastrukturkosten ist gering. In den externen Kosten des Verkehrs für das Jahr 2005⁴¹³ wurde der Anteil variabler Infrastrukturkosten für die Strasse auf insgesamt rund 17% geschätzt. Auf den Nationalstrassen lag dieser Anteil bei rund 8%. Bei den Kantons- und Gemeindestrassen lag er bei 25 bzw. 22%. Die Ausgaben- und Kostendeckung der Strasse lag im Jahr 2021 bei insgesamt rund 114 bzw. 110%, d.h. die anrechenbaren Einnahmen aus Mineralöl-, Automobil- und kantonalen Motorfahrzeugsteuern sowie Nationalstrassen- und Schwerverkehrsabgabe der Verkehrsnutzenden haben die Ausgaben bzw. Kosten in der Gesamtbetrachtung vollständig gedeckt.⁴¹⁴ Werden die einzelnen Fahrzeugkategorien betrachtet, ergibt sich ein differenziertes Bild. Einzig bei den öffentlichen Bussen lag der Ausgaben- bzw. Kostendeckungsgrad bei 15% bzw. 14% und damit unter dem Anteil der variablen Infrastrukturkosten. Mit der geplanten Aufhebung der Rückerstattung der Mineralölsteuer und dem Mineralölsteuerzuschlag für konzessionierte Transportunternehmen im Rahmen der geplanten Revision des CO₂-Gesetzes wird dieser Kostendeckungsgrad jedoch steigen. Da es sich beim ÖV um bestellten und subventionierten Verkehr im Sinne des service public bzw. des Gemeinwohls handelt, dürfte die Frage der Deckung der Grenzkosten im ÖV auf der Strasse weniger relevant sein. Fazit: Auf der Strasse dürften die marginalen Infrastrukturkosten gedeckt sein.
2. Für die Schieneninfrastruktur werden die Infrastrukturnutzungsgebühren (Trassenpreise) grenzkostenbasiert durch das BAV auf Basis von Angaben der Infrastrukturbetreiberinnen festgelegt. Zudem werden Aufschläge erhoben, wo es der Markt erlaubt. Aufgrund dessen muss per se davon ausgegangen werden, dass die marginalen Infrastrukturkosten der Schieneninfrastruktur durch die Trasseneinnahmen, die von den Eisenbahnverkehrsunternehmen gezahlt werden, gedeckt sind.
3. Für den Luftverkehr gibt die KfV-Statistik zu den gesamten Infrastrukturkosten Auskunft, aber nicht zu variablen oder marginalen Infrastrukturkosten. Im Rahmen einer früheren Studie wurde für den Luftverkehr (Aviation) nach dem Territorialitätsprinzip eine Kostendeckung der

⁴¹² Vereinfachend wird angenommen, dass die variablen gleich den Grenzkosten sind.

⁴¹³ Ecoplan; INFRAS (2008)

⁴¹⁴ BFS (2024)

privaten Verkehrsmittel- und Infrastrukturkosten von rund 97% ausgewiesen.⁴¹⁵ Auch in dieser Grundlagenstudie wurden keine variablen und fixen Kosten für die Infrastruktur und deren Deckung ausgewiesen. Angesichts des Kostendeckungsgrades von knapp 100% ist jedoch davon auszugehen, dass die Infrastrukturgrenzkosten im Luftverkehr gedeckt sein müssten. Fazit: Auch im Luftverkehr dürften die marginalen Infrastrukturkosten als gedeckt gelten.

4. Für die Binnenschifffahrt liegen keine Schätzungen zum Anteil der variablen Kosten vor. Wir gehen davon aus, dass die Infrastrukturgrenzkosten der Schifffahrt nahe null sind.⁴¹⁶ Die Kosten für die Anlegeinfrastruktur sind praktisch unabhängig von der Betriebsleistung. Erst bei viel höherem Verkehrsaufkommen gibt es Sprungkosten durch zusätzlich notwendige Anlegestellen. Dies entspricht aber nicht den Grenzkosten im engeren Sinn. Fazit: Die marginalen Infrastrukturkosten in der Binnenschifffahrt dürften ebenfalls gedeckt sein.

Fazit: Für eine effiziente Allokation der Infrastrukturkapazitäten sind die Preise für die Nutzenden mindestens in Höhe der Grenzkosten festzulegen. Gemäss unserer Analyse gehen wir davon aus, dass die Infrastrukturgrenzkosten für alle Verkehrsträger durch Einnahmen der Nutzenden insgesamt gedeckt sind. Für die Schieneninfrastruktur hat eine kürzlich durchgeführte Evaluation im Auftrag des BAV gezeigt, dass es zwar Überprüfungs- und Verbesserungsbedarf bezüglich des Trassenpreissystems und insbesondere den Grenzkosten gibt, aber keine systematische Unterdeckung der Grenzkosten.⁴¹⁷ Die Frage der Höhe der Grenzkosten müsste aber insbesondere für Strasse, Luftverkehr und Binnenschiff vertieft untersucht werden. Dies war nicht Gegenstand der vorliegenden Studie.

⁴¹⁵ INFRAS; Ecoplan (2012b)

⁴¹⁶ INFRAS; Planco (2017)

⁴¹⁷ Ecoplan und IMDM (2023)

19 Übersicht über die Ergebnisse

In diesem Schlusskapitel werden die Ergebnisse der 12 untersuchten Kostenbereiche zusammengefasst und übersichtlich dargestellt. Dabei gehen wir zuerst auf die externen Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende (Kapitel 19.1) ein. Anschliessend folgt die Zusammenfassung zu den sozialen Effekten (Kapitel 19.2) sowie die externen Effekte aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr (Kapitel 19.3).

In Kapitel 19.4 werden die durchschnittlichen Kosten pro Leistungseinheit (Personenkilometer, Tonnenkilometer, Fahrzeugkilometer und Zugkilometer) ausgewiesen, wobei auch ein Vergleich zwischen den vier Verkehrsträgern Strasse, Schiene, Luft und Wasser erfolgt. Kapitel 19.5 thematisiert die Unsicherheiten den Berechnungen. In Kapitel 19.6 werden die Ergebnisse noch mit den bisherigen Berechnungen verglichen. Schliesslich erfolgt in Kapitel 19.7 eine Rückrechnung der Ergebnisse des Jahres 2021 auf die Jahre 2020 bis 2010.

Hinweis: Da die Lärmkosten noch nicht berechnet werden konnten, fehlen die Lärmkosten in der folgenden Übersicht für 2021 (Kapitel 19.1- 19.5). Um zu vermeiden, dass sie bei Vergleichen einen Einfluss haben, werden die Lärmkosten 2021 nach der alten Methode⁴¹⁸ berechnet und in dem Vergleich vor / nach Revision gleich gehalten (Kapitel 19.6). Die nach der alten Methode berechneten Lärmkosten werden ebenfalls in die Rückrechnung miteinbezogen (Kapitel 19.7).

19.1 Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende

19.1.1 Überblick Gesamtverkehr

Die Abbildung 19-1 und Abbildung 19-2 zeigen, dass der Verkehr aus Sicht Verkehrsteilnehmende insgesamt externe Kosten von 23.5 Mrd. CHF verursacht (wobei alle Internalisierungsbeiträge inkl. einem Teil der LSVA bereits abgezogen wurden, vgl. hierzu die folgende Box).

- Der Strassenverkehr verursacht den Grossteil dieser Kosten: 83% oder 19.5 Mrd. CHF (davon motorisierter privater Personenverkehr 14.5 Mrd. CHF, Güterverkehr 3.6 Mrd. CHF [ein Teil der LSVA wurde als Internalisierung angerechnet], Fuss- und Veloverkehr 0.8 Mrd. CHF und öffentlicher Strassenverkehr 0.5 Mrd. CHF).
- Der Luftverkehr verursacht knapp 10% oder 2.3 Mrd. CHF der externen Kosten.
- Der Schienenverkehr verursacht Kosten von 1.4 Mrd. CHF (oder 6%).
- Der Schiffsverkehr weist mit einem Betrag von 0.3 Mrd. CHF (1.3%) vergleichsweise geringe externe Kosten aus.

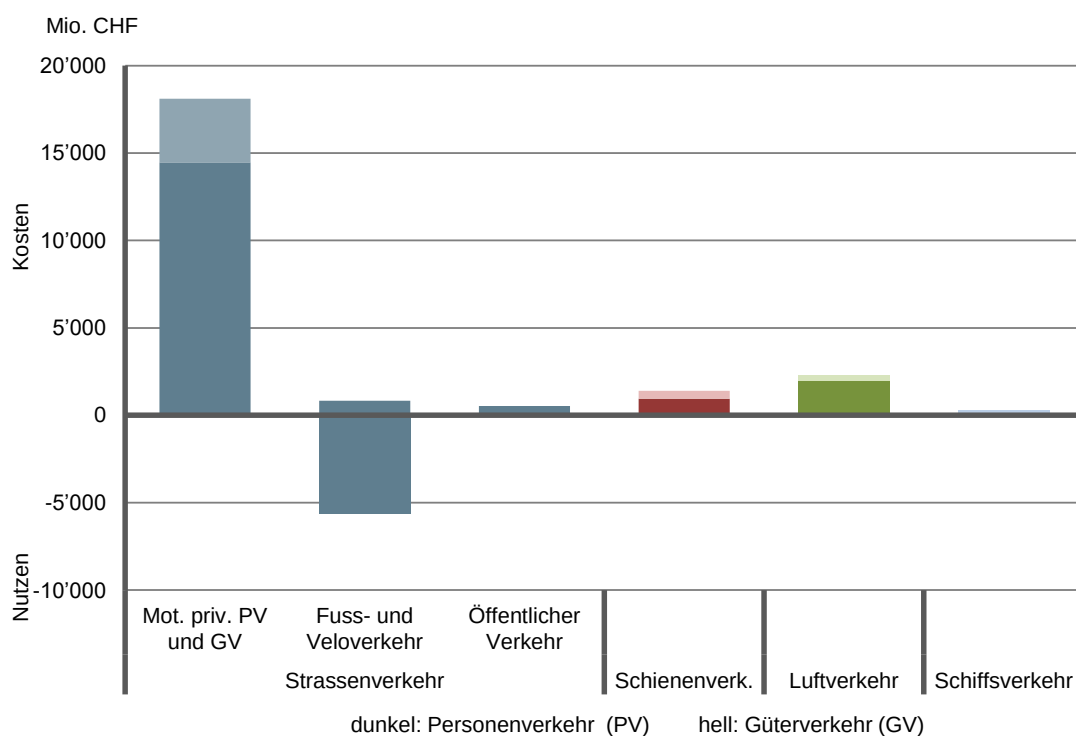
Im Fuss- und Veloverkehr fallen ausserdem externe Gesundheitsnutzen von 5.6 Mrd. CHF an. Zu beachten ist, dass die Verkehrsleistungen der einzelnen Verkehrsträger sehr unterschiedlich sind. Auf der Strasse werden deutlich mehr Personen- und Tonnenkilometer zurückgelegt als auf den anderen Verkehrsträgern, was ein wichtiger Grund für die höheren Kosten ist.

⁴¹⁸ Vgl. INFRAS und Ecoplan (2019)

Insgesamt werden 81% der externen Kosten durch den Personenverkehr verursacht und 19% durch den Güterverkehr. Im Strassenverkehr ist der Anteil des Personenverkehrs ebenfalls 81%. Im Luftverkehr ist der Anteil des Personenverkehrs mit 86% höher, im Schienen- und Schiffsverkehr hingegen mit 67% bzw. 46% tiefer. Die Gesundheitsnutzen fallen alle im Personenverkehr an.

Abbildung 19-1: Überblick über die externen Effekte* aus Sicht Verkehrsteilnehmende 2021

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip**, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip**



*

Kosten werden mit positiven Werten und Nutzen mit negativen Werten ausgewiesen

** Territorialitätsprinzip: Verkehr innerhalb Schweizer Grenzen (Ausnahme: Verletzte bei Unfällen im Strassenverkehr)

Halbstreckenprinzip: Verkehr innerhalb Schweizer Grenzen und halbe Flug- / Schiffstrecke von der Schweiz in die Auslandsdestination und umgekehrt (vgl. Kapitel 2.4.1)

Abbildung 19-2: Überblick über die externen Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende 2021

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

Externe Kosten in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr	15'842.6	3'633.2	19'475.8	83.0%
Schienenverkehr	944.0	461.9	1'405.9	6.0%
Luftverkehr	1'959.5	308.8	2'268.3	9.7%
Schiffsverkehr	139.2	162.2	301.4	1.3%
Total externe Kosten	18'885.3	4'566.1	23'451.4	100.0%
in % des Totals	80.5%	19.5%	100.0%	
Gesundheitsnutzen Fuss- und Veloverkehr	-5'617.2		-5'617.2	

Box: Umgang mit der LSVA beim Ausweis der externen Kosten

Die Darstellung der externen Kosten des Schwerverkehrs erfolgt in diesem Kapitel **nach** Abzug der LSVA (leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe).⁴¹⁹ Die Ergebnisse entsprechen somit einer Nettobetrachtung und zeigen auf, ob und wenn ja, in welcher Höhe noch ungedeckte externe Kosten des Schwerverkehrs in den betrachteten Kostenbereichen verbleiben, wenn die Internalisierungswirkung der LSVA berücksichtigt wird.⁴²⁰

Der Berechnungsvorgang zum Ausweis der verbleibenden externen Kosten des Schwerverkehrs ist wie folgt:

- In einem ersten Schritt werden die Einzelergebnisse zum Schwerverkehr in den Kapiteln 4 bis 14 nach den vier Fahrzeugkategorien ((schwere) Personenwagen, Gesellschaftswagen, Lastwagen, Sattelschlepper) aufsummiert.
- Hiervon werden in einem zweiten Schritt die anrechenbaren LSVA-Einnahmen abgezogen. Diese berechnen sich wie folgt:
 - Ausgangslage bilden die Einnahmen aus der LSVA und der Pauschalen Schwerverkehrsabgabe (PSVA) im Jahr 2021 von 1'611 Mio. CHF (Reinertrag). Davon werden einerseits 560 Mio. CHF abgezogen,⁴²¹ die in der Strassenrechnung als Einnahmen verbucht werden und deshalb hier nicht nochmals berücksichtigt werden dürfen (Vermeidung von Doppelzählungen). Andererseits sind auch die vom Schwerverkehr dem übrigen Verkehr verursachten Staukosten abzuziehen (gemäss Bundesgerichtsurteil): Diese betragen 495 Mio. CHF im Jahr 2021.⁴²² Damit verbleiben 556 Mio. CHF, die als Internalisierungsbeitrag zu berücksichtigen sind.⁴²³
 - Dieser Betrag wird nach folgendem Verfahren auf die vier Fahrzeugkategorien aufgeteilt: Den (schweren) Personenwagen (über 3.5t) bzw. den Gesellschaftswagen wird ein Anteil von 1.56% bzw. 0.52% zugerechnet (8.7 bzw. 2.9 Mio. CHF).⁴²⁴ Die übrigen Ein-

⁴¹⁹ In den Kapiteln 4 bis 14 wurde beim Ausweis der Kosten des Schwerverkehrs die LSVA noch nicht in Abzug gebracht, da – wie in Kapitel 3.2.2 erläutert – eine Zurechnung der LSVA-Einnahmen auf die einzelnen Kostenbereiche nicht direkt möglich ist. Erst nach der Aufsummierung aller Kostenbereiche lässt sich hier in der Schlussbetrachtung eine sinnvolle Gegenüberstellung zwischen den verursachten Kosten durch den Schwerverkehr und seinem durch die LSVA bereits geleisteten Internalisierungsbeitrag vornehmen.

⁴²⁰ Das Ergebnis lässt jedoch keine Rückschlüsse darüber zu, ob der Schwerverkehr sämtliche Kosten deckt, die er verursacht. Um diese Frage beurteilen zu können, muss zusätzlich die Über- oder Unterdeckung des Schwerverkehrs bei den Infrastrukturkosten (bzw. in der Kategorienrechnung der Strassenrechnung) berücksichtigt werden. Siehe das Faktenblatt des ARE für weitergehende Ausführungen dazu.

⁴²¹ Angaben BFS.

⁴²² Berechnung für 2021 durch das ARE basierend auf INFRAS; EBP (2022)

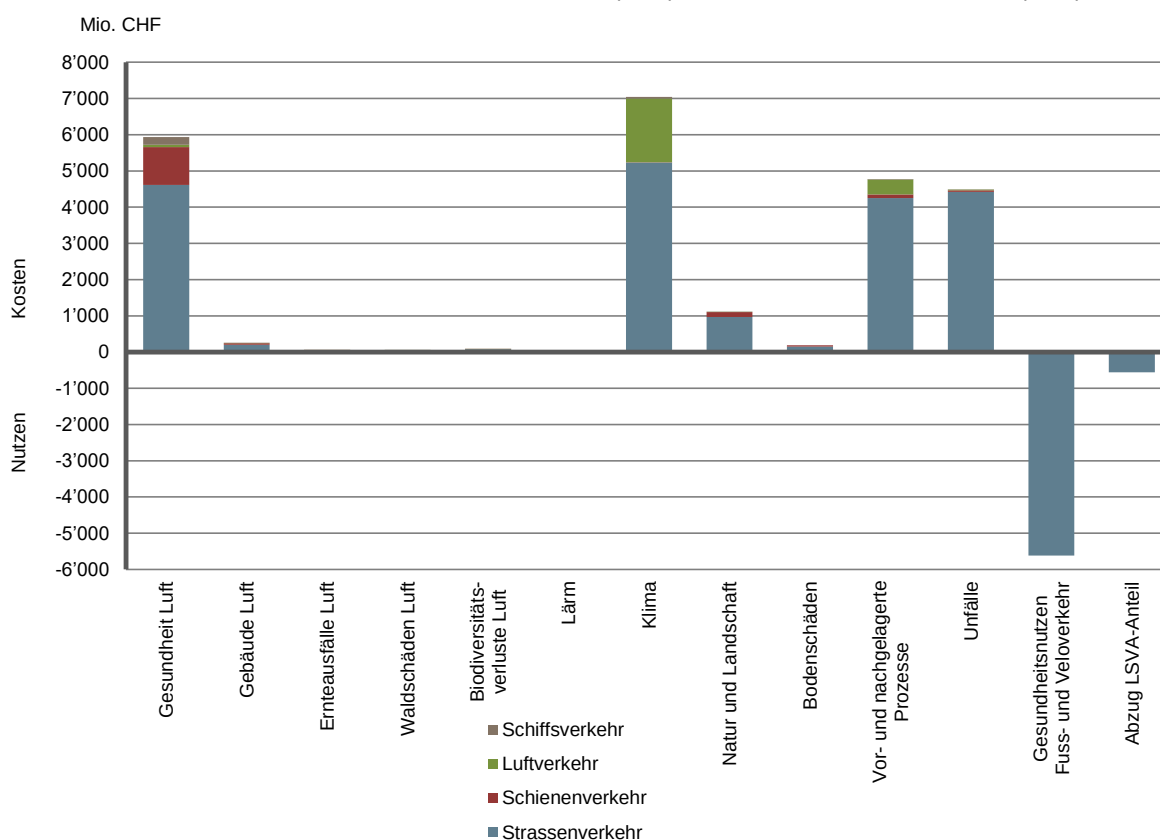
⁴²³ Die so ermittelte Höhe des Internalisierungsbeitrags von 556 Mio. CHF korrespondiert mit der Sicht Verkehrsart Schwerverkehr, die vom Bundesgericht für die Berechnung der externen Kosten des Schwerverkehrs bzw. der LSVA vorgeschrieben wurde. Aufgrund dieser Vorgabe wird dieser Internalisierungsbeitrag auch für die Sichtweise „Verkehrsteilnehmende“ verwendet.

⁴²⁴ Die Personen- und Gesellschaftswagen bezahlen die pauschale Schwerverkehrsabgabe (PSVA). Der Anteil der beiden Fahrzeugkategorien an den Gesamteinnahmen der Schwerverkehrsabgabe wurde vom BFS erhoben.

nahmen werden basierend auf einer Spezialauswertung der LSVA-Datenbank⁴²⁵ zu 52.4% den Lastwagen zugeordnet und zu 47.6% den Sattelschleppern (285 bzw. 259 Mio. CHF).

Die Abbildung 19-3 weist die Verteilung der gesamten externen Kosten und Nutzen auf die 12 Kostenbereiche aus. Folgende vier Kostenbereiche tragen massgeblich zum Total bei: Die Klimakosten, die Gesundheitskosten der Luftverschmutzung, die vor- und nachgelagerten Prozesse und die Unfallkosten verursachen je Kosten von 4.5 bis 7.0 Mrd. CHF. Im Bereich «Natur und Landschaft» entstehen weitere Kosten von ca. 1.1 Mrd. CHF. Alle übrigen Kostenbereiche liegen unter 0.3 Mrd. CHF. Von diesen Kosten abzuziehen ist die Internalisierung durch einen Teil der LSVA (0.6 Mrd. CHF, die nicht direkt auf die einzelnen Kostenbereiche aufgeteilt werden kann, negativer Wert). Im Fuss- und Veloverkehr entstehen zudem Gesundheitsnutzen in Höhe von 5.6 Mrd. CHF (in der Abbildung als negativen Betrag ausgewiesen).

Abbildung 19-3: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende 2021 nach Kostenbestandteilen
Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip



⁴²⁵ Die Aufteilung erfolgt dabei gemäss den geschätzten LSVA-Einnahmen (Fahrleistungen nach Gewichtsklassen und EURO-Kategorien * Tonnen zulässiges Gesamtgewicht nach Gewichtsklasse * LSVA-Abgabesatz nach EURO-Klassen).

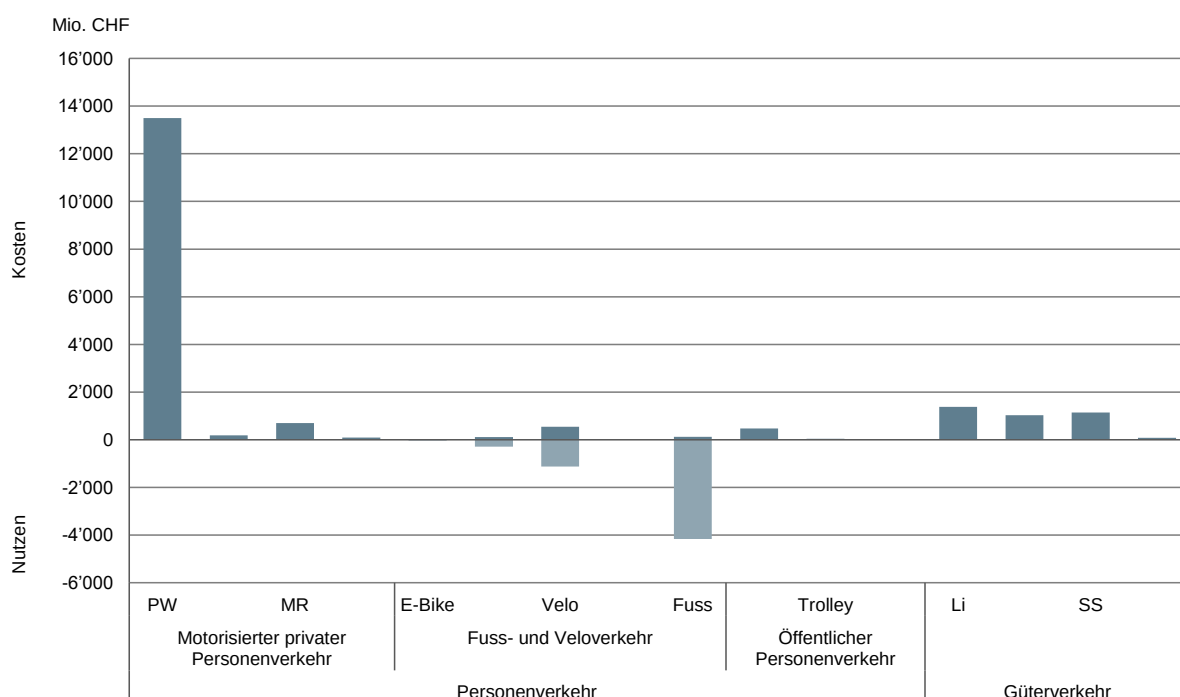
Innerhalb aller Kostenbereiche ist der Strassenverkehr aufgrund der hohen Verkehrsleistungen dominant und verursacht 74% bis 100% der Kosten. Die anderen Verkehrsträger sind vor allem bei folgenden Kostenbereichen relevant (und damit in Abbildung 19-3 erkennbar): Der Luftverkehr bei den Klimakosten sowie bei den vor- und nachgelagerten Prozessen, der Schienenverkehr bei den Gesundheitskosten der Luftverschmutzung und der Schiffsverkehr bei den Gesundheitskosten der Luftverschmutzung.

19.1.2 Strassenverkehr

a) Übersicht

Wie Abbildung 19-4 und Abbildung 19-5⁴²⁶ zeigen, sind die Personenwagen für den Grossteil (69% oder 13.5 Mrd. CHF) der externen Kosten im Strassenverkehr verantwortlich.

Abbildung 19-4: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Strassenverkehr 2021 nach Fahrzeugkategorien (nach Abzug LSVA und Gesundheitsnutzen, ohne Unfälle im Bereich Sport und Freizeit)



⁴²⁶ In der Abbildung 19-5 sowie den folgenden Abbildungen werden unten jeweils auch die Ergebnisse der externen Kosten aus Sicht Verkehrsart sowie die sozialen Kosten dargestellt (grau hinterlegt). Damit sollen alle relevanten Ergebnisse auf einen Blick erfasst werden können. Besprochen werden die anderen Ergebnisse aber erst in den nachfolgenden Kapiteln 19.2 und 19.3.

Abbildung 19-5: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Strassenverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen und Fahrzeugkategorien

Externe Kosten Strassenverkehr in Mio. CHF	Motorisierter privater Personenverkehr						Personenverkehr					Öffentlicher Personenverkehr					Güterverkehr				Gesamt- total
	PW	GW	MR	MoJa	E-Bike	Pedelec	Velo	faG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	Tr/Arbm					
Gesundheit Luft	3'007.5	60.0	50.9	43.1	2.1	8.6	-	-	-	212.0	19.9	8.1	340.8	271.2	591.9	k.W.	4616.1				
Gebäude Luft	132.1	2.6	2.2	1.9	0.1	0.4	-	-	-	9.2	0.9	0.4	14.8	11.8	25.8	k.W.	202.1				
Ernteaufälle Luft	32.9	0.6	0.5	0.0	-	-	-	-	-	2.1	-	-	9.4	4.5	2.3	k.W.	52.2				
Waldschäden Luft	31.2	0.6	0.4	0.0	-	-	-	-	-	1.9	-	-	8.7	4.1	2.1	k.W.	49.1				
Biodiversitätsverluste Luft	52.7	0.8	0.7	0.0	-	-	-	-	-	2.7	-	-	12.4	5.9	3.1	k.W.	78.2				
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.				
Klima	3'786.0	39.4	85.9	1.9	-	-	-	-	-	131.1	-	-	477.4	359.0	349.3	k.W.	5'229.9				
Natur und Landschaft	720.1	6.9	13.4	0.1	4.3	0.6	12.8	0.4	18.5	20.9	1.0	1.0	69.5	49.9	51.8	k.W.	971.4				
Bodenschäden	67.2	3.3	1.4	0.1	0.1	0.4	-	-	-	7.3	1.4	-	18.1	31.1	24.0	k.W.	154.5				
Vor- und nachgelagerte Prozesse	3'080.6	58.3	64.9	1.4	1.3	3.1	11.7	-	-	44.4	5.9	4.7	212.2	481.8	282.4	k.W.	4'252.7				
Unfälle	2'595.8	17.1	477.0	39.9	25.3	100.6	517.8	21.4	105.0	43.9	5.5	14.1	217.8	98.5	68.3	77.6	4'425.6				
Zwischentotal aller Kostenbereiche	13'506.1	189.6	697.3	88.3	33.2	113.7	542.3	21.8	123.5	475.5	34.5	28.3	1'381.2	1'317.8	1'400.9	77.6	20'031.6				
Abzug LSWA-Anteil	-8.7	-2.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-285.3	-259.0	-	-555.9				
Total aller Kostenbereiche (mit LSWA Abzug)	13'497.4	186.7	697.3	88.3	33.2	113.7	542.3	21.8	123.5	475.5	34.5	28.3	1'381.2	1'032.6	1'141.9	77.6	19'475.8				
in % des Gesamttotals	69.3%	1.0%	3.6%	0.5%	0.2%	0.6%	2.8%	0.1%	0.6%	2.4%	0.2%	0.1%	7.1%	5.3%	5.9%	0.4%	100.0%				
Total Teilbereiche (mit LSWA Abzug)	14'469.7						834.6	4.3%				538.3	2.8%				19'475.8				
in % des Gesamttotals	74.3%						4.3%										100.0%				
Gesamttotal Sicht Verkehrsteilnehmende	13'497.4	186.7	697.3	88.3	33.2	113.7	542.3	21.8	123.5	475.5	34.5	28.3	1'381.2	1'032.6	1'141.9	77.6	19'475.8				
Gesamttotal Sicht Verkehrsart	178.0													1'030.9	1'140.9		2'349.7				
Gesamttotal soziale Kosten	16'808.7	200.2	3'325.1	324.6	194.8	846.1	4'815.2	133.8	862.1	502.9	35.8	34.3	1'758.5	1'391.3	1'434.2	290.4	32'958.1				
Zusätzliche Effekte Fuss- und Veloverkehr																					
Unfälle Sport & Freizeit Sicht Verkehrsteilnehmende	-	-	-	-	-	-	42.8	79.4	296.5	-	-	-	-	-	-	-	418.6				
Externe Gesundheitsnutzen Sicht Verkehrsteilnehmende	-	-	-	-	-36.4	-283.0	-1'122.9	-	-4'164.9	-	-	-	-	-	-	-	-5'617.2				
Unfälle Sport & Freizeit soziale Kosten	-	-	-	-	-	-	471.5	874.3	3'047.9	-	-	-	-	-	-	-	4'393.7				
Sozialer Gesundheitsnutzen	-	-	-	-	-361.6	-3'025.8	-10'126.0	-	-43'247.8	-	-	-	-	-	-	-	-56'761.1				

PW = Personenvan, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, faG = fahrradähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lastwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelzugmaschine, Tr = Traktor, Arbm = Arbeitsmaschine, k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

Lieferwagen, Sattelschlepper und Lastwagen tragen je 7% bis 5% zum Total bei (wobei ein Teil der LSVA als Internalisierung angerechnet wird). Im Fuss- und Veloverkehr (inkl. Pedelecs, E-Bikes und fäG) entstehen externe Kosten von 0.83 Mrd. CHF (vor allem vom Fuss- und Veloverkehr verursachte Unfallkosten).⁴²⁷ Den externen Kosten des Fuss- und Veloverkehrs stehen externe Gesundheitsnutzen von 5.6 Mrd. CHF gegenüber. Aufgrund der hohen Gesundheitsnutzen kann im Fussverkehr ein externer Nutzenüberschuss von 4.0 Mrd. CHF erreicht werden. Auch im Veloverkehr können insgesamt externe Nutzen erzielt werden: Bei den Velos 0.58 Mrd. CHF, bei den Pedelecs 0.18 Mrd. CHF und bei den E-Bikes noch 0.003 Mrd. CHF. Motorräder und Busse tragen 3.6% bzw. 2.4% zum Total der externen Kosten bei. Die übrigen Fahrzeugkategorieen liegen alle unter 1%.

Bei der Aufteilung nach Kostenbereichen zeigt sich, dass 5.2 Mrd. CHF (27%) der externen Kosten auf Klimaschäden zurückzuführen sind. Die Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung belaufen sich auf 4.6 Mrd. CHF (24%), die Unfallkosten auf 4.4 Mrd. CHF (23%) und die Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse auf 4.3 Mrd. CHF (22%). Kosten von knapp 1.0 Mrd. CHF (5%) werden im Bereich Natur und Landschaft verursacht. Die übrigen Kostenbereiche tragen je 0.2 Mrd. CHF (1.0%) oder weniger zum Total bei. Von den Gesamtkosten abzuziehen ist ein Teil der LSVA von 0.6 Mrd. CHF (3%).⁴²⁸ Diesen Kosten stehen externe Gesundheitsnutzen von 5.6 Mrd. CHF gegenüber.

b) Differenzierung nach Antriebsarten

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Strassenverkehrs auf die verschiedenen Antriebsarten aufgeteilt. Diese Aufschlüsselung wird v.a. für die erwarteten Entwicklungen insbesondere bei der Elektromobilität in den nächsten Jahren von Interesse sein. Der Fuss- und Veloverkehr ist dabei nicht abgebildet, weil bei jedem Verkehrsmittel jeweils nur eine Antriebsart existiert (E-Bike und Pedelec wird elektrisch angetrieben die restlichen drei Kategorien mit Muskelkraft). Der Grossteil der Kosten der übrigen Fahrzeugkategorien entsteht durch fossil betriebene Fahrzeuge (98.3% oder 18.9 Mrd. CHF). Elektrofahrzeuge verursachen lediglich knapp 1.0% der Kosten (190 Mio. CHF) und die übrigen Antriebsarten vereinen noch 0.7% oder 138 Mio. CHF auf sich. Diese Aufteilung widerspiegelt die aktuell eingesetzte Fahrzeugflotte, deren Effizienz sowie deren Anteil am Verkehrsaufkommen.

Bei den Personenwagen werden 0.8% der Kosten durch Elektro-PW verursacht (0.85% von der Antriebsart «Rest», d.h. Plug-in-Hybrid (Benzin und Diesel), Brennstoffzelle, Gas und «Andere»). Der Anteil der Elektrofahrzeuge ist vor allem im ÖV hoch: Tram und Trolleybusse sind zu 100% elektrisch und auch Elektrobusse machen 1.1% aus, was mehr ist als bei allen anderen Fahrzeugkategorien. So sind im Güterverkehr lediglich 0.37% (Lieferwagen), 0.26% (Lastwagen) bzw. 0.13% (Sattelschlapper) der Kosten durch elektrisch angetriebene Fahrzeuge verursacht.

⁴²⁷ In dieser Zahl nicht enthalten sind zusätzliche Unfallkosten im Fuss- und Veloverkehr aus dem Bereich Sport und Freizeit von 0.42 Mrd. CHF, weil deren Einbezug von verschiedenen Abgrenzungsfragen abhängig ist.

⁴²⁸ Beim Fuss- und Veloverkehr können je nach Abgrenzung zusätzlich Unfallkosten im Bereich Sport und Freizeit von 0.4 Mrd. CHF addiert werden.

Wie weitere Auswertungen zeigen, ist der Anteil der Elektrofahrzeuge an den Kosten (über alle Verkehrsmittel zusammen) teilweise 0% – konkret in den Kostenbereichen Klima, sowie Ernteausschläge, Waldschäden und Biodiversitätsverluste. In den anderen Kostenbereichen liegt der Anteil der Elektrofahrzeuge zwischen 1.2% (Natur und Landschaft) und 1.6% (Bodenschäden).

Abbildung 19-6: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Strassenverkehr 2021: Aufteilung auf Antriebsarten und Fahrzeugkategorien (vor Abzug der LSVA)

in Mio. CHF	Personenverkehr							Güterverkehr				Gesamt- total
	Motorisierter privater Personenverkehr				Öffentlicher Personenverkehr			Li	LW	SS	Tr/Arbm	
	PW	GW	MR	Mofa	Bus	Trolley	Tram					
Fossil	13'282.6	189.3	693.7	88.3	461.1	-	-	1'372.1	1'310.4	1'393.7	77.6	18'869.0
Elektrisch	108.1	0.2	3.5	-	5.4	34.5	28.3	5.1	3.5	1.9	-	190.5
Rest	115.4	-	-	-	9.0	-	-	3.9	4.0	5.3	-	137.7
Total	13'506.1	189.6	697.3	88.3	475.5	34.5	28.3	1'381.2	1'317.8	1'400.9	77.6	19'197.1
Anteil Fossil	98.35%	99.87%	99.49%	100.00%	96.96%	-	-	99.35%	99.43%	99.49%	100.00%	98.29%
Anteil Elektrisch	0.80%	0.13%	0.51%	-	1.14%	100.00%	100.00%	0.37%	0.26%	0.13%	-	0.99%
Anteil Rest	0.85%	-	-	-	1.90%	-	-	0.29%	0.30%	0.38%	-	0.72%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tr = Traktor, Arbm = Arbeitsmaschine

c) Differenzierung nach Kantonen

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung der Kosten (ohne Gesundheitsnutzen) auf die Kantone, berechnet je nach Kostenbereich über kantonal differenzierte Emissionen oder (gewichtete) Fahrleistung der Fahrzeugkategorien (siehe Kapitel 20.1.4 und 20.1.5). Am meisten Kosten fallen in den Kantonen Zürich und Bern an (3.1 Mrd. CHF bzw. 2.4 Mrd. CHF). Über eine Milliarde Kosten entstehen auch in den Kantonen Waadt (2.0 Mrd. CHF), Aargau (1.8 Mrd. CHF), St. Gallen (1.4 Mrd. CHF), Tessin (1.1 Mrd. CHF) und Luzern (1.1 Mrd. CHF). Vergleicht man die Kostenanteile der Kantone mit dem Bevölkerungsanteil, fällt auf, dass in den Kantonen Zürich (-2.5%) und Genf (-1.9%) der Kostenanteil tiefer ist als der Bevölkerungsanteil, was auf eine hohe Bevölkerungsdichte und damit kurze Distanzen zurückzuführen sein könnte. Auch in Basel-Stadt beträgt diese Differenz 1.0% (Kostenanteil 1.3% bei einem Bevölkerungsanteil von 2.3%). In anderen Kantonen ist hingegen der Kostenanteil höher als der Bevölkerungsanteil (Tessin +1.6%, St. Gallen +1.3, Aargau +1.2%, und weitere unterhalb 0.5%). Zudem ist festzustellen, dass der Kanton Uri einen etwa 2.1-mal höheren Kostenanteil hat als einen Bevölkerungsanteil, was insbesondere auf den hohen Schwerverkehrsanteil bzw. den Transitverkehr zurückzuführen ist.

Abbildung 19-7: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Strassenverkehr 2021: Aufteilung auf Kantone und Fahrzeugkategorien (vor Abzug der LSVA, exkl. Gesundheitsnutzen, ohne Sport- und Freizeitunfälle)

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total	
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr		Li	LW	SS		
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	faG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)				Tram	
Zürich	2'055.7	31.7	107.6	19.2	7.2	24.7	104.4	4.1	23.2	88.2	11.3	203.2	194.7	207.2	3'082.6
Bern	1'658.5	24.1	88.6	10.2	3.9	13.2	64.5	2.4	13.5	52.9	3.0	168.4	157.7	168.7	2'429.5
Luzern	710.7	10.7	37.8	3.7	1.4	4.7	21.7	0.9	4.9	31.5	-	67.1	77.4	86.3	1'058.8
Uri	98.6	2.5	4.5	0.2	0.1	0.3	1.9	0.1	0.4	3.7	-	9.9	26.3	26.8	175.3
Schwyz	305.3	3.5	15.5	1.0	0.4	1.3	7.3	0.3	1.9	8.6	-	28.7	22.6	24.0	420.5
Obwalden	54.7	0.8	2.7	0.2	0.1	0.2	1.6	0.1	0.4	1.1	-	6.0	3.9	3.9	75.7
Nidwalden	80.6	1.6	3.6	0.3	0.1	0.4	1.9	0.1	0.5	1.9	-	9.8	13.4	14.1	128.4
Glarus	75.4	1.5	3.6	0.3	0.1	0.3	2.2	0.1	0.6	2.1	-	10.8	9.5	10.1	116.6
Zug	197.3	2.0	10.1	1.3	0.5	1.7	8.0	0.4	2.3	9.8	-	19.4	12.1	12.3	277.2
Freiburg	507.9	7.0	26.2	2.9	1.1	3.7	17.8	0.6	3.6	13.8	-	46.1	50.2	52.5	733.4
Solothurn	449.0	9.7	23.7	2.5	1.0	3.3	17.1	0.6	3.6	15.9	0.2	48.1	74.2	78.7	727.6
Basel-Stadt	151.8	2.3	8.0	2.5	0.9	3.2	16.7	0.7	4.0	15.8	5.1	11.3	15.3	18.6	256.4
Basel-Landschaft	422.3	7.6	21.0	3.1	1.2	3.9	19.7	0.7	4.2	14.4	2.9	49.3	58.2	61.6	670.1
Schaffhausen	97.4	1.2	5.6	0.6	0.2	0.8	4.6	0.2	1.2	5.9	-	9.4	8.0	9.4	144.6
Appenzell A.Rh.	71.6	0.6	4.5	0.5	0.2	0.6	2.9	0.1	0.5	2.2	-	6.7	2.7	3.3	96.3
Appenzell I.Rh.	17.0	0.2	1.1	0.1	0.0	0.1	0.9	0.0	0.1	0.2	-	1.7	0.8	0.9	23.1
St. Gallen	983.9	13.6	48.5	4.7	1.8	6.0	31.6	1.2	6.9	38.2	-	114.2	97.0	101.0	1'448.7
Graubünden	341.6	6.2	16.7	1.3	0.5	1.6	10.1	0.4	2.4	16.9	-	46.4	39.8	39.9	523.7
Aargau	1'226.6	18.6	64.6	5.9	2.2	7.7	37.1	1.5	8.4	39.8	-	129.9	147.2	158.6	1'848.1
Thurgau	446.4	5.7	25.1	2.1	0.8	2.7	15.0	0.6	3.2	10.0	-	40.1	38.8	43.8	634.3
Tessin	772.1	10.0	38.5	3.5	1.3	4.5	21.5	1.0	5.7	23.8	-	71.5	84.6	87.9	1'125.9
Vaud	1'399.2	15.6	64.6	9.1	3.4	11.7	52.8	2.2	12.5	35.2	1.5	145.2	106.9	108.5	1'968.4
Wallis	474.6	6.2	25.2	2.6	1.0	3.3	17.6	0.8	4.5	23.6	-	52.0	37.9	40.7	690.0
Neuenburg	251.6	2.1	12.3	1.5	0.6	2.0	10.5	0.6	3.2	9.5	0.3	24.8	12.4	13.4	344.8
Genf	530.6	3.4	31.0	8.4	3.2	10.8	48.9	1.9	10.9	41.7	4.1	52.6	18.5	20.5	786.5
Jura	125.8	1.3	6.5	0.5	0.2	0.7	4.0	0.2	0.9	3.1	-	8.5	7.8	8.1	167.6
Total	13'506.1	189.6	697.3	88.3	33.2	113.7	542.3	21.8	123.5	510.0	28.3	1'381.2	1'317.8	1'400.9	19'954.0

PW = Personwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Hinweis: Die Verteilung der Kosten pro Fahrzeugkategorie auf die Kantone erfolgte entweder über die fahrleistungsgewichteten Emissionsfaktoren der relevanten Schadstoffe (Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung, Klima, Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung, Biodiversitätsverluste, Ernteauffälle, Waldschäden) oder direkt über die (teilweise nach Strassentyp gewichteten) Fahrleistungen (vor- und nachgelagerte Prozesse, Natur und Landschaft, Unfälle, Bodenschäden).

d) Differenzierung nach Raumtypen

Für die Kostenbereiche Gesundheitskosten (4.6 Mrd. CHF) und Gebäudeschäden (0.2 Mrd. CHF) der Luftverschmutzung sowie später Lärm konnte die Differenzierung nach Raumtyp ermittelt werden (vgl. Kapitel 2.4.2). Ohne Berücksichtigung der Lärmkosten wird die Verteilung auf die Raumtypen von den Gesundheitskosten dominiert (vgl. Kapitel 4.7.1b): 55% der Kosten fallen in mitteldicht besiedelten Gebieten an, 24% in dicht besiedelten Gebieten und 21% in gering besiedelten Gebieten.

Eine analoge Verteilung findet sich auch beim motorisierten privaten Verkehr sowie im Güterverkehr wieder. Anders sind die Anteile von Mofas, E-Bikes und Pedelecs⁴²⁹, bei denen jeweils 45% in dicht und mitteldichten Gebieten anfallen, wobei die externen Kosten allerdings mit insgesamt

⁴²⁹ Für diese drei Fahrzeugkategorien wird für die Aufteilung dieselbe Datengrundlage verwendet, nämlich die Fahrzeugkategorie E-Bikes im Nationales Personenverkehrsmodell NPVM (vgl. Kapitel 20.1.4).

56 Mio. CHF sehr tief sind. Da der öffentliche Verkehr in dicht besiedelten Gebieten stärker ausgeprägt ist, fallen dort auch grössere Anteile an (42% bei den Bussen, 96% bei den Trams). Dies geht vor allem zulasten des Anteils in den gering besiedelten Gebieten (12% bei den Bussen, 0% bei den Trams).

Abbildung 19-8: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Strassenverkehr 2021: Aufteilung auf Raumtypen und Fahrzeugkategorien

in Mio. CHF	Motorisierter privater Personenverkehr				Personenverkehr					Öffentlicher Personenverkehr		Güterverkehr			Gesamttotal
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram	Li	LW	SS	
dicht besiedelt	757.2	13.6	13.0	20.3	1.0	4.0	-	-	-	100.7	8.1	83.7	55.5	121.2	1'178.5
mitteldicht besiedelt	1'705.3	34.7	28.6	20.4	1.0	4.0	-	-	-	112.7	0.3	205.6	162.0	353.1	2'627.7
gering besiedelt	677.0	14.2	11.5	4.3	0.2	0.9	-	-	-	28.6	-	66.4	65.5	143.3	1'012.0
Total	3'139.6	62.6	53.1	45.0	2.2	9.0	-	-	-	242.0	8.5	355.6	283.0	617.7	4'818.2
Anteil dicht besiedelt	24.1%	21.8%	24.6%	45.2%	45.2%	45.2%	-	-	-	41.6%	96.1%	23.5%	19.6%	19.6%	24.5%
Anteil mitteldicht besiedelt	54.3%	55.5%	53.9%	45.2%	45.2%	45.2%	-	-	-	46.6%	3.9%	57.8%	57.2%	57.2%	54.5%
Anteil gering besiedelt	21.6%	22.8%	21.6%	9.6%	9.6%	9.6%	-	-	-	11.8%	-	18.7%	23.2%	23.2%	21.0%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Hinweis: Die Verteilung der Kosten pro Fahrzeugkategorie auf die Kantone erfolgte entweder über die fahrleistungsgewichteten Emissionsfaktoren der relevanten Schadstoffe (Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung, Klima, Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung, Biodiversitätsverluste, Ernteaufschläge, Waldschäden) oder direkt über die (teilweise nach Strassentyp gewichteten) Fahrleistungen (vor- und nachgelagerte Prozesse, Natur und Landschaft, Unfälle, Bodenschäden).

19.1.3 Schienenverkehr

a) Übersicht

Im Schienenverkehr entstehen insgesamt externe Kosten von gut 1'400 Mio. CHF (siehe Abbildung 19-9). Der Personenverkehr ist für 944 Mio. CHF oder 67% verantwortlich, auf den Güterverkehr entfallen 462 Mio. CHF (33%). Von Dritten verursachte Unfallkosten im Umfang von 24 Mio. CHF, die nicht dem Schienenverkehr anzulasten sind, werden hier nicht dargestellt.

Im Schienenverkehr sind die Gesundheitskosten der Luftbelastung mit 74% des Totals am bedeutendsten, gefolgt von Natur und Landschaft mit 9% sowie vor- und nachgelagerten Prozessen mit 7%. Die übrigen Kostenbereiche tragen nur je 3% oder weniger zum Total bei.

Abbildung 19-9: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Schienenverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen

Externe Kosten in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Schienenverkehr			
Gesundheit Luft	706.5	333.7	1'040.2
Gebäude Luft	30.8	14.5	45.3
Ernteaussfälle Luft	0.2	0.6	0.8
Waldschäden Luft	0.2	0.6	0.8
Biodiversitätsverluste Luft	0.2	0.8	1.0
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	2.5	9.4	11.9
Natur und Landschaft	101.2	32.3	133.5
Bodenschäden	31.2	4.2	35.4
Vor- und nachgelagerte Prozesse	47.3	53.7	101.0
Unfälle	23.9	11.9	35.9
Total	944.0	461.9	1'405.9
in % des Gesamttotals	67.1%	32.9%	100.0%
Soziale Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten	959.4	470.0	1'429.3

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

b) Differenzierung nach Kantonen

In der folgenden Abbildung werden die externen Kosten des Schienenverkehrs verteilt auf die Kantone. Die höchsten externen Kosten werden mit 229 Mio. CHF im Kanton Bern verursacht, gefolgt von Zürich mit 203 Mio. CHF. Über 100 Mio. CHF werden in den Kantonen Aargau (163 Mio. CHF) und Waadt (126 Mio. CHF) erreicht.

Werden die Anteile der Kantone am Schweizer Total mit den Bevölkerungsanteilen verglichen, fällt Folgendes auf: Im Kanton Genf gibt es wenig Schienenverkehr (1.3% bei den externen Kosten versus 5.8% bei der Bevölkerung). Auch im Kanton Zürich ist der Schienenverkehr untervertreten (14.4% versus 17.9% – vor allem wenig Güterverkehr: 7.3%). Viel Schienenverkehr gibt es hingegen in den Kantonen Bern (16.3% versus 12.0%) und Aargau (11.6% versus 8.0% – vor allem aufgrund von 18.1% im Güterverkehr). Im Kanton Uri ist aufgrund des Transitverkehrs auf der Gotthardachse der Schienenverkehr 3.6-mal so wichtig wie der Bevölkerungsanteil (1.5% versus 0.4% – im Güterverkehr mit 3.0% gar Faktor 7.0). Und auch in den Kantonen Graubünden und Schwyz sind ca. 1.65-mal höhere Kostenanteile zu finden, als man von der Bevölkerung her erwarten würde.

Abbildung 19-10: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Schienenverkehr 2021: Aufteilung auf Kantone

	in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich		168.8	33.8	202.6
Bern		155.6	73.8	229.4
Luzern		40.2	5.4	45.6
Uri		7.5	13.8	21.3
Schwyz		24.4	18.7	43.0
Obwalden		4.5	0.0	4.5
Nidwalden		3.4	0.0	3.4
Glarus		6.4	1.9	8.3
Zug		12.0	4.2	16.2
Freiburg		32.4	4.0	36.5
Solothurn		30.9	33.2	64.1
Basel-Stadt		8.5	5.5	13.9
Basel-Landschaft		25.2	20.7	45.9
Schaffhausen		9.0	0.4	9.4
Appenzell A.Rh.		6.4	0.0	6.5
Appenzell I.Rh.		2.4	-	2.4
St. Gallen		53.7	13.0	66.6
Graubünden		36.0	18.1	54.0
Aargau		79.5	83.5	163.0
Thurgau		32.1	8.1	40.2
Tessin		31.3	46.7	77.9
Waadt		89.3	36.5	125.7
Wallis		41.5	22.6	64.1
Neuenburg		19.7	13.5	33.2
Genf		15.0	3.9	18.9
Jura		8.5	0.6	9.1
Total		944.0	461.9	1'405.9

c) Differenzierung nach Raumtypen

Bei der Aufteilung der externen Kosten des Schienenverkehrs auf die Raumtypen, fällt auf, dass wie im Strassenverkehr etwas mehr als die Hälfte (57%) in mitteldicht besiedelten Gebieten verursacht werden. Die restlichen Kosten werden fast zu gleichen Teilen in gering besiedelten Gebieten (22%) und dicht besiedelten Gebieten (21%) generiert. Im Personenverkehr gibt es eine leichte Verschiebung hin zu dicht besiedelten Räumen (25% statt 21%), dafür fallen die Anteile in mitteldicht besiedelten Gebieten (-3% gegenüber dem Total) und gering besiedelten Gebieten (-1%) etwas tiefer aus. Im Güterverkehr werden die dicht besiedelten Gebiete tendenziell umfahren

(13%, d.h. –8% gegenüber dem Total), so dass die Kostenverursachung im mitteldicht besiedelten Gebiet (63%, d.h. +6%) und im gering besiedelten Gebiet (24%, d.h.+2%) höher ausfällt.

Abbildung 19-11: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Schienenverkehr 2021: Aufteilung auf Raumtypen

in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
dicht besiedelt	182.9	44.9	227.8
mitteldicht besiedelt	400.72	221.11	621.8
gering besiedelt	153.7	82.2	235.9
Total	737.3	348.2	1'085.5
Anteil dicht besiedelt	24.8%	12.9%	21.0%
Anteil mitteldicht besiedelt	54.4%	63.5%	57.3%
Anteil gering besiedelt	20.8%	23.6%	21.7%

19.1.4 Luftverkehr

Im Luftverkehr betragen die Kosten insgesamt 2.3 Mrd. CHF, wobei 86% oder 2.0 Mrd. CHF vom Personenverkehr verursacht werden und 0.3 Mrd. CHF vom Güterverkehr (siehe Abbildung 19-12). Im Luftverkehr sind die Klimakosten mit 77% des Totals der klar dominierende Kostenbereich. Daneben resultieren 18% von vor- und nachgelagerten Prozessen und 3% von den Gesundheitskosten der Luftverschmutzung. Die übrigen Kostenbereiche tragen je weniger als 1% zum Total bei (bzw. zusammen weniger als 1.6%).

Aus der Abbildung 19-12 nicht ablesbar ist, dass 97% dieser Kosten oder 2.2 Mrd. CHF durch Flüge ab / nach Landesflughäfen verursacht werden und nur 3% oder 76 Mio. CHF durch Flüge ab / nach Regionalflughäfen (Flugfelder und Heliports werden hier nicht betrachtet). Der Linien- und Charterverkehr ist für 93% der Kosten verantwortlich (50% durch den europäischen bzw. 42.5% durch den interkontinentalen Linien- und Charterverkehr). Der Rest wird verursacht durch die Business Aviation (4% oder 94 Mio. CHF), die Helikopter (0.1% oder 1.2 Mio. CHF) sowie den Rest der General Aviation (3% oder 74 Mio. CHF).

Abbildung 19-12: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Luftverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen

Externe Kosten in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Luftverkehr			
Gesundheit Luft	60.6	6.1	66.6
Gebäude Luft	2.6	0.3	2.9
Ernteaussfälle Luft	1.3	0.2	1.4
Waldschäden Luft	1.2	0.2	1.4
Biodiversitätsverluste Luft	1.7	0.2	1.9
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	1'518.2	238.9	1'757.1
Natur und Landschaft	6.6	0.8	7.3
Bodenschäden	-	-	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	346.3	61.6	407.9
Unfälle	21.2	0.7	21.8
Total	1'959.5	308.8	2'268.3
in % des Gesamttotals	86.4%	13.6%	100.0%
Soziale Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten	1'991.7	310.2	2'301.8

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

19.1.5 Schiffsverkehr

Im Schiffsverkehr entstehen insgesamt externe Kosten (aus Sicht Verkehrsteilnehmende) von 301 Mio. CHF (siehe Abbildung 19-13). Dabei entfallen 46% oder 139 Mio. CHF auf den Personenverkehr auf den Schweizer Seen und Flüssen und 54% oder 162 Mio. CHF auf den Güterverkehr. Innerhalb des Güterverkehrs verursacht die Rheinschifffahrt unterhalb Basel 111 Mio. CHF Kosten (nach dem Halbstreckenprinzip), der Güterverkehr auf den Schweizer Seen knapp die Hälfte davon (51 Mio. CHF).

Der Schiffsverkehr verursacht vor allem durch seine hohen Luftschadstoffemissionen hohe Kosten: 71% durch Gesundheitskosten und weitere 7% durch die weiteren vier Kostenbereiche durch Luftschadstoffe. Daneben entstehen 15% der Kosten durch Klimagase und 5% durch vor- und nachgelagerte Prozesse.

Abbildung 19-13: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Schiffsverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen

Externe Kosten in Mio. CHF Schiffsverkehr	Personenverkehr	Güterverkehr	Güterverkehr		Total
			Rhein	Übrige	
Gesundheit Luft	103.6	111.2	71.8	39.4	214.8
Gebäude Luft	4.5	4.8	3.1	1.7	9.3
Ernteaufschläge Luft	1.5	2.3	1.8	0.5	3.8
Waldschäden Luft	1.4	2.1	1.7	0.4	3.5
Biodiversitätsverluste Luft	1.9	2.9	2.3	0.6	4.8
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	23.1	21.7	13.6	8.1	44.8
Natur und Landschaft	0.9	4.6	4.5	0.1	5.4
Bodenschäden	-	-	-	-	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	2.0	11.8	11.6	0.2	13.8
Unfälle	0.2	0.8	0.8	0.0	1.0
Total	139.2	162.2	111.3	51.0	301.4
in % des Gesamttotals	46.2%	53.8%	36.9%	16.9%	100.0%
Soziale Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten	139.7	163.9	112.8	51.1	303.6

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

19.2 Soziale Effekte

19.2.1 Überblick Gesamtverkehr

Im Folgenden werden die sozialen Kosten und Nutzen der im vorliegenden Bericht untersuchten Bereiche dargestellt. Dabei werden zusätzlich zu den externen Effekten auch die privaten Kosten und Nutzen in den untersuchten Bereichen miteinbezogen, d.h. insbesondere auch alle in diesen Bereichen beim Verursacher anfallenden Kosten und Nutzen. Durch den Einbezug der privaten Kosten und Nutzen gibt es zwei grosse Veränderungen:

- Die privaten **Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr** werden miteinbezogen: Dank der Bewegung im Fuss- und Veloverkehr erhöht sich die Lebenserwartung und die Zahl der Spitalaufenthalte verringert sich. Zusätzlich zu den 5.6 Mrd. CHF externe Nutzen betragen die privaten Nutzen 51.1 Mrd. CHF (hauptsächlich immaterielle Nutzen von 49.4 Mrd. CHF sowie um 1.7 Mrd. CHF höhere vermiedene Produktionsausfälle und um 0.1 Mrd. CHF höhere vermiedene sonstige medizinische Kosten).
- Die privaten **Unfallkosten** sind zu berücksichtigen: Diese betragen 12.83 Mrd. CHF (davon 12.78 Mrd. CHF im Strassenverkehr) und bestehen zu 80% ebenfalls aus immateriellen Kosten, ein grosser Kostenblock sind aber auch die Sachschäden (13%), welche die Unfallverursacher bzw. ihre Haftpflichtversicherungen bezahlen müssen.

Neben diesen beiden Haupteffekten sind die **Internalisierungsbeiträge** zu beachten. Bei der Ermittlung der externen Kosten wurden Internalisierungsbeiträge abgezogen. Zur Ermittlung der sozialen Kosten dürfen diese nicht abgezogen werden. Sie bestehen aus einem Teil der LSVA (556

Mio. CHF), den Internalisierungen im Klimabereich (149 Mio. CHF, davon 147 Mio. CHF im Strassenverkehr) und den emissionsabhängigen Landegebühren im Luftverkehr (2 Mio. CHF).

Das Total der sozialen Effekte liegt bei 37.0 Mrd. CHF (vgl. Abbildung 19-14 und Abbildung 19-15). Der Strassenverkehr ist unter anderem aufgrund der hohen Verkehrsleistungen und der hohen Unfallkosten für 89% dieser Kosten verantwortlich (33.0 Mrd. CHF). Allerdings muss der Strassenverkehr differenziert betrachtet werden: Der motorisierte Privatverkehr verursacht soziale Kosten von 20.7 Mrd. CHF, der Güterverkehr 4.9 Mrd. CHF und der öffentliche Strassenverkehr 0.6 Mrd. CHF. Im Fuss- und Veloverkehr entstehen einerseits Kosten von 6.9 Mrd. CHF und andererseits Nutzen von 56.8 Mrd. CHF, so dass ein sozialer Nutzenüberschuss von 49.9 Mrd. CHF resultiert. Der Luftverkehr verursacht soziale Kosten von 2.3 Mrd. CHF (6%), der Schienenverkehr solche von 1.4 Mrd. CHF (4%) und der Schiffsverkehr 0.3 Mrd. CHF (0.8%). Nur im Strassenverkehr liegen die sozialen Kosten somit deutlich über den externen Kosten.

Abbildung 19-14: Überblick über die sozialen Effekte 2021

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

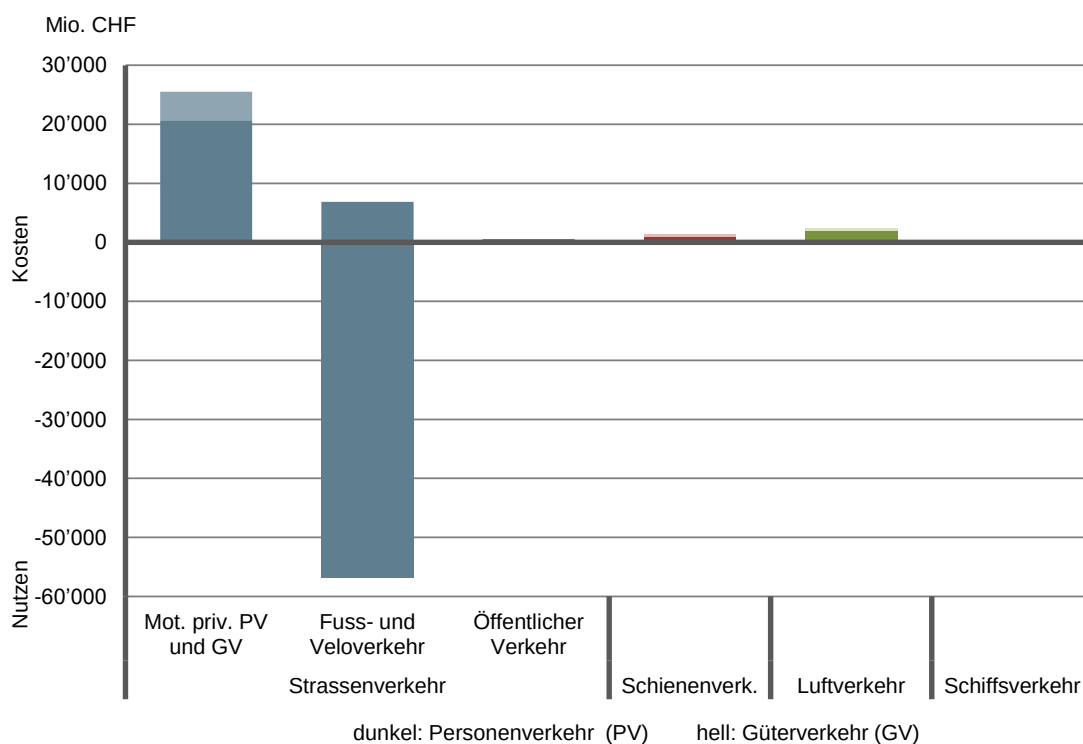


Abbildung 19-15: Überblick über die sozialen Effekte 2021

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

Soziale Kosten in Mio. CHF	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total	in % des Totals
Strassenverkehr	28'083.7	4'874.5	32'958.1	89.1%
Schienenverkehr	959.4	470.0	1'429.3	3.9%
Luftverkehr	1'991.7	310.2	2'301.8	6.2%
Schiffsverkehr	139.7	163.9	303.6	0.8%
Total soziale Kosten	31'174.3	5'818.5	36'992.8	100.0%
in % des Totals	84.3%	15.7%	100.0%	
Gesundheitsnutzen Fuss- und Veloverkehr	-56'761.1		-56'761.1	

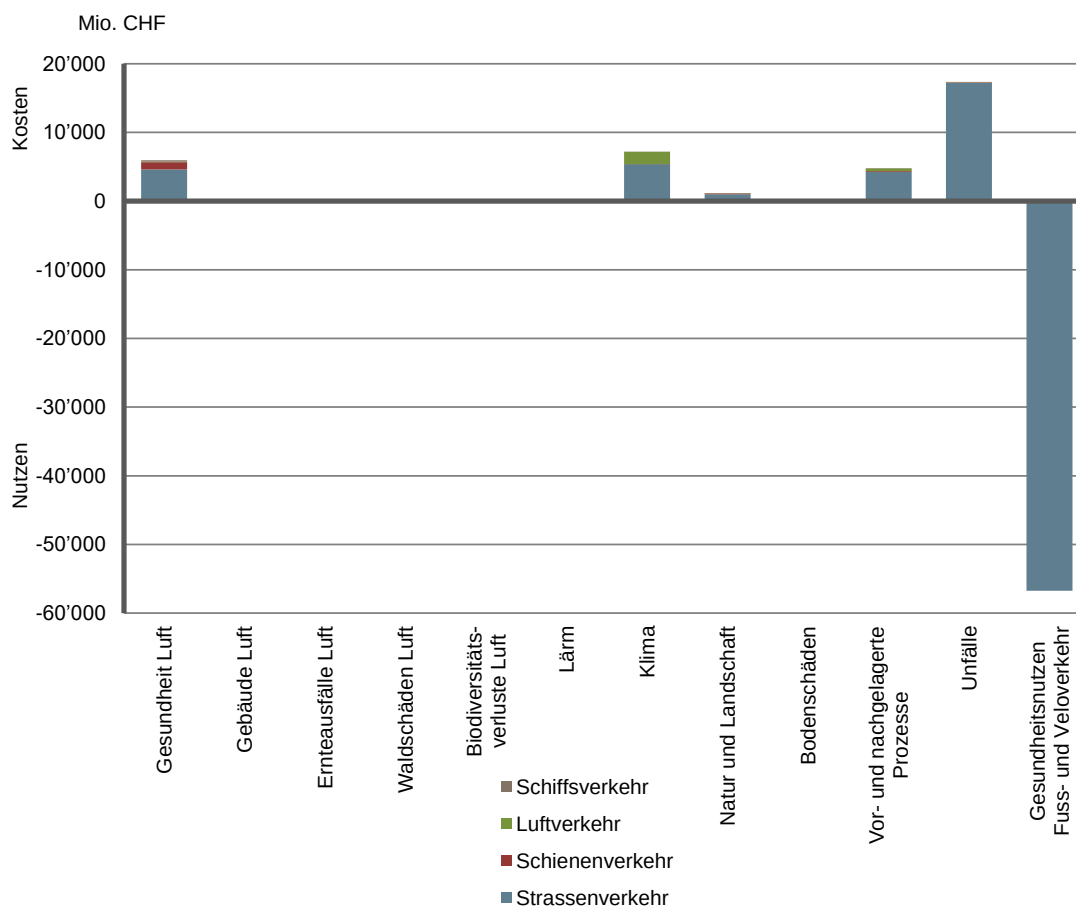
Insgesamt werden 84% der sozialen Kosten durch den Personenverkehr verursacht und 16% durch den Güterverkehr. Der Anteil des Personenverkehrs liegt damit leicht höher als bei den externen Kosten, weil im Strassenverkehr die Unfallkosten vor allem durch den Personenverkehr verursacht werden. Bei den anderen drei Verkehrsträgern ist der Anteil des Personenverkehrs praktisch identisch zu den Anteilen bei den externen Kosten (Schienenverkehr 67%, Luftverkehr 87%, Schiffsverkehr 46%, maximal 0.2% Differenz), weil die sozialen und die externen Kosten für diese drei Verkehrsträger fast gleich sind. Die hohen Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr sind dem Personenverkehr zuzurechnen.

Die Abbildung 19-16 zeigt die Beiträge der 12 Kostenbereiche an die sozialen Kosten des Verkehrs auf. Dabei stechen die beiden Haupteffekte Unfälle mit 17 Mrd. CHF (47% der Kosten ohne Gesundheitsnutzen) und Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr mit –57 Mrd. CHF sofort ins Auge. Speziell zu erwähnen sind zudem die Klimakosten mit 7.2 Mrd. CHF (19%), die Gesundheitskosten der Luftverschmutzung mit 5.9 Mrd. CHF (16%) und die vor- und nachgelagerten Prozesse mit 4.8 Mrd. CHF (13%). Im Bereich Natur und Landschaft entstehen Kosten von 1.1 Mrd. CHF (3%). Die übrigen Kostenbereiche sind in der Abbildung kaum mehr erkennbar, da sie unter 0.26 Mrd. CHF (0.7%) liegen.

Der Strassenverkehr nimmt vor allem aufgrund der hohen Verkehrsleistungen bei allen untersuchten Kostenbereichen eine dominante Rolle ein. Die Beiträge der anderen Verkehrsträger sind in der Abbildung nur beim Klima, bei den Gesundheitskosten der Luftverschmutzung und bei den vor- und nachgelagerten Prozessen noch knapp erkennbar.

Abbildung 19-16: Soziale Effekte 2021 nach Kostenbestandteilen

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip



19.2.2 Strassenverkehr

a) Übersicht

Abbildung 19-17 und Abbildung 19-18 zeigen die grossen Unterschiede zwischen den Fahrzeugkategorien des Strassenverkehrs: Die Personenwagen verursachen 16.8 Mrd. CHF soziale Kosten. Auffallend ist der Fuss- und Veloverkehr, bei dem die sozialen Nutzen durch Bewegung anfallen: Die sozialen Gesundheitsnutzen sind mit 56.8 Mrd. CHF deutlich höher als die durch den Fuss- und Veloverkehr verursachten Unfallkosten von 6.8 Mrd. CHF (und die geringen übrigen Kosten in den anderen untersuchten Kostenbereichen von insgesamt 0.05 Mrd. CHF). Selbst wenn zusätzlich die sozialen Kosten der Sport- und Freizeitunfälle einbezogen werden, die in Abbildung 19-17 nicht enthalten sind und sich auf insgesamt 4.4 Mrd. CHF summieren, ergeben sich die folgenden Nettonutzen: Im Fussverkehr 39.3 Mrd. CHF (ohne Sport- und Freizeitunfälle 42.4 Mrd. CHF), im Veloverkehr 4.8 (5.3) Mrd. CHF, für Pedelecs 2.2 Mrd. CHF (keine Sport- und Freizeitunfälle bei Pedelecs und E-Bikes) und für E-Bikes 0.2 Mrd. CHF.

Bei den übrigen Fahrzeugkategorien weisen die Motorräder mit 3.3 Mrd. CHF die grössten sozialen Kosten auf, gefolgt von den Lieferwagen, Sattelschleppern und Lastwagen mit 1.8, 1.4 bzw. 1.4 Mrd. CHF.

Abbildung 19-17: Soziale Effekte im Strassenverkehr 2021 nach Fahrzeugkategorien (inkl. Gesundheitsnutzen, exkl. Sport- und Freizeitunfälle)

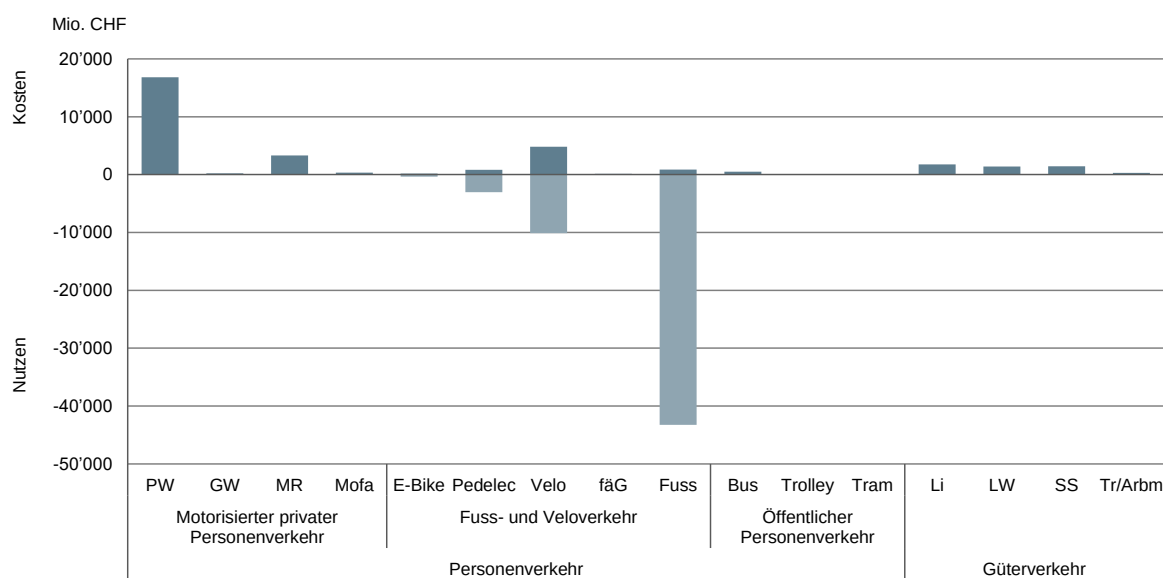


Abbildung 19-18: Soziale Effekte im Strassenverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen und Fahrzeugkategorien

Soziale Kosten Strassenverkehr in Mio. CHF	Personenverkehr										Güterverkehr				Gesamt total								
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr						Öffentlicher Personenverkehr												
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS	Tr/Arbm							
Gesundheit Luft	3'007.5	60.0	50.9	43.1	2.1	8.6	-	-	-	212.0	19.9	8.1	340.8	271.2	591.9	-	4'816.1						
Gebäude Luft	132.1	2.6	2.2	1.9	0.1	0.4	-	-	-	9.2	0.9	0.4	14.8	11.8	25.8	-	202.1						
Ernteaussfälle Luft	32.9	0.6	0.5	0.0	-	-	-	-	-	2.1	-	-	9.4	4.5	2.3	-	52.2						
Waldschäden Luft	31.2	0.6	0.4	0.0	-	-	-	-	-	1.9	-	-	8.7	4.1	2.1	-	49.1						
Biodiversitätsverluste Luft	52.7	0.8	0.7	0.0	-	-	-	-	-	2.7	-	-	12.4	5.9	3.1	-	78.2						
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.						
Klima	3'893.7	40.3	87.6	1.9	-	-	-	-	-	133.9	-	-	496.3	366.5	356.7	-	5'377.0						
Natur und Landschaft	720.1	6.9	13.4	0.1	4.3	0.6	12.8	0.4	18.5	20.9	1.0	1.0	69.5	49.9	51.8	-	971.4						
Bodenschäden	67.2	3.3	1.4	0.1	0.1	0.4	-	-	-	7.3	1.4	-	18.1	31.1	24.0	-	154.5						
Vor- und nachgelagerte Prozesse	3'080.6	58.3	64.9	1.4	1.3	3.1	11.7	-	-	44.4	5.9	4.7	212.2	481.8	282.4	-	4'252.7						
Unfälle	5'790.6	26.9	3'103.1	276.1	186.9	833.1	4'790.7	133.3	843.6	68.5	6.8	20.1	576.3	164.4	94.2	290.4	17'204.9						
Total	16'808.7	200.2	3'325.1	324.6	194.8	846.1	4'815.2	133.8	862.1	502.9	35.8	34.3	1'758.5	1'391.3	1'434.2	290.4	32'958.1						
Total Teilbereiche	20'658.6				6'852.0				573.0				4'874.5				32'958.1						
in % des Gesamttotals				62.7%				20.8%				2%				14.8%				100.0%			
Zusätzliche Effekte Fuss- und Veloverkehr																							
Unfälle Sport & Freizeit soziale Kosten	-	-	-	-	-	-	471.5	874.3	3'047.9	-	-	-	-	-	-	-	4'393.7						
Sozialer Gesundheitsnutzen	-	-	-	-	-361.6	-3'025.8	-10'126.0	-	-43'247.8	-	-	-	-	-	-	-	-56'761.1						

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahzeuagähmliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Liefervagen, LW = Lastvagen, SS = Sattelstlepper, Tr = Traktor, Arbm = Arbeitsmaschine, k.W. = keine Werte (kostenbereich nicht berechnet)

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tr = Traktor, Arbm = Arbeitsmaschine, k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

b) Differenzierung nach Antriebsarten

Die Verteilung der sozialen Kosten nach Antriebsarten sieht ähnlich aus wie bei den externen Kosten (wie in Kapitel 19.1.2b) ohne Fuss- und Veloverkehr), mit minimal höherem Anteil der fossilen Antriebsarten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den sozialen Kosten die Motorräder und Mofas aufgrund der hohen Unfallkosten eine grössere Bedeutung haben und bei diesen der Anteil der fossilen Fahrzeuge höher ist. Denn bei den Fahrzeugkategorien PW, Motorrad, Lieferwagen und Bus nimmt der Kostenanteil der fossilen Fahrzeuge gegenüber den externen Kosten meist leicht ab, während der Anteil der Elektrofahrzeuge zunimmt.

Abbildung 19-19: Soziale Kosten im Strassenverkehr 2021: Aufteilung auf Antriebsarten und Fahrzeugkategorien

in Mio. CHF	Personenverkehr							Güterverkehr				Gesamt- total
	Motorisierter privater Personenverkehr				Öffentlicher Personenverkehr			Li	LW	SS	Tr/Arbm	
	PW	GW	MR	Mofa	Bus	Trolley	Tram					
Fossil	16'515.4	199.9	3'305.8	324.6	487.6	-	-	1'745.7	1'383.5	1'426.8	290.4	25'679.7
Elektrisch	144.6	0.3	19.4	-	5.8	35.8	34.3	7.5	3.6	1.9	-	253.2
Rest	148.7	-	-	-	9.6	-	-	5.3	4.3	5.4	-	173.2
Total	16'808.7	200.2	3'325.1	324.6	502.9	35.8	34.3	1'758.5	1'391.3	1'434.2	290.4	26'106.1
Anteil Fossil	98.26%	99.87%	99.42%	100.00%	96.94%	-	-	99.27%	99.44%	99.49%	100.00%	98.37%
Anteil Elektrisch	0.86%	0.13%	0.58%	-	1.16%	100.00%	100.00%	0.42%	0.26%	0.13%	-	0.97%
Anteil Rest	0.88%	-	-	-	1.90%	-	-	0.30%	0.31%	0.38%	-	0.66%

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, Tr = Traktor, Arbm = Arbeitsmaschine

c) Differenzierung nach Kantonen

Die folgende Abbildung zeigt die Aufteilung der sozialen Kosten (ohne Gesundheitsnutzen) auf die Kantone. Die höchsten Kosten entstehen im Kanton Zürich mit 5.3 Mrd. CHF, gefolgt von den Kantonen Bern (4.0 Mrd. CHF), Waadt (3.1 Mrd. CHF), Aargau (2.9 Mrd. CHF) und St. Gallen (2.2 Mrd. CHF).

Vergleicht man die Kostenanteile der Kantone mit dem Bevölkerungsanteil, so liegt der Kostenanteil in den meisten Kantonen bei $\pm 0.3\%$ des Bevölkerungsanteils. Die Ausnahmen sind die Kantone Zürich (-1.6%), Genf (-0.8%), Basel-Stadt (-0.6%) und Wallis (-0.6%) auf der einen Seite sowie Tessin (+1.2%), St. Gallen (+0.9%) und Aargau (+0.8%) auf der anderen Seite. Auffallend ist zudem der Kanton Uri, der aufgrund des hohen Transitverkehrs einen um 70% höheren Kostenanteil (0.7%) trägt als er einen Bevölkerungsanteil (0.4%) hat.

Abbildung 19-20: Soziale Effekte im Strassenverkehr 2021: Aufteilung auf Kantone und Fahrzeugkategorien (exkl. Gesundheitsnutzen, ohne Sport- und Freizeitunfälle)

	Personenverkehr										Güterverkehr			Gesamt- total	
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr				Öffentlicher Personenverkehr		Li	LW	SS		
in Mio. CHF	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus (inkl. Trolley)	Tram				
Zürich	2'569.5	33.5	517.0	70.6	42.4	184.2	927.3	25.1	161.9	93.1	13.7	260.9	207.3	211.6	5'318.3
Bern	2'085.2	25.6	428.8	37.6	22.6	98.1	572.5	14.6	94.3	55.9	3.7	216.2	167.7	172.7	3'995.6
Luzern	892.8	11.4	183.1	13.5	8.1	35.2	192.6	5.3	34.4	33.3	-	86.5	81.9	88.6	1'666.8
Uri	118.4	2.6	20.0	0.9	0.5	2.4	16.8	0.4	2.8	3.9	-	12.3	27.1	27.5	235.5
Schwyz	378.2	3.7	73.5	3.7	2.2	9.6	64.6	2.1	13.6	9.1	-	36.4	23.9	24.6	645.4
Obwalden	66.9	0.8	12.4	0.7	0.4	1.8	14.1	0.4	2.9	1.2	-	7.8	4.2	4.0	117.6
Nidwalden	96.0	1.7	15.7	1.1	0.6	2.8	17.2	0.6	3.7	2.0	-	11.9	13.9	14.4	181.6
Glarus	91.7	1.6	16.5	1.0	0.6	2.5	19.9	0.6	4.1	2.3	-	13.1	10.1	10.4	174.2
Zug	244.9	2.1	48.0	4.9	2.9	12.7	71.0	2.5	15.8	10.4	-	25.2	12.8	12.6	465.7
Freiburg	632.1	7.3	125.0	10.5	6.3	27.5	158.2	3.9	24.8	14.6	-	57.6	52.8	53.8	1'174.6
Solothurn	562.6	10.2	114.2	9.3	5.6	24.4	152.2	3.9	25.2	16.8	0.2	61.6	78.0	80.6	1'144.8
Basel-Stadt	190.8	2.5	39.3	9.2	5.5	24.0	148.5	4.3	27.6	16.7	6.2	15.0	16.2	18.9	524.7
Basel-Landschaft	520.2	8.0	98.7	11.3	6.8	29.4	174.9	4.5	29.2	15.3	3.5	62.4	60.9	63.0	1'088.1
Schaffhausen	125.3	1.3	28.0	2.4	1.4	6.2	40.7	1.3	8.6	6.2	-	12.7	8.6	9.7	252.4
Appenzell A.Rh.	95.0	0.6	23.3	1.8	1.1	4.8	25.4	0.5	3.2	2.3	-	9.2	3.0	3.4	173.7
Appenzell I.Rh.	22.6	0.2	5.6	0.4	0.2	1.1	7.6	0.2	1.0	0.2	-	2.3	0.9	0.9	43.2
St. Gallen	1'207.9	14.3	226.1	17.2	10.3	44.8	280.3	7.4	48.0	40.3	-	140.9	101.8	103.3	2'242.8
Graubünden	418.2	6.6	77.2	4.7	2.8	12.2	89.9	2.6	16.7	17.8	-	58.4	42.4	40.8	790.2
Aargau	1'535.9	19.6	311.0	21.9	13.1	57.0	329.1	9.1	58.8	42.0	-	163.9	154.0	162.7	2'878.2
Thurgau	570.0	6.1	123.9	7.8	4.7	20.3	132.9	3.4	22.2	10.6	-	52.2	41.4	45.1	1'040.6
Tessin	951.5	10.5	181.0	12.8	7.7	33.3	191.3	6.2	39.7	25.1	-	90.3	88.1	89.8	1'727.2
Waadt	1'686.0	16.3	290.7	33.5	20.1	87.2	468.7	13.5	87.1	37.2	1.8	180.3	112.1	110.9	3'145.3
Wallis	595.9	6.6	121.8	9.4	5.6	24.5	156.5	4.9	31.7	25.0	-	67.7	40.8	41.8	1'132.2
Neuenburg	308.5	2.3	57.5	5.7	3.4	14.8	93.3	3.5	22.3	10.1	0.3	31.8	13.1	13.7	580.1
Genf	686.3	3.6	156.0	30.9	18.6	80.7	434.5	11.8	76.2	44.1	4.9	70.6	19.9	20.9	1'658.9
Jura	156.4	1.4	30.7	1.9	1.1	4.8	35.2	1.0	6.4	3.3	-	11.1	8.4	8.3	270.0
Total	16'808.7	200.2	3'325.1	324.6	194.8	846.1	4'815.2	133.8	862.1	538.8	34.3	1'758.5	1'391.3	1'434.2	32'667.7

PW = Personewagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, faG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

d) Differenzierung nach Raumtypen

Die Verteilung der sozialen Kosten nach Raumtyp für die Kostenbereiche Gesundheitskosten und Gebäudeschäden der Luftverschmutzung sowie später Lärm ist genau identisch zur Aufteilung bei den externen Kosten (vgl. Kapitel 19.1.2d), weil es bei den betrachteten Kostenbereichen im Strassenverkehr keine Unterschiede gibt zwischen den externen und den sozialen Kosten.

19.2.3 Schienenverkehr

a) Übersicht

Im Schienenverkehr fallen im Vergleich zu den externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende die Unfallkosten des Personen- und Güterverkehrs um 23 Mio. CHF höher aus. Zudem werden hier auch die von Dritten verursachten Unfälle von 76 Mio. CHF miteinbezogen, so dass die gesamten Unfallkosten 135 Mio. CHF betragen. Die von Dritten verursachten Unfallkosten sind jedoch nicht dem Schienenverkehr anzulasten (und wurden deshalb in Abbildung 19-15 nicht ausgewiesen). Zudem sind die sozialen Klimakosten um 0.2 Mio. CHF höher als die externen Kosten. In den übrigen Bereichen sind soziale und externe Kosten identisch. Insgesamt betragen die im Schienenverkehr anfallenden sozialen Kosten 1'505 Mio. CHF. Auf den Personenverkehr entfallen

960 Mio. CHF (64%), auf den Güterverkehr 470 Mio. CHF (31%) und auf Dritte 76 Mio. CHF (5%, siehe Abbildung 19-21).

Im Schienenverkehr sind die Gesundheitskosten der Luftbelastung mit 69% des Totals klar am bedeutsamsten, gefolgt von den Unfallkosten mit 9%, Natur und Landschaft mit ebenfalls 9% sowie vor- und nachgelagerten Prozessen mit 7%. Die übrigen Kostenbereiche tragen nur je 3% oder weniger zum Total bei.

Abbildung 19-21: Soziale Kosten im Schienenverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen

Soziale Kosten in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Dritte	Total
Schieneverkehr				
Gesundheit Luft	706.5	333.7	-	1'040.2
Gebäude Luft	30.8	14.5	-	45.3
Ernteaufälle Luft	0.2	0.6	-	0.8
Waldschäden Luft	0.2	0.6	-	0.8
Biodiversitätsverluste Luft	0.2	0.8	-	1.0
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	2.5	9.6	-	12.2
Natur und Landschaft	101.2	32.3	-	133.5
Bodenschäden	31.2	4.2	-	35.4
Vor- und nachgelagerte Prozesse	47.3	53.7	-	101.0
Unfälle	39.2	19.9	75.9	135.0
Total	959.4	470.0	75.9	1'505.2
in % des Gesamttotals	63.7%	31.2%	5.0%	100.0%

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

b) Differenzierung nach Kantonen und Raumtypen

Da bei den räumlichen Differenzierungen die von Dritten verursachten Unfallkosten weggelassen werden, fallen die sozialen Kosten um lediglich 23 Mio. CHF höher aus als die externen Kosten. Deshalb sind die Anteile der Kantone am Schweizer Total praktisch gleich wie bei den externen Kosten (maximale Abweichung 0.03 Prozentpunkte). Deshalb verzichten wir auf weitere Erläuterungen und verweisen auf die Beschreibung der externen Effekte in Kapitel 19.1.2c).

Abbildung 19-22: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende im Schienenverkehr 2021: Aufteilung auf Kantone

	in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Zürich		171.2	34.3	205.5
Bern		158.1	75.1	233.2
Luzern		40.8	5.5	46.3
Uri		7.6	14.1	21.7
Schwyz		24.8	19.0	43.8
Obwalden		4.6	0.0	4.6
Nidwalden		3.4	0.0	3.4
Glarus		6.5	1.9	8.4
Zug		12.2	4.3	16.5
Freiburg		33.0	4.1	37.1
Solothurn		31.4	33.8	65.2
Basel-Stadt		8.6	5.5	14.1
Basel-Landschaft		25.6	21.0	46.7
Schaffhausen		9.2	0.4	9.6
Appenzell A.Rh.		6.5	0.0	6.6
Appenzell I.Rh.		2.4	-	2.4
St. Gallen		54.6	13.2	67.7
Graubünden		36.7	18.4	55.1
Aargau		80.8	85.0	165.8
Thurgau		32.6	8.3	40.9
Tessin		31.8	47.5	79.3
Waadt		90.7	37.1	127.8
Wallis		42.3	23.1	65.4
Neuenburg		20.0	13.7	33.7
Genf		15.2	3.9	19.2
Jura		8.7	0.6	9.3
Total		959.4	470.0	1'429.3

Auf die Darstellung der **Differenzierung nach Raumtypen** kann **verzichtet** werden, da für die betrachteten Kostenbereiche (Gesundheitskosten und Gebäudeschäden der Luftverschmutzung sowie später Lärm) die externen und sozialen Kosten genau identisch sind (vgl. Abbildung 19-11).

19.2.4 Luftverkehr

Im Luftverkehr liegen die sozialen Kosten um rund 34 Mio. CHF höher als die externen Kosten, was auf höhere Unfallkosten (+31 Mio. CHF) sowie die wegfallenden Internalisierungen der Luftverschmutzungs- und Klimakosten von 2.4 bzw. 0.4 Mio. CHF zurückzuführen ist. Das Total der sozialen Kosten liegt gerundet immer noch bei 2.3 Mrd. CHF. Davon werden 87% oder 2.0 Mrd.

CHF vom Personenverkehr verursacht und 13% oder 0.3 Mrd. CHF vom Güterverkehr (siehe Abbildung 19-23). Weiterhin dominieren die Klimakosten das Ergebnis (76%), gefolgt von den vor- und nachgelagerten Prozessen mit 18%. Die übrigen Kostenbereiche machen nur noch je 3% oder weniger aus.

Abbildung 19-23: Soziale Effekte im Luftverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen

Soziale Kosten in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Luftverkehr			
Gesundheit Luft	62.7	6.3	69.0
Gebäude Luft	2.6	0.3	2.9
Ernteaussfälle Luft	1.3	0.2	1.4
Waldschäden Luft	1.2	0.2	1.4
Biodiversitätsverluste Luft	1.7	0.2	1.9
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	1'518.6	238.9	1'757.5
Natur und Landschaft	6.6	0.8	7.3
Bodenschäden	-	-	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	346.3	61.6	407.9
Unfälle	50.7	1.8	52.5
Total	1'991.7	310.2	2'301.8
in % des Gesamttotals	86.5%	13.5%	100.0%

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

Rund 2.2 Mrd. Mio. CHF (96%) werden durch Flüge ab / nach Landesflughäfen verursacht und 92 Mio. CHF (4%) bei Flügen ab / nach Regionalflughäfen. Der Linien- und Charterverkehr ist für 91% der Kosten verantwortlich, wobei 42% auf interkontinentale Flüge entfallen und 50% auf europäische. Business Aviation verursacht Kosten von 109 Mio. CHF (5%), Helikopter 2.5 Mio. CHF (0.1%) und auf den Rest der General Aviation entfallen 84 Mio. CHF (4%).

19.2.5 Schiffsverkehr

Im Schiffsverkehr sind die sozialen Kosten nur geringfügig höher als die externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende: Die Unfallkosten fallen um 1.3 Mio. CHF höher aus und die Klimakosten um 0.9 Mio. CHF. Die sozialen Kosten betragen somit 304 Mio. CHF (siehe Abbildung 19-24). An den Verteilungen innerhalb des Schiffsverkehrs ändert sich damit nur wenig (vgl. Kapitel 19.1.5).

Abbildung 19-24: Soziale Effekte im Schiffsverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen

Soziale Kosten in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	davon		Total
Schiffsverkehr			Rhein	Übrige	
Gesundheit Luft	103.6	111.2	71.8	39.4	214.8
Gebäude Luft	4.5	4.8	3.1	1.7	9.3
Ernteauffälle Luft	1.5	2.3	1.8	0.5	3.8
Waldschäden Luft	1.4	2.1	1.7	0.4	3.5
Biodiversitätsverluste Luft	1.9	2.9	2.3	0.6	4.8
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	23.6	22.1	14.0	8.2	45.7
Natur und Landschaft	0.9	4.6	4.5	0.1	5.4
Bodenschäden	-	-	-	-	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	2.0	11.8	11.6	0.2	13.8
Unfälle	0.3	2.0	2.0	0.0	2.3
Total	139.7	163.9	112.8	51.1	303.6
in % des Gesamttotals	46.0%	54.0%	37.2%	16.8%	100.0%

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

19.3 Externe Effekte aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr

Die Sicht Verkehrsart Schwerverkehr und deren Auslegung wurde vom Bundesgericht zur Bestimmung der Höhe der LSVA im Strassenverkehr vorgeschrieben.⁴³⁰ Mit dieser Sichtweise werden die Kosten bestimmt, die der Schwerverkehr den anderen Verkehrsteilnehmenden und der Allgemeinheit (inkl. Staat) auferlegt.

Vor Abzug der LSVA-Einnahmen betragen die externen Kosten des Schwerverkehrs aus Sicht Verkehrsart 2.9 Mrd. CHF (siehe Abbildung 19-25). Sie sind damit um 11 Mio. CHF tiefer als aus Sicht Verkehrsteilnehmende. Dieser Unterschied ist vollständig auf die Unfallkosten (-11 Mio. CHF) zurückzuführen, bei denen die von einem Schwerverkehrsfahrzeug einem anderen Schwerverkehrsfahrzeug verursachten Unfallkosten aus Sicht Verkehrsart als privat betrachtet werden und somit abgezogen werden. Diesen externen Kosten gegenüber steht ein Teil der LSVA-Einnahmen von 0.5 Mrd. CHF (siehe Exkurs in Kap. 16.1.1), der einen Internalisierungsbeitrag an die externen Umwelt- und Unfallkosten darstellt. Die verbleibenden Umwelt- und Unfallkosten des Schwerverkehrs aus Sicht Verkehrsart belaufen sich somit auf 2.3 Mrd. CHF.⁴³¹ Von den 2.3 Mrd. CHF werden 49% von Sattelschleppern verursacht, 44% von Lastwagen und 8% von Gesellschaftswagen.

⁴³⁰ Bundesgericht, Urteil vom 17. Dezember 2011, LSVA, Abklassierung EURO-3.

⁴³¹ Wie erwähnt lässt dieser Betrag alleine keine Rückschlüsse darüber zu, ob die Höhe der LSVA so bemessen wurde, dass die Kosten des Schwerverkehrs abgedeckt werden. Diese Frage lässt sich nur mit Einbezug der Infrastrukturkosten (bzw. der Über- oder Unterdeckung des Schwerverkehrs in der Kategorienrechnung der Strassenrechnung) klären (vgl. hierzu auch die Erläuterung in Fussnote 420 auf S. 407).

Abbildung 19-25: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsart Schwerverkehr im Strassenverkehr 2021 nach Kostenbestandteilen und Fahrzeugkategorien

Externe Kosten Sicht Verkehrsart Strassenverkehr	Gesellschafts- wagen	Lastwagen	Sattelschlepper	Total Schwerverkehr
Gesundheit Luft	60.0	271.2	591.9	923.1
Gebäude Luft	2.6	11.8	25.8	40.2
Ernteaussfälle Luft	0.6	4.5	2.3	7.3
Waldschäden Luft	0.6	4.1	2.1	6.8
Biodiversitätsverluste Luft	0.8	5.9	3.1	9.7
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	39.4	359.0	349.3	747.7
Natur und Landschaft	6.9	49.9	51.8	108.7
Bodenschäden	3.3	31.1	24.0	58.4
Vor- und nachgelagerte Prozesse	58.3	481.8	282.4	822.5
Unfälle	8.4	96.8	67.3	172.5
Zwischentotal aller Kostenbereiche	180.9	1'316.1	1'399.9	2'896.9
Abzug LSVA-Anteil	-2.9	-285.3	-259.0	-547.2
Total aller Kostenbereiche (mit LSVA Abzug)	178.0	1'030.9	1'140.9	2'349.7

k.W. = keine Werte (Kostenbereich nicht berechnet)

19.4 Externe und soziale Effekte pro Leistungseinheit

19.4.1 Datengrundlagen

Schliesslich sollen noch die externen bzw. sozialen Effekte pro Leistungseinheit (d.h. pro Fahrzeugkilometer Fzkm, Personenkilometer pkm, Tonnenkilometer tkm und Zugkilometer Zugkm) bestimmt werden. Dabei basieren die Daten für die Höhe der externen und sozialen Effekte des Verkehrs auf den vorangehenden Zusammenstellungen in diesem Kapitel. Für die Leistungseinheiten wurden grundsätzlich folgende Quellen verwendet:

- Strassen- und Schienenverkehr: Datengrundlagen des BFS
- Luftverkehr: Spezialauswertung des BAZL nach dem Halbstreckenprinzip
- Schiffsverkehr: Angaben des BFS und aus der Studie zum Schiffsverkehr⁴³²

Für die Kostenbereiche Gesundheits- sowie Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung erfolgt die Umrechnung auf die Fahr- und Verkehrsleistung im Strassen- und Schienenverkehr jeweils auf den Inputmengen, die dem Berechnungsmodell (Schadstoffausbreitungsmodell) zugrunde liegen.⁴³³

⁴³² IRENE; Ecosys (2013b)

⁴³³ Der Input in diese Modelle basiert zwar auch auf publizierten Angaben des BFS. Allerdings wurden in den letzten Jahren die Fahr- und Verkehrsleistungen verschiedentlich vom BFS an neue Erkenntnisse angepasst, so dass die ursprünglich verwendeten Inputdaten für die Berechnungsmodelle (Schadstoffausbreitung) nicht mehr mit den aktuellen Daten des BFS für 2021 übereinstimmen.

19.4.2 Strassenverkehr

a) Effekte pro Fahrzeugkilometer

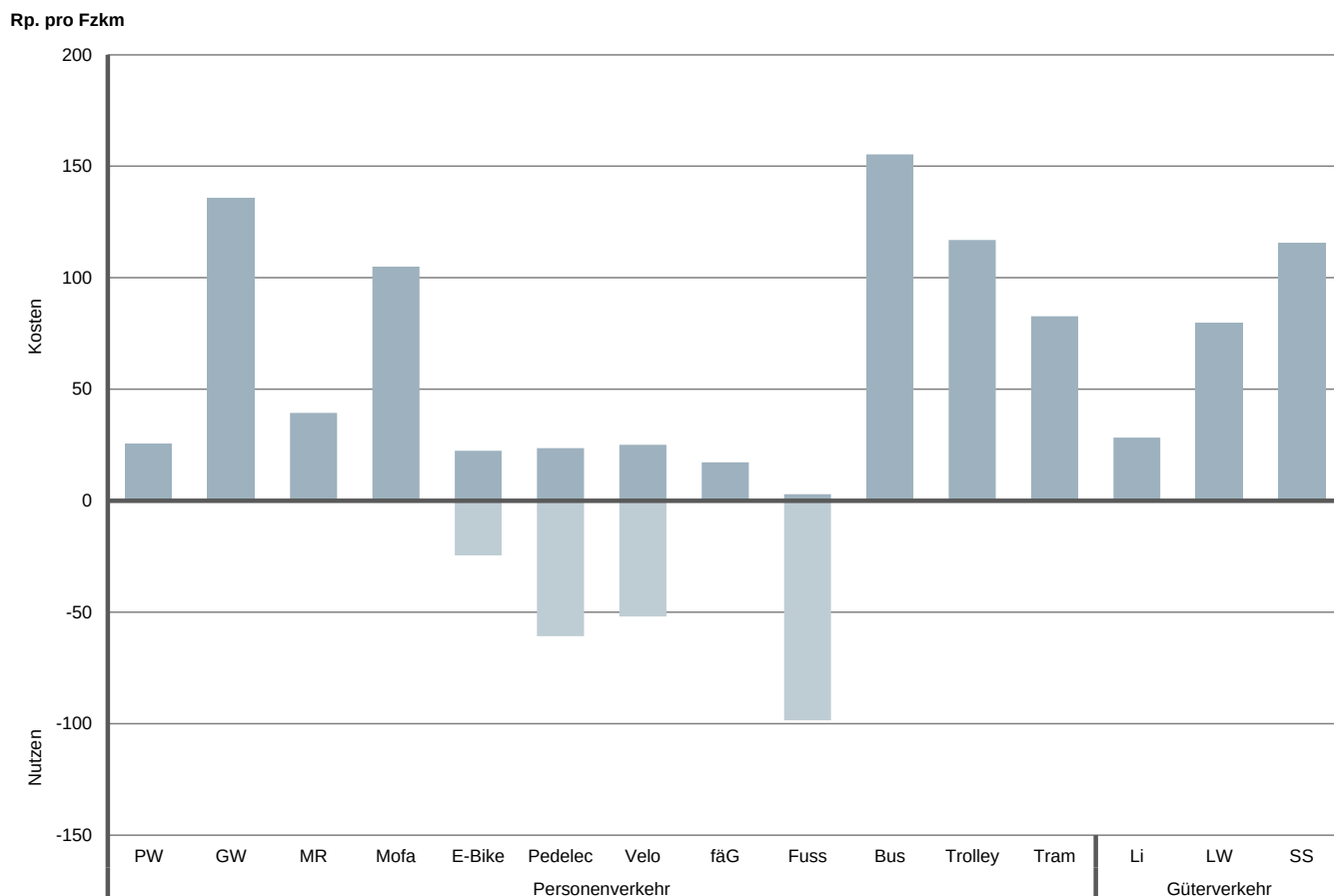
Die Kosten pro Fzkm sind wenig überraschend besonders in den grossen Fahrzeugkategorien hoch, insbesondere bei ÖV-Bussen mit 155 Rappen (Rp) / Fzkm und Sattelschleppern mit 141 Rp / Fzkm (wird ein Teil der LSVA als Internalisierungsbeitrag angerechnet, sinken die Kosten jedoch auf 115 Rp / Fzkm – siehe Abbildung 19-26 und Abbildung 19-27). Danach folgen die mit 138 Rp / Fzkm die Gesellschaftswagen (nach Abzug LSVA 136 Rp / Fzkm), die Trolleybusse mit 117 Rp / Fzkm, die Mofas mit 105 Rp / Fzkm und die Lastwagen mit 102 Rp / Fzkm (nach Abzug LSVA 80 Rp / Fzkm). Bei den Personenwagen belaufen sich die externen Kosten auf 26 Rp / Fzkm, die Lieferwagen liegen mit 28 Rp / Fzkm etwas höher. Bei Motorrädern fallen die Kosten mit 39 Rp / Fzkm höher aus, was wie bei den Mofas auf die hohen Unfallkosten zurückzuführen ist. Diese sind bei den Mofas noch höher, zudem kommen bei den Mofas noch hohe Gesundheitskosten der Luftverschmutzung dazu.

Beim Fussverkehr sind die externen Nutzen von 98 Rp / km deutlich höher als die externen Kosten mit 3 Rp / km, so dass ein Nettonutzen von 96 Rp / km resultiert (inkl. Unfallkosten im Bereich Sport und Freizeit noch 89 Rp / km). Auch im Veloverkehr werden Nettonutzen erzielt, die bei Velos 27 Rp / Fzkm ausmachen (25 Rp / Fzkm inkl. Sport und Freizeitunfälle), bei den Pedelegs 37 Rp / Fzkm und bei den E-Bikes 2 Rp / Fzkm, d.h. bei den E-Bikes heben sich positive und negative externe Effekte gegenseitig beinahe auf. Es mag überraschen, dass die Pedelegs mit 61 Rp / Fzkm einen grösseren Gesundheitsnutzen erreichen als die Velos mit 52 Rp / Fzkm, obwohl bei den Pedelegs eine Tretunterstützung zur Verfügung steht und die körperliche Aktivität damit geringer wird. Der Grund ist, dass Pedelegs eher von älteren Personen gefahren werden, Velos eher von Jungen. Die Gesundheitsnutzen sind aber bei älteren Personen deutlich grösser als bei jüngeren.⁴³⁴ Deshalb sind Aussagen wie «Pedelegs sind gesünder als Velos» unbedingt zu vermeiden, da solche Aussagen falsch sind. Korrekt ist hingegen, dass Pedelec-NutzerInnen stärker profitieren als Velofahrende, da sie älter sind und im Durchschnitt weniger Sport betreiben. D.h. ihr Grundrisiko für Sterblichkeit und Krankheiten ist deutlich höher und somit der positive Effekt des Velofahrens auch entsprechend höher – dies trotz der geringeren sportlichen Intensität auf Pedelegs. Bei den fäG sind die Kosten mit 17 Rp / Fzkm positiv. Werden zudem die Unfallkosten im Bereich Sport und Freizeit addiert, steigen die Kosten auf 80 Rp / Fzkm. Bei den fäG lassen sich die Gesundheitsnutzen nicht abziehen, da dazu keine Datengrundlagen vorliegen.

Die externen Kosten aus **Sicht Verkehrsart** Schwerverkehr liegen pro Fzkm nur geringfügig tiefer als aus Sicht Verkehrsteilnehmende (vgl. unten in Abbildung 19-27): Beim Güterschwerverkehr macht es nur je 0.1 Rp / Fzkm aus, bei den Gesellschaftswagen beträgt die Reduktion 6 Rp / Fzkm, womit die Kosten der Gesellschaftswagen noch bei 129 Rp / Fzkm liegen.

⁴³⁴ Dabei muss man sich auf einem Pedelec weniger anstrengen, so dass die Nutzen kleiner sein müssten. Würde man alterskorrigierte Nutzen berechnen, wäre das der Fall.

Abbildung 19-26: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende pro Fahrzeugkilometer im Strassenverkehr 2021 (nach Abzug LSVA)



Bei den **sozialen Kosten** zeigen sich deutliche Unterschiede zu den externen Effekten aus Sicht Verkehrsteilnehmende: Aufgrund der hohen Unfallkosten liegen die sozialen Kosten von Motorrädern und Mofas fast 5-mal höher als die externen Kosten, d.h. bei 189 Rp / Fzkm bzw. 486 Rp / Fzkm. Bei den Personenwagen und Lieferwagen steigen die Kosten um 25% bzw. 27% auf 32 bzw. 36 Rp / Fzkm. Auch bei den Trams ist eine Zunahme um 21% auf 100 Rp / Fzkm zu verzeichnen. Bei den übrigen Fahrzeugkategorien beträgt die Zunahme 2% bis 6% – ausser im Fuss- und Veloverkehr: Denn beim Fuss- und Veloverkehr machen die Unfallkosten einen Grossteil der Kosten aus und nehmen deutlich zu, wenn die privaten Unfallkosten miteinbezogen werden. So nehmen die gesamten Kosten um den Faktor 6 bis 9 zu und erreichen 20 Rp / km (Fussgänger) bis 223 Rp / Fzkm (Velos). Aber die sozialen Gesundheitsnutzen sind ca. um den Faktor 10 höher als die externen Nutzen und betragen im Fussverkehr über 1'000 Rp / km (d.h. 10 CHF / km). Auch bei den (Elektro-) Velos fallen hohe soziale Gesundheitsnutzen an (244 bis 627 Rp / Fzkm), so dass für alle (Elektro-) Velos der Nettonutzen (Gesundheitsnutzen – Kosten) klar positiv ist.

Abbildung 19-27: Externe und soziale Effekte pro Fahrzeugkilometer im Strassenverkehr 2021

Externe Effekte pro Fzkm Strassenverkehr	Personenverkehr										Güterverkehr				
	Motorisierter privater Personenverkehr				Fuss- und Veloverkehr						Öffentlicher Personenverkehr				
	PW	GW	MR	Mofa	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS
Rp. pro Fzkm															
Gesundheit Luft	5.4	44.4	2.7	33.6	1.4	1.8	-	-	-	70.6	67.3	23.8	7.1	21.4	60.5
Gebäude Luft	0.2	1.9	0.1	1.5	0.1	0.1	-	-	-	3.1	2.9	1.0	0.3	0.9	2.6
Ernteaussfälle Luft	0.1	0.4	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.7	-	-	0.2	0.3	0.2
Waldschäden Luft	0.1	0.4	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.6	-	-	0.2	0.3	0.2
Biodiversitätsverluste Luft	0.1	0.6	0.0	0.0	-	-	-	-	-	0.9	-	-	0.3	0.5	0.3
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	7.4	28.3	4.9	3.0	-	-	-	-	-	42.1	-	-	9.7	27.6	34.8
Natur und Landschaft	1.4	5.0	0.8	0.2	2.9	0.1	0.6	0.3	0.4	6.7	3.5	3.0	1.4	3.8	5.2
Bodenschäden	0.1	2.4	0.1	0.1	0.1	0.1	-	-	-	2.3	4.8	-	0.4	2.4	2.4
Vor- und nachgelagerte Prozesse	6.0	41.9	3.7	2.2	0.9	0.6	0.5	-	-	14.3	19.9	13.8	4.3	37.0	28.1
Unfälle	5.1	12.3	27.1	64.4	17.1	20.9	23.9	16.9	2.5	14.1	18.5	41.2	4.4	7.6	6.8
Total aller Kostenbereiche	25.8	137.6	39.4	105.0	22.4	23.6	25.1	17.3	2.9	155.3	116.9	82.8	28.3	101.7	141.2
Abzug LSVA-Anteil	-0.02	-2.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-21.9	-25.8
Total mit LSVA Abzug	25.8	135.6	39.4	105.0	22.4	23.6	25.1	17.3	2.9	155.3	116.9	82.8	28.3	79.8	115.4
Externe Kosten Sicht Verkehrsart (nach Abzug LSVA)		129.3												79.7	115.3
Soziale Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten	32.2	145.3	188.5	486.3	131.3	175.3	222.6	105.8	20.4	164.2	121.4	100.3	35.9	107.4	144.5
Zusätzliche Effekte Fuss- und Veloverkehr															
Unfälle Sport & Freizeit Sicht Verkehrsteilnehmende	-	-	-	-	-	-	2.0	62.7	7.0	-	-	-	-	-	-
Externe Gesundheitsnutzen Sicht Verkehrsteilnehmende	-	-	-	-	-24.5	-60.7	-51.9	-	-98.5	-	-	-	-	-	-
Unfälle Sport & Freizeit Soziale Kosten	-	-	-	-	-	-	21.8	691.1	72.1	-	-	-	-	-	-
Sozialer Gesundheitsnutzen	-	-	-	-	-243.7	-627.0	-468.0	-	-1'022.5	-	-	-	-	-	-

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, k.W. = keine Werte

b) Effekte pro Personen- bzw. Tonnenkilometer

Im **Personenverkehr** verursachen Mofas und Motorräder aufgrund der hohen Unfallkosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende die höchsten externen Kosten (105 bzw. 38 Rp / pkm – vgl. Abbildung 19-28 und Abbildung 19-29). Busse verursachen mit 20 Rp / pkm etwas höhere Kosten als Personenwagen mit 17 Rp / pkm. Dies ist vor allem auf die bei den Bussen höheren Kosten der Luftverschmutzung zurückzuführen, die durch die übrigen Effekte nicht aufgewogen werden können. Dabei ist zu beachten, dass die Busse als Teil einer Wegekette genutzt werden können, z.B. mit weiteren Teilstücken im Zug (5.6 Rp / pkm), Tram (3.5 Rp / pkm), Trolleybus (8 Rp / pkm), oder zu Fuss (Nettonutzen von 96 Rp / pkm). Es ist davon auszugehen, dass städtische Busse aufgrund der meist höheren Auslastung besser abschneiden würden als Regionalbusse, aber aufgrund fehlender Datengrundlagen kann in den Berechnungen keine solche Differenzierung vorgenommen werden. Die Differenz zwischen Bussen bzw. Trams / Trolleybussen ist auf die durchschnittlich höheren Besetzungsgrade von Trolleybussen und Trams (15 bzw. 24 Personen / Fz) im Vergleich zu Bussen (8) sowie auf die unterschiedliche Antriebsart (Emissionen) zurückzuführen. Zudem ist zu beachten, dass Personenwagen in Städten zu höheren Kosten führen als auf Autobahnen. Im innerstädtischen Verkehr dürfte deshalb der Bus klar tiefere externe Kosten pro pkm aufweisen als die Personenwagen. Gesellschaftswagen reihen sich aufgrund des eher hohen Besetzungsgrades von 21 Personen / Fz mit 6 Rp / Fzkm zwischen den Trolleybussen und Trams ein (aus Sicht Verkehrsart sinken die Kosten der Gesellschaftswagen um 0.3 Rp / pkm). Im Fuss- und Veloverkehr sind die Effekte pro pkm gleich wie die Effekte pro Fzkm oben (vgl. Abschnitt a) oben).

Abbildung 19-28: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsteilnehmende pro Personen- bzw. Tonnenkilometer im Strassenverkehr 2021 (nach Abzug LSVA)

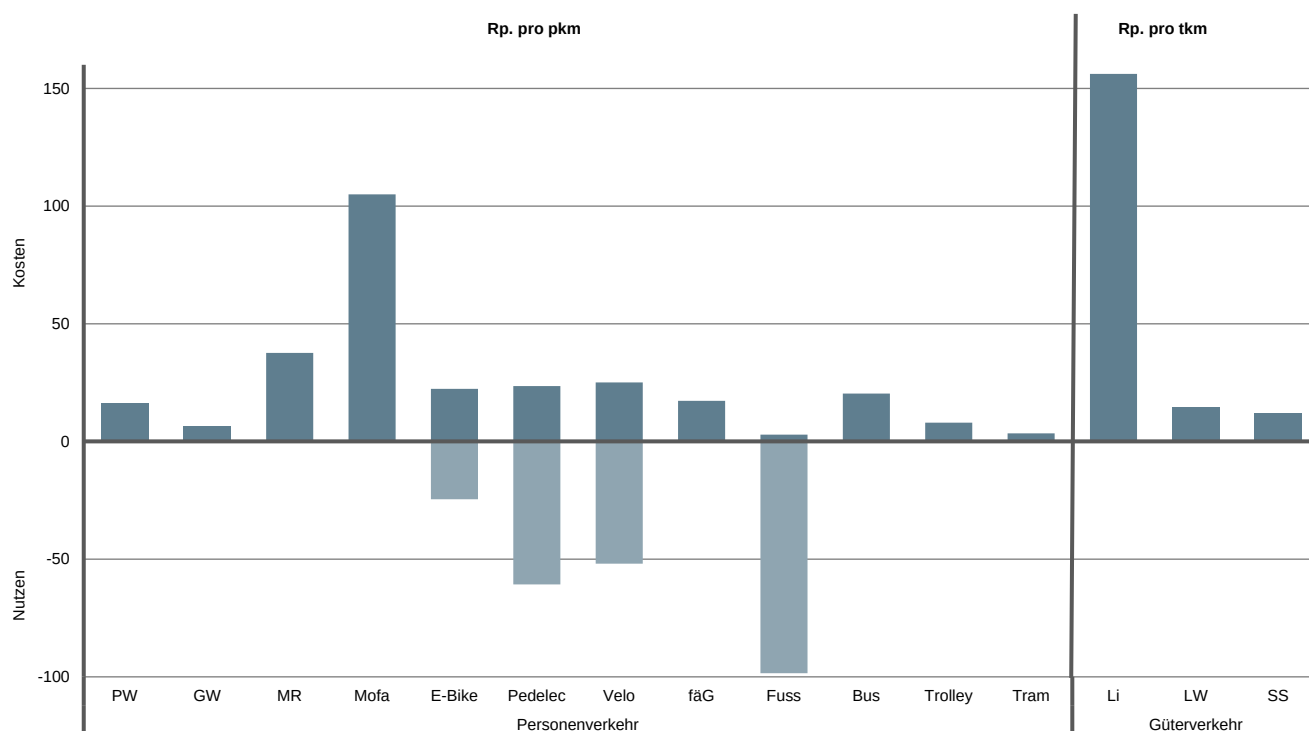


Abbildung 19-29: Externe und soziale Effekte pro Personen- bzw. Tonnenkilometer im Strassenverkehr 2021

Externe Effekte pro pkm / tkm	Personenverkehr in Rp / pkm										Güterverkehr in Rp / tkm					
	Motorisierter privater Personenverkehr					Fuss- und Veloverkehr					Öffentlicher Personenverkehr					
Strassenverkehr	PW	GW	MR	Mofa		E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Bus	Trolley	Tram	Li	LW	SS
Rp. pro pkm bzw. tkm																
Gesundheit Luft	3.4	2.1	2.6	33.6		1.4	1.8	-	-	-	9.3	4.6	1.0	39.2	4.0	6.4
Gebäude Luft	0.2	0.1	0.1	1.5		0.1	0.1	-	-	-	0.4	0.2	0.0	1.7	0.2	0.3
Ernteaussfälle Luft	0.0	0.0	0.0	0.0		-	-	-	-	-	0.1	-	-	1.1	0.1	0.0
Waldschäden Luft	0.0	0.0	0.0	0.0		-	-	-	-	-	0.1	-	-	1.0	0.1	0.0
Biodiversitätsverluste Luft	0.1	0.0	0.0	0.0		-	-	-	-	-	0.1	-	-	1.4	0.1	0.0
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.		k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	4.7	1.3	4.7	3.0		-	-	-	-	-	5.5	-	-	53.7	5.1	3.7
Natur und Landschaft	0.9	0.2	0.7	0.2		2.9	0.1	0.6	0.3	0.4	0.9	0.2	0.1	7.8	0.7	0.5
Bodenschäden	0.1	0.1	0.1	0.1		0.1	0.1	-	-	-	0.3	0.3	-	2.0	0.4	0.3
Vor- und nachgelagerte Prozesse	3.8	2.0	3.5	2.2		0.9	0.6	0.5	-	-	1.9	1.4	0.6	23.9	6.9	3.0
Unfälle	3.2	0.6	25.9	64.4		17.1	20.9	23.9	16.9	2.5	1.9	1.3	1.7	24.5	1.4	0.7
Total aller Kostenbereiche	16.5	6.5	37.7	105.0		22.4	23.6	25.1	17.3	2.9	20.4	8.0	3.5	156.1	18.9	14.8
Abzug LSWA-Anteil	-0.01	-0.1	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-4.1	-2.7
Total mit LSWA Abzug	16.5	6.4	37.7	105.0		22.4	23.6	25.1	17.3	2.9	20.4	8.0	3.5	156.1	14.8	12.1
Externe Kosten Sicht Verkehrsart		6.1														
Soziale Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten	20.7	6.9	180.2	486.3		131.3	175.3	222.6	105.8	20.4	21.6	8.3	4.2	198.6	20.0	15.2
Zusätzliche Effekte Fuss- und Veloverkehr																
Unfälle Sport & Freizeit Sicht Verkehrsteilnehmende	-	-	-	-		-	-	2.0	62.7	7.0	-	-	-	-	-	-
Externe Gesundheitsnutzen Sicht Verkehrsteilnehmende	-	-	-	-		-24.5	-60.7	-51.9	-	-98.5	-	-	-	-	-	-
Unfälle Sport & Freizeit Soziale Kosten	-	-	-	-		-	-	21.8	691.1	72.1	-	-	-	-	-	-
Sozialer Gesundheitsnutzen	-	-	-	-		-243.7	-627.0	-468.0	-	-1'022.5	-	-	-	-	-	-

SS = Lastwagen, LW = Lieferwagen, Li = Lastkraftwagen, SS = Sattelzugmaschine, k.W. = keine Werte

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, fäG = fahrzeugähnliches Gerät, Fuss = Fussverkehr, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper, k.W. = keine Werte

Die **sozialen Kosten** pro pkm liegen um exakt dieselben Faktoren höher als die externen Kosten pro pkm wie bei den Kosten pro Fzkm (soziale / extern). Besonders hoch sind wiederum die sozialen Kosten von Mofas mit 486 Rp / pkm und Motorrädern mit 180 Rp / pkm. Die sozialen Kosten der PW mit 21 Rp / pkm holen die Busse mit 22 Rp / pkm fast ein.

Im **Güterverkehr** verursachen die Lieferwagen aufgrund der geringen Transportmengen (0.2t pro Fahrzeug) mit 156 Rp / tkm die höchsten externen Kosten. Lastwagen mit durchschnittlich 5.4t pro Fahrzeug bzw. Sattelschlepper mit 9.5t verursachen Kosten von 15 bzw. 12 Rp / tkm (nach Anrechnung des LSVA-Anteils). Diese sind aus **Sicht Verkehrsart Schwerverkehr** nur marginal tiefer (um 0.01 bis 0.02 Rp / tkm) als aus Sicht Verkehrsteilnehmende. Die **sozialen Kosten** liegen jedoch deutlich höher (bei 199, 20 bzw. 15 Rp / tkm).

19.4.3 Schienenverkehr

Aus Sicht Verkehrsteilnehmende liegen die externen Kosten der Bahn im Personenverkehr bei 389 Rp / Zugkm, im Güterverkehr hingegen bei 1'728 Rp / Zugkm – und damit gut 4-mal höher (vgl. Abbildung 19-30). Dies ist auf die meist langen Güterzüge und die höheren Schadstoffemissionen (Gesundheitskosten der Luftbelastung, übrige Kosten der Luftbelastung, Klima, vor- und nachgelagerte Prozesse) zurückzuführen.

Pro Personenkilometer fallen im Schienenverkehr Kosten von 5.6 Rp / pkm an. Dies ist vor allem auf Gesundheitskosten der Luftverschmutzung und Natur und Landschaft zurückzuführen. Im Güterverkehr entstehen Kosten von 4.5 Rp / tkm.⁴³⁵

Abbildung 19-30: Externe und soziale Kosten pro Fahr- und Verkehrsleistung im Schienenverkehr 2021

Externe Kosten Schienenverkehr	Kosten pro Zugkm		pro pkm	pro tkm
	Personenverkehr	Güterverkehr	Personenverkehr	Güterverkehr
Rp. pro Zugkm				
Gesundheit Luft	276.4	1'256.6	4.0	3.3
Gebäude Luft	12.0	54.6	0.2	0.1
Ernteauffälle Luft	0.1	2.4	0.0	0.0
Waldschäden Luft	0.1	2.2	0.0	0.0
Biodiversitätsverluste Luft	0.1	3.0	0.0	0.0
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	1.2	34.6	0.0	0.1
Natur und Landschaft	49.4	118.3	0.7	0.3
Bodenschäden	15.2	15.2	0.2	0.0
Vor- und nachgelagerte Prozesse	23.1	196.9	0.3	0.5
Unfälle	11.7	43.8	0.2	0.1
Total	389.2	1'727.6	5.6	4.5
Soziale Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten	396.7	1'757.3	5.7	4.6

⁴³⁵ Dabei werden die sogenannten NNtkm (NettoNetto-tkm) verwendet, bei denen nur das Gewicht der transportierten Güter berücksichtigt wird (wie bei den anderen Verkehrsträgern).

Die **sozialen Kosten** pro Zugkm, pkm bzw. tkm sind jeweils um 2% höher als die externen Kosten.

19.4.4 Luftverkehr

Im Luftverkehr belaufen sich die externen Kosten für den Personentransport auf 12.2 Rp / pkm (vgl. Abbildung 19-31).⁴³⁶ Im Frachtverkehr liegen die Kosten in der Sicht Verkehrsträger bei 35.5 Rp / tkm. Der Grossteil der Kosten stammt jeweils vom Klimabereich. Die sozialen Kosten fallen je nur um 0.2 Rp / km höher aus.

Abbildung 19-31: Externe und soziale Kosten pro Verkehrsleistung im Luftverkehr 2021

Externe Kosten pro pkm bzw. tkm	Personenverkehr	Güterverkehr
Luftverkehr	pkm	tkm
Rp. pro pkm bzw. tkm		
Gesundheit Luft	0.4	0.7
Gebäude Luft	0.0	0.0
Ernteaussfälle Luft	0.0	0.0
Waldschäden Luft	0.0	0.0
Biodiversitätsverluste Luft	0.0	0.0
Lärm	k.W.	k.W.
Klima	9.4	27.5
Natur und Landschaft	0.0	0.1
Bodenschäden	-	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	2.1	7.1
Unfälle	0.1	0.1
Total	12.2	35.5
Soziale Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten	12.4	35.7

19.4.5 Schiffsverkehr

Im Schiffsverkehr liegen die externen Kosten bei 115 Rp / pkm bzw. bei 9 Rp / tkm (vgl. Abbildung 19-32). Dies ist vor allem auf die Gesundheitskosten der Luftbelastung und die Klimakosten zurückzuführen.

Im Güterverkehr gibt es bedeutende Unterschiede zwischen dem Schiffsverkehr auf dem Rhein (unterhalb Basel) und dem Güterverkehr auf den Schweizer Seen. Unterhalb Basel belaufen sich

⁴³⁶ Für die Berechnung der externen Kosten des Luftverkehrs pro Personenkilometer und pro Tonnenkilometer (Fracht), werden die externen Kosten im Verhältnis des transportierten Personen- und Frachtgewichts aufgeteilt. Würde bei der Aufteilung neben dem Gewicht auch noch die Transportdistanz berücksichtigt, so würden sich die Kostensätze leicht verschieben.

die Kosten lediglich auf 6 Rp / tkm, auf den Seen hingegen auf 139 Rp / tkm (also 23-mal mehr). Dies ist eine Folge der deutlich kleineren Tonnagen und kürzeren Strecken auf den Seen sowie der höheren Schadstoffemissionen.

Die **sozialen Kosten** übersteigen die externen Kosten kaum.

Abbildung 19-32: Externe und soziale Kosten pro Verkehrsleistung im Schiffsverkehr 2021

Externe Kosten pro Kilometer	Personenverkehr	Güterverkehr	davon	
Schiffsverkehr	pkm	tkm	Rhein	Übrige
in Rp. pro pkm bzw. tkm				
Gesundheit Luft	85.1	6.0	4.0	107.2
Gebäude Luft	3.7	0.3	0.2	4.7
Ernteaufälle Luft	1.2	0.1	0.1	1.3
Waldschäden Luft	1.2	0.1	0.1	1.2
Biodiversitätsverluste Luft	1.6	0.2	0.1	1.6
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	19.0	1.2	0.8	22.0
Natur und Landschaft	0.7	0.2	0.2	0.2
Bodenschäden	-	-	-	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	1.7	0.6	0.6	0.6
Unfälle	0.2	0.0	0.0	0.0
Total	114.3	8.8	6.1	138.7
Soziale Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten	114.7	8.8	6.2	139.0

19.4.6 Vergleich der Verkehrsträger

Schliesslich werden die Kosten pro Verkehrsleistung der vier Verkehrsträger noch miteinander verglichen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die einzelnen Fahrzeugkategorien nur bedingt vergleichbar sind bzw. dass der Vergleich vor allem für Verkehre mit ähnlichen Streckenlängen sinnvoll ist. So lassen sich verschiedene städtische Fahrzeugkategorien gut vergleichen, zudem verschiedene Fahrzeugkategorien des nationalen oder kontinentalen Verkehrs. Beim Luftverkehr ist die Vergleichbarkeit aber eingeschränkt, solange der interkontinentale Verkehr mit eingerechnet ist. Ein Vergleich von Personenwagen und Fernzügen müsste mit dem kontinentalen Luftverkehr erfolgen (der interkontinentale verursacht pro pkm tendenziell niedrigere Kosten, da Start und Landung weniger ins Gewicht fallen). Im Güterverkehr ist zu beachten, dass die Wertigkeit der Güter pro Tonne sehr unterschiedlich ist (z.B. Massengüter im Schiffsverkehr, hochwertige Güter im Luftverkehr).

a) Personenverkehr

Zieht man die Ergebnisse zum Personenverkehr in den vorangehenden Kapiteln zusammen, wird ersichtlich, dass der Schiffsverkehr mit 114 Rp / pkm die höchsten Kosten pro pkm verursacht (vgl.

Abbildung 19-33 und Abbildung 19-34). Dies ist auf die sehr hohen Emissionen von Luftschadstoffen (aber auch von Klimagasen) zurückzuführen. Ansonsten verursacht der motorisierte Personenverkehr mit 17 Rp / pkm die höchsten Kosten, knapp vor dem Strassen-ÖV mit 15 Rp / pkm. Der Luftverkehr liegt aufgrund der grossen Distanzen und der hohen Auslastung mit 12 Rp / pkm darunter. Der Schienenverkehr schliesslich verursacht mit weniger als 6 Rp / pkm die tiefsten Kosten pro pkm.

Abbildung 19-33: Vergleich der Verkehrsträger im Personenverkehr 2021: Externe Kosten pro pkm (Sicht Verkehrsteilnehmende)

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

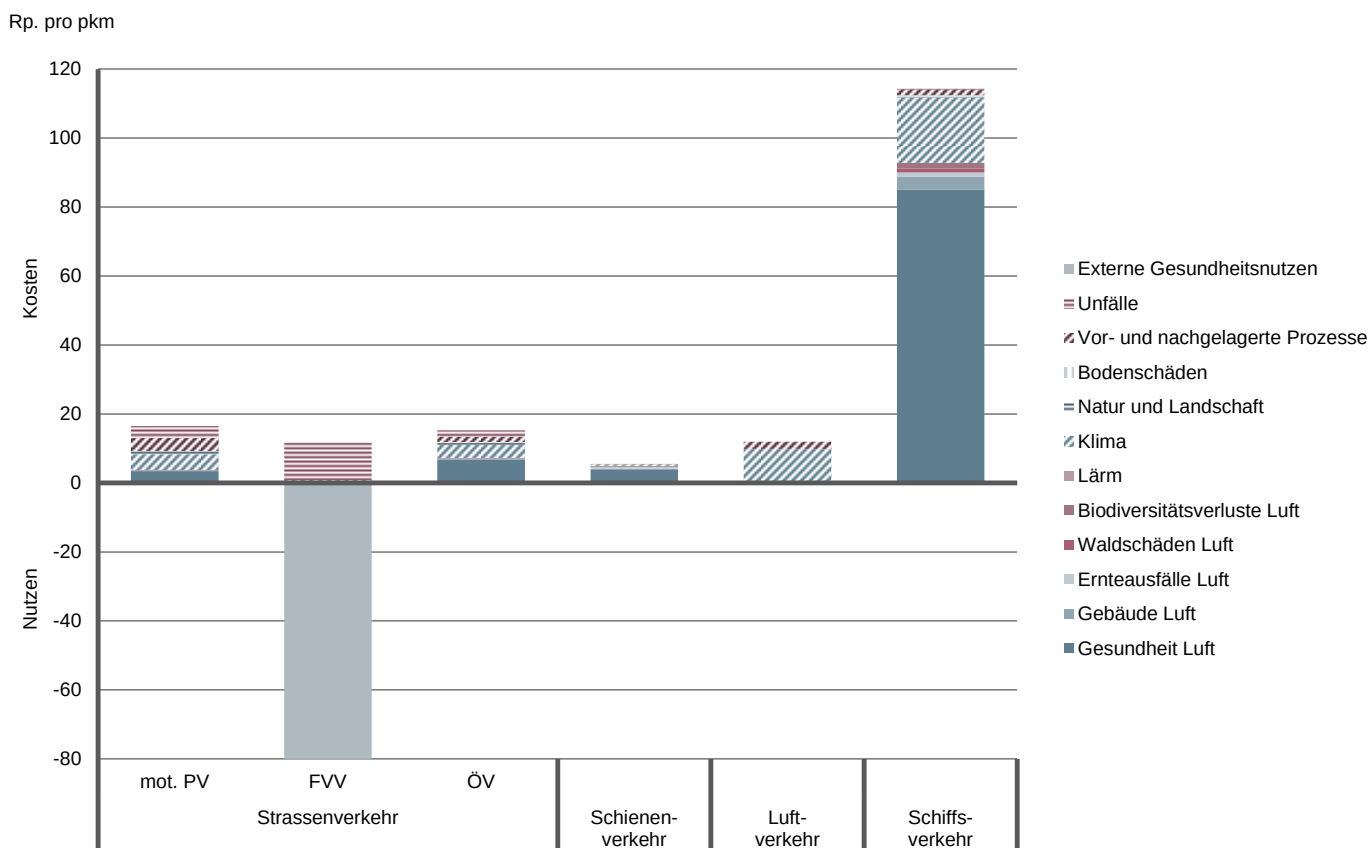


Abbildung 19-34: Vergleich der Verkehrsträger im Personenverkehr 2021: Externe und soziale Kosten pro pkm

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

Personenverkehr in Rp. / pkm	Strassenverkehr			Schienenverkehr	Luftverkehr	Schiffsverkehr
	mot. PV	FVV	ÖV			
Gesundheit Luft	3.4	0.1	6.8	4.0	0.4	85.1
Gebäude Luft	0.2	0.0	0.3	0.2	0.0	3.7
Ernteaussfälle Luft	0.0	-	0.1	0.0	0.0	1.2
Waldschäden Luft	0.0	-	0.1	0.0	0.0	1.2
Biodiversitätsverluste Luft	0.1	-	0.1	0.0	0.0	1.6
Lärm	-	-	-	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	4.6	-	3.7	0.0	9.4	19.0
Natur und Landschaft	0.9	0.5	0.6	0.7	0.0	0.7
Bodenschäden	0.1	0.0	0.2	0.2	-	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	3.8	0.2	1.6	0.3	2.1	1.7
Unfälle	3.7	10.8	1.8	0.2	0.1	0.2
Total	16.7	11.7	15.2	5.6	12.2	114.3
Abzug LSVA-Anteil	-0.01					
Total mit LSVA Abzug	16.7	11.7	15.2	5.6	12.2	114.3
Soziale Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten	24.0	95.8	16.2	5.7	12.4	114.7
Externe Gesundheitsnutzen	-	-80.0	-	-	-	-
Soziale Gesundheitsnutzen	-	-808.1	-	-	-	-

Im Fuss- und Veloverkehr (FVV) sind die Kosten mit 12 Rp / pkm zwar im Bereich des Luftverkehrs, diese werden jedoch durch die noch höheren externen Gesundheitsnutzen von 80 Rp / pkm mehr als kompensieren.

Bei den **sozialen Kosten** steigen die Kosten des motorisierten Personenverkehrs auf der Strasse um 43%, während die Kosten der anderen Verkehrsträger sich kaum erhöhen (Zunahme um weniger als 6%) – mit Ausnahme des Fuss- und Veloverkehrs, dessen Kosten um den Faktor 8 zunehmen. Gleichzeitig sind aber die sozialen Gesundheitsnutzen um den Faktor 10 höher als die externen, so dass auch bei den sozialen Effekten die Gesundheitsnutzen deutlich höher sind als die sozialen Kosten des Fuss- und Veloverkehrs.

b) Güterverkehr

Im Güterverkehr ergeben sich im Luftverkehr mit 36 Rp / tkm die höchsten externen Kosten (vgl. Abbildung 19-35 und Abbildung 19-36). Deutlich tiefer (17 Rp / tkm) liegen die Kosten des Strassengüterverkehrs (Durchschnitt Lastwagen und Sattelschlepper). Im Strassenverkehr werden davon aber 3 Rp / tkm durch den LSVA-Anteil internalisiert, so dass nur noch 13 Rp / tkm extern sind.⁴³⁷ Dies liegt immer noch deutlich über dem Schienenverkehr mit 5 Rp / tkm. Im Schiffsverkehr entstehen auf dem Rhein nur Kosten von 6 Rp / tkm, auf Seen hingegen 139 Rp / tkm (der Güterverkehr auf Seen ist jedoch kaum relevant, nur 37 Mio. tkm oder 2% des Schiffsverkehrs⁴³⁸).

⁴³⁷ Aus Sicht Verkehrsart sind es 0.01 Rp / tkm weniger, d.h. praktisch gleich hohe Kosten pro pkm.

⁴³⁸ Entsprechend schätzen wir die Datenlage im Schiffsverkehr auf Seen als vergleichsweise unsicher ein.

Abbildung 19-35: Vergleich der Verkehrsträger im Güterverkehr 2021: Externe Kosten pro tkm (Sicht Verkehrsteilnehmende)

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

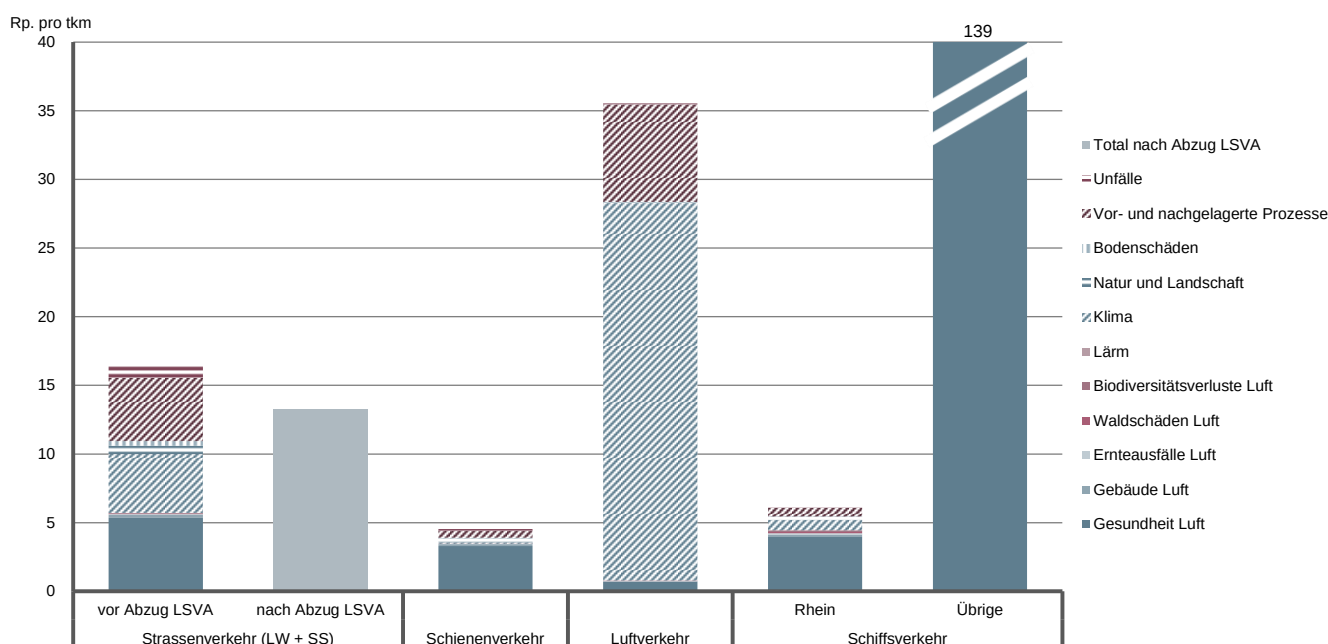


Abbildung 19-36: Vergleich der Verkehrsträger im Güterverkehr 2021: Externe und soziale Kosten pro tkm

Strassen- / Schienenverkehr: Territorialitätsprinzip, Luft- / Schiffsverkehr: Halbstreckenprinzip

Güterverkehr in Rp. pro tkm	Schwerverkehr (LW + SS)	Schienenverkehr	Luftverkehr	Schiffsverkehr total	Schiffsverkehr Rhein	Schiffsverkehr Übrige
Gesundheit Luft	5.3	3.3	0.7	6.0	4.0	107.2
Gebäude Luft	0.2	0.1	0.0	0.3	0.2	4.7
Ernteauffälle Luft	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	1.3
Waldschäden Luft	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	1.2
Biodiversitätsverluste Luft	0.1	0.0	0.0	0.2	0.1	1.6
Lärm	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.	k.W.
Klima	4.3	0.1	27.5	1.2	0.8	22.0
Natur und Landschaft	0.6	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2
Bodenschäden	0.3	0.0	-	-	-	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	4.6	0.5	7.1	0.6	0.6	0.6
Unfälle	1.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
Total	16.6	4.5	35.5	8.8	6.1	138.7
Abzug LSVA-Anteil	-3.3					
Total mit LSVA Abzug	13.3	4.5	35.5	8.8	6.1	138.7
Gesamttotal Sicht Verkehrsart	13.3	4.5	35.5	8.8	6.1	138.7
Soziale Umwelt-, Gesundheits- und Unfallkosten	17.2	4.6	35.7	8.8	6.2	139.0

Bei den **sozialen Kosten** fallen die Kosten des Strassenverkehrs um 30% höher aus, während bei den anderen Verkehrsträgern die Kosten kaum steigen (+0.2% bis +1.7%). Damit steigen die Kosten im Strassengüterverkehr auf 17 Rp / tkm und sind damit knapp halb so hoch wie die Kosten im Luftverkehr (36 Rp / tkm) und knapp viermal so hoch wie im Schienenverkehr bzw. dreimal so hoch wie im Schiffsverkehr auf dem Rhein.

19.5 Unsicherheiten

Die Berechnungen der externen und sozialen Kosten erfordern Annahmen und unterliegen Unsicherheiten. Diese wurden im Rahmen von Sensitivitätsanalysen in den vorangehenden Kapiteln untersucht. Die folgende Abbildung fasst diejenigen Sensitivitätsanalysen zusammen, die einen merkbaren Einfluss auf das Gesamtergebnis (oder zumindest das Ergebnis eines Verkehrsträgers) haben.⁴³⁹ Die Ergebnisse können wie folgt kommentiert werden:⁴⁴⁰

- Die **Belastungs-Wirkungs-Beziehungen** bei der Berechnung der Gesundheitskosten der Luftbelastung sind alle mit Unsicherheiten behaftet. Wird bei allen Belastungs-Wirkungs-Beziehungen gleichzeitig das untere oder obere 95%-Konfidenzintervall verwendet, so schwanken die externen Kosten um +16% bzw. -12% (oder +4.0 Mrd. CHF / -2.9 Mrd. CHF). Allerdings ist nochmals darauf hinzuweisen (vgl. Kapitel 4.8.2), dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass alle Belastungs-Wirkungs-Beziehungen gleichzeitig deutlich unter- oder überschätzt werden.
- Der **Klimakostensatz** wird um die Faktoren 3.2 und 0.3 variiert. Dies führt dazu, dass sich die externen Kosten mehr als verdoppeln (+109%, 50.2 Mrd. CHF) oder um ein Drittel sinken (-35%, 15.7 Mrd. CHF), wobei das Ausmass der Schwankungsbreite in den Verkehrsträgern von der Bedeutung der Klimakosten (inkl. vor- und nachgelagerte Effekte) im Total abhängt. Im Luftverkehr führt der hohe Klimakostensatz zu einer Verdreifachung (+209%) und der tiefe Kostensatz zu einer Reduktion auf ein Drittel (-67%) der externen Kosten. Im Schienenverkehr beträgt die Schwankungsbreite +18% / -6%. Im Strassenverkehr schwankt die Sensitivität zwischen +105% und -34%. Der Klimakostensatz hat damit die grösste Schwankungsbreite der untersuchten Sensitivitätsanalysen.
- Der **VOSL** (value of statistical life) wird um $\pm 50\%$ variiert (und damit auch der value of life year lost VLYL). Dies verändert die externen Kosten um $\pm 15\%$ (Total und Strassenverkehr), im Schienen- und Schiffsverkehr ist die Schwankungsbreite mit $\pm 27\%$ bzw. $\pm 25\%$ höher, im Luftverkehr mit $\pm 1\%$ geringer.
- Schliesslich hat auch der Kostensatz für die **Klimawirksamkeit der Nicht-CO₂-Emissionen** des Luftverkehrs grosse Auswirkungen im Luftverkehr. Wird statt einem at least Ansatz der best guess Ansatz gewählt, so steigen die Kosten des Luftverkehrs um 75% (auf 4 Mrd. CHF), während die anderen Verkehrsträger davon natürlich nicht betroffen sind.

⁴³⁹ In den einzelnen Kapiteln zu den Kostenbereichen sind teilweise weitere Sensitivitätsanalysen enthalten (siehe Kapitel X.8.2).

⁴⁴⁰ Im Folgenden konzentrieren wir uns auf die Ergebnisse für die externen Kosten. Die absoluten Schwankungsbreiten der sozialen Kosten sind jedoch identisch mit den absoluten Schwankungsbreiten der externen Kosten, die prozentualen Schwankungsbreiten sind bei den sozialen Kosten damit kleiner, da die Basisrechnung 37 statt 24 Mrd. CHF beträgt. Einzige Ausnahme: Bei variierendem VOSL schwanken die sozialen Kosten um 8.7 Mrd. CHF (statt 3.6 Mrd. CHF wie bei den externen Kosten).

Abbildung 19-37: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen mit wesentlichen Auswirkungen auf die Endergebnisse der externen Kosten (ohne Gesundheitsnutzen, ohne Sport- und Freizeitunfälle, vor Abzug LSVA)

Externe Kosten in Mio. CHF	Strassenverkehr	Schienenverkehr	Luftverkehr	Schiffsverkehr	Total
Basisberechnung	20'032	1'406	2'268	301	24'007
Effektschätzer Gesundheit Luft hoch	23'081	2'117	2'315	450	27'964
Effektschätzer Gesundheit Luft tief	17'775	895	2'234	196	21'101
Klimakostensatz hoch	41'081	1'653	7'002	432	50'168
Klimakostensatz tief	13'314	1'327	758	260	15'658
VOSL hoch	23'121	1'789	2'302	378	27'590
VOSL tief	16'942	1'022	2'234	225	20'424
Kostensätze non-CO2-Emis. ERF hoch	20'032	1'406	3'978	301	25'717
Veränderung zur Basisrechnung (in Prozent)					
Effektschätzer Gesundheit Luft hoch	15%	51%	2%	49%	16%
Effektschätzer Gesundheit Luft tief	-11%	-36%	-1%	-35%	-12%
Klimakostensatz hoch	105%	18%	209%	43%	109%
Klimakostensatz tief	-34%	-6%	-67%	-14%	-35%
VOSL hoch	15%	27%	1%	25%	15%
VOSL tief	-15%	-27%	-1%	-25%	-15%
Kostensätze non-CO2-Emis. ERF hoch	0%	0%	75%	0%	7%
Veränderung zur Basisrechnung (absolut)					
Effektschätzer Gesundheit Luft hoch	3'050	711	47	149	3'957
Effektschätzer Gesundheit Luft tief	-2'256	-510	-34	-106	-2'906
Klimakostensatz hoch	21'050	247	4'733	130	26'161
Klimakostensatz tief	-6'718	-79	-1'511	-42	-8'349
VOSL hoch	3'089	384	34	76	3'583
VOSL tief	-3'089	-384	-34	-76	-3'583
Kostensätze non-CO2-Emis. ERF hoch	-	-	1'710	-	1'710

Daneben wurde zu den einzelnen Kostenbereichen erläutert, dass es diverse Gründe gibt, weshalb die dargestellten Kosten eine **Unterschätzung** (oder in wenigen Ausnahmefällen eine Überschätzung) darstellen. Als wichtigste Gründe sind zu nennen:

Mehrere Kostenbereiche

- Verschiedene Gesundheitseffekte durch Luftbelastung (andere Krankheitsbilder, aber auch Langzeitwirkungen) und Bewegung (Fuss- und Veloverkehr) konnten mangels Datengrundlagen nicht berücksichtigt werden. Bei den berücksichtigten Krankheitsbildern werden zudem nur die Spitaleinweisungen mit Hauptdiagnose betrachtet, diejenigen mit Nebendiagnose jedoch vernachlässigt.
- Bei einigen Krankheitsbildern konnten nur die Kosten durch Hospitalisationen berücksichtigt werden. Weitere Krankheitskosten ausserhalb von Spitalaufenthalten (Pflegekosten, Arztkosten, Medikamentenkonsum, Produktionsausfälle (ohne Spitalaufenthalt), immaterielle Kosten der Krankheit) werden hingegen vernachlässigt (bei anderen Krankheitsbildern wie COPD, Lungenkrebs, Diabetes und Demenz sind sie jedoch berücksichtigt). Bei den folgenden Krankheitsbildern fehlen somit weitere Kostenbereiche: Herz-/Kreislaufkrankungen (relevant im Bereich

Luftbelastung, Gesundheitsnutzen), Atemwegserkrankungen (Luftbelastung), Depression (Gesundheitsnutzen), Brustkrebs (Gesundheitsnutzen) und Kolonkrebs (Gesundheitsnutzen). Diese Kosten könnten insbesondere bei Depressionen hoch sein.

Gesundheitskosten durch Luftverschmutzung

- Es konnte nur der Leitschadstoff PM₁₀ berücksichtigt werden.
- Die Emissionen des Verkehrs könnten toxischer sein als andere Emissionen.

Übrige Kosten durch Luftverschmutzung

- Für verschiedene, nachweisbare Einflüsse von Luftschadstoffen auf Ökosysteme (Wald, Biodiversität generell) sind keine quantitativen Aussagen möglich, weil entweder die Dosis-Wirkungs-Zusammenhänge nicht bekannt oder nicht quantifizierbar sind (z.B. Kosten zusätzlicher Naturgefahren, wenn Schutzwälder durch Immissionen von Luftschadstoffen beeinträchtigt sind).

Klima

- Bei den Klimakosten nicht explizit abgedeckt sind mögliche Kippeffekte des Klimas oder andere unvorhersehbare Grossrisiken im Zusammenhang mit der Klimaveränderung.

Vor- und nachgelagerte Prozesse

- Es können nur Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen berücksichtigt werden. Andere Schäden, die bei vor- und nachgelagerten Prozessen entstehen, werden hingegen vernachlässigt, wie z.B. Boden- und Gewässerschäden (z.B. bei der Batterieproduktion) sowie Schäden an Natur und Landschaft.

Natur und Landschaft

- Im Bereich Natur und Landschaft gibt es eine Reihe weiterer Schadwirkungen, die im Rahmen der vorliegenden Studie nicht monetarisiert werden konnten, z.B. durch Lichtimmissionen, Eintrag von Streusalz in die Umwelt, Habitatdegradierung oder invasive Neophyten.

Unfälle

- Aus diversen Gründen (siehe Kapitel 14.8.3) dürften die Unfallkosten leicht unterschätzt werden, im Schienen- und Luftverkehr könnten die Unterschätzungen innerhalb des Verkehrsträgers prozentual nicht vernachlässigbar sein, absolut betrachtet sind sie jedoch gering.

Nicht berücksichtigte Kostenbereiche

- Schliesslich konnten mehrere Kostenbereiche im Rahmen dieser Studie nicht quantifiziert werden: Risiken durch die Energiebereitstellung (Öltransport und Kernkraftrisiken), Beeinträchtigung des Landschaftsbildes, Gewässerschäden und Erschütterungen.⁴⁴¹

⁴⁴¹ Ecoplan; INFRAS (2014) Anhang A

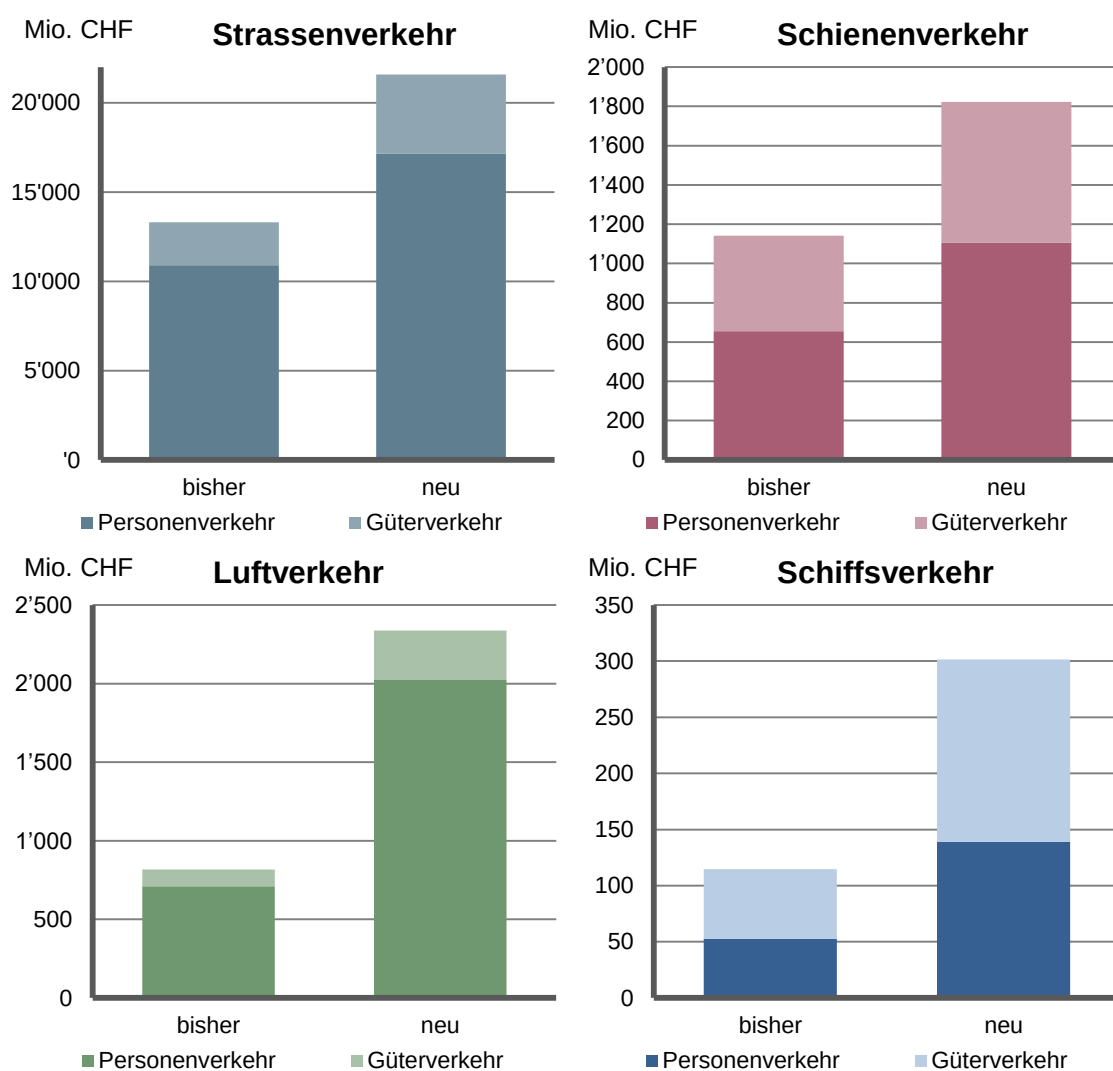
19.6 Vergleich zu den bisherigen Berechnungen

19.6.1 Übersicht

Im Folgenden werden die neuen Ergebnisse für die externen Effekte im Jahr 2021 mit den bisherigen Resultaten für das Jahr 2021 verglichen, die mit dem bisherigen Aktualisierungstool gemäss der bisherigen Methodik berechnet werden. Die Ergebnisse zeigen also, was die Aufdatierung der nicht jährlich aktualisierten Inputdaten sowie die Methoden Anpassungen für Auswirkungen haben. **Zu beachten ist, dass die Lärmkosten noch nicht nach einer neuen Methodik berechnet werden konnten, so dass im Folgenden die Lärmresultate 2021 gemäss bisheriger Methodik unverändert übernommen werden.**

Wie die folgenden beiden Abbildungen zeigen, führt die neue Methodik und die neuen Datengrundlagen dazu, dass die Gesamtkosten insgesamt um 69% oder 10.7 Mrd. CHF steigen (von 15.4 auf

Abbildung 19-38: Vergleich der Berechnungen für das Jahr 2021 (externe Kosten Sicht Verkehrsteilnehmende ohne Gesundheitsnutzen, ohne Sport und Freizeitunfälle, Lärm gleich wie bisher)



Achtung: Die Skalen der vier Verkehrsträger sind unterschiedlich

26.1 Mrd. CHF). Die Zunahme ist aber je nach Verkehrsträger deutlich unterschiedlich: Im Strassenverkehr beträgt die Zunahme 62% (oder 8.3 Mrd. CHF), im Schienenverkehr 60% (0.7 Mrd. CHF). Im Luftverkehr beläuft sich die Zunahme hingegen auf 186% (1.5 Mrd. CHF), da ein deutlich höherer Klimakostensatz verwendet wird und im Schiffsverkehr nehmen die Kosten um 163% zu (0.2 Mrd. CHF). Diese Zunahmen werden im Folgenden genauer untersucht, indem die Veränderungen für die einzelnen Kostenbereiche aufgezeigt werden.

Abbildung 19-39: Vergleich der Berechnungen für das Jahr 2021 (externe Kosten Sicht Verkehrsteilnehmende ohne Gesundheitsnutzen, ohne Sport und Freizeitunfälle, nach Abzug LSVA, Lärm gleich wie bisher)

Bisherige Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	10'904.2	2'396.95	13'301.2
Schienenverkehr	655.3	485.8	1'141.1
Luftverkehr	709.4	108.4	817.9
Schiffsverkehr	52.6	62.0	114.7
Total	12'321.6	3'053.3	15'374.8
Neue Berechnung für 2021	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	17'151	4'437	21'588.7
Schienenverkehr	1'105.7	717.5	1'823.2
Luftverkehr	2'022.9	314.3	2'337.2
Schiffsverkehr	139.2	162.2	301.4
Total	20'419.2	5'631.3	26'050.5
Veränderung durch Neuberechnung in %	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	57.3%	85.1%	62.3%
Schienenverkehr	68.7%	47.7%	59.8%
Luftverkehr	185.2%	189.8%	185.8%
Schiffsverkehr	164.4%	161.5%	162.8%
Total	65.7%	84.4%	69.4%
Veränderung durch Neuberechnung in Mio. CHF	Personenverkehr	Güterverkehr	Total
Strassenverkehr	6'247.2	2'040.3	8'287.5
Schienenverkehr	450.4	231.7	682.1
Luftverkehr	1'313.5	205.8	1'519.3
Schiffsverkehr	86.5	100.2	186.7
Total	8'097.6	2'578.0	10'675.7

19.6.2 Strassenverkehr

In der folgenden Abbildung werden die externen Kosten des Strassenverkehrs noch etwas genauer analysiert, unter Einbezug der Gesundheitsnutzen. Ohne Gesundheitsnutzen steigen die Kosten wie oben gesehen um 8.3 Mrd. CHF oder 62%. Mit Gesundheitsnutzen sinkt die Zunahme auf 4.2

Mrd. CHF, weil die Gesundheitsnutzen um 4.1 Mrd. CHF zunehmen. Die Gründe für diese Zunahme sind, dass neu neben den Hospitalisationen auch Inzidenzen von Demenz und Diabetes berücksichtigt werden, dass die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen gemäss neusten Erkenntnissen zum Teil deutlich stärker sind als bisher angenommen und dass die Aktivitäten im Fuss- und Veloverkehr neu als gleichwertig angesehen werden wie andere sportliche Aktivitäten (d.h. dass sie nicht nach allen anderen sportlichen Aktivitäten eingereiht werden). Die grösste Zunahme bei den übrigen Kostenbereichen ergibt sich bei den Klimaschäden, die aufgrund des höheren Kostensatzes um 3.6 Mrd. CHF zunehmen. Der höhere Klimakostensatz führt auch bei den vor- und nachgelagerten Effekten – zusammen mit der neuen Datengrundlage (Mobitool) zu einer Zunahme um 3.0 Mrd. CHF. Auch bei den Gesundheitskosten der Luftbelastung ist eine deutliche Zunahme um 1.8 Mrd. CHF festzustellen, was auf stärkere Belastungs-Wirkungs-Beziehungen und drei neue Krankheitsbilder (Demenz, Lungenkrebs und Diabetes) zurückzuführen ist (trotz 18 % tieferen Immissionen). Die übrigen Veränderungen sind relativ klein, wobei auf die Ermittlung der städtischen Effekte neu verzichtet wird (vgl. Kapitel 16). Zu erwähnen ist zudem, dass bisher die Sport- und Freizeitunfälle integriert waren. Damit nehmen die Unfallkosten eigentlich nicht um 0.2 Mrd. CHF zu (wie in der Abbildung dargestellt), sondern um 0.7 Mrd. CHF. *Die fehlenden Lärmkosten sind gleich wie in den bisherigen Berechnungen angesetzt.*

Abbildung 19-40: Externe Kosten Sicht Verkehrsteilnehmende im Strassenverkehr: Vergleich der bisherigen und neuen Berechnungen für 2021 (Lärm wie bisher)

Vergleich neue versus bisherige Berechnung 2021 (in Mio. CHF)	Bisherige Berechnung	Neue Berechnung	Veränderung in %	Veränderung in Mio. CHF
Strassenverkehr				
Gesundheit Luft	2'847	4'616	62%	1'769
Gebäude Luft	223	202	-9%	-21
Ernteauffälle Luft	44	52	19%	8
Waldschäden Luft	47	49	4%	2
Biodiversitätsverluste Luft	81	78	-4%	-3
Lärm	2'113	2'113	0%	-
Klima	1'593	5'230	228%	3'637
Natur und Landschaft	1'150	971	-16%	-178
Bodenschäden	145	154	6%	9
Vor- und nachgelagerte Prozesse	1'227	4'253	246%	3'025
Unfälle	4'180	4'426	6%	246
Städtische Räume	207	-	-100%	-207
Gesundheitsnutzen FVV	-1'522	-5'617	269%	-4'095
Total	12'335	16'527	34%	4'192
LSVA	-556	-556	0%	-
Total ohne Gesundheitsnutzen FVV, mit LSVA Abzug	13'301	21'589	62%	8'287

19.6.3 Schienenverkehr

Im Schienenverkehr ist die prozentuale Zunahme mit 60% am kleinsten. Es gibt nur einen Kostenbereich, der sich stark verändert hat: Die Gesundheitskosten der Luftbelastung nehmen um 670 Mio. CHF (oder 183%) zu (Gründe: ca. 45% höhere Immissionen (Aktualisierung Pollumap-Modell), höhere Belastungs-Wirkungs-Beziehungen und drei neue Krankheitsbilder). Die übrigen Kostenbereiche verändern sich nur wenig, und positive und negative Veränderungen heben sich in etwa auf. *Die noch nicht neu ermittelten Lärmkosten werden gemäss der bisherigen Methodik berechnet und hier übernommen.*

Abbildung 19-41: Externe Kosten Sicht Verkehrsteilnehmende im Schienenverkehr: Vergleich der bisherigen und neuen Berechnungen für 2021 (Lärm wie bisher)

Vergleich neue versus bisherige Berechnung 2021 (in Mio. CHF)	Bisherige Berechnung	Neue Berechnung	Veränderung in %	Veränderung in Mio. CHF
Schienenverkehr				
Gesundheit Luft	367	1'040	183%	673
Gebäude Luft	29	45	58%	17
Ernteauffälle Luft	1	1	12%	0
Waldschäden Luft	1	1	6%	0
Biodiversitätsverluste Luft	1	1	-1%	-0
Lärm	417	417	0%	-
Klima	4	12	210%	8
Natur und Landschaft	136	134	-2%	-3
Bodenschäden	31	35	13%	4
Vor- und nachgelagerte Prozesse	80	101	27%	21
Unfälle	36	36	0%	-0
Städtische Räume	39	-	-100%	-39
Total	1'141	1'823	60%	682

19.6.4 Luftverkehr

Im Luftverkehr ist die prozentuale Zunahme mit 186% am grössten unter den vier Verkehrsträgern. Die Zunahme um 1.5 Mrd. CHF ist vor allem auf den neu deutlich höheren Klimakostensatz zurückzuführen: Die Klimakosten steigen um 1.2 Mrd. CHF (oder um 213%). Der höhere Klimakostensatz führt zusammen mit den neuen Datengrundlagen (Mobitool statt Ecoinvent) auch zu höheren Kosten durch vor- und nachgelagerte Effekte (0.3 Mrd. CHF bzw. +214%). Die prozentuale Zunahme ist auch bei den Gesundheitskosten der Luftbelastung hoch (+195%), absolut macht es jedoch weniger aus (0.04 Mrd. CHF) – die Gründe sind dieselben wie im Schienenverkehr (ca. 45% höhere Immissionen, höhere Belastungs-Wirkungs-Beziehungen und drei neue Krankheitsbilder). *Die noch nicht neu ermittelten Lärmkosten werden gemäss der bisherigen Methodik berechnet und hier übernommen.*

Abbildung 19-42: Externe Kosten Sicht Verkehrsteilnehmende im Luftverkehr: Vergleich der bisherigen und neuen Berechnungen für 2021 (Lärm wie bisher)

Vergleich neue versus bisherige Berechnung 2021 (in Mio. CHF)	Bisherige Berechnung	Neue Berechnung	Veränderung in %	Veränderung in Mio. CHF
Luftverkehr				
Gesundheit Luft	23	67	195%	44
Gebäude Luft	2	3	47%	1
Ernteauffälle Luft	1	1	12%	0
Waldschäden Luft	1	1	2%	0
Biodiversitätsverluste Luft	2	2	-1%	-0
Lärm	69	69	0%	-
Klima	561	1'757	213%	1'197
Natur und Landschaft	7	7	0%	-0
Bodenschäden	-	-	0%	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	130	408	214%	278
Unfälle	22	22	-1%	-0
Total	818	2'337	186%	1'519

19.6.5 Schiffsverkehr

Im Schiffsverkehr nehmen die Kosten um mehr als den Faktor 2.5 oder um 187 Mio. CHF zu. Dies ist vor allem auf die Gesundheitsschäden der Luftbelastung (+142 Mio. CHF oder +195%) – die Gründe sind dieselben wie beim Schienen- und Luftverkehr. Durch den höheren Klimakostensatz nehmen auch die Klimakosten (+30 Mio. CHF oder +210%) sowie die Kosten im Bereich vor- und nachgelagerten Prozesse (+10 Mio. CHF, +285%) zu. Die übrigen Kostenbereiche nehmen um höchstens +4 Mio. CHF zu.

Abbildung 19-43: Externe Kosten Sicht Verkehrsteilnehmende im Schiffsverkehr: Vergleich der bisherigen und neuen Berechnungen für 2021 (Lärm wie bisher)

Vergleich neue versus bisherige Berechnung 2021 (in Mio. CHF)	Bisherige Berechnung	Neue Berechnung	Veränderung in %	Veränderung in Mio. CHF
Schiffsverkehr				
Gesundheit Luft	73	215	195%	142
Gebäude Luft	6	9	63%	4
Ernteauffälle Luft	3	4	12%	0
Waldschäden Luft	3	4	6%	0
Biodiversitätsverluste Luft	5	5	-1%	-0
Lärm	-	-	0%	-
Klima	14	45	210%	30
Natur und Landschaft	5	5	0%	-0
Bodenschäden	-	-	0%	-
Vor- und nachgelagerte Prozesse	4	14	285%	10
Unfälle	1	1	4%	0
Total	115	301	163%	187

19.7 Entwicklung der externen Kosten 2010 bis 2021

19.7.1 Vorgehen für die Rückrechnung

Um die Resultate im Zeitablauf konsistent und vergleichbar zu machen, sind Rückrechnungen nötig. Im Rahmen der Arbeiten werden daher basierend auf den neuen Ergebnissen 2021 auch die Ergebnisse 2010 bis 2020 zurückgerechnet. Dazu wird folgendes Vorgehen gewählt:

- Berechnung der externen Effekte 2021 mit dem bisherigen Excel-Tool⁴⁴² (bzw. ohne Berücksichtigung der aktualisierten Methoden und Datengrundlagen) – ergibt die Resultate «2021 bisher»
- Berechnung der externen Effekte 2021 mit den überarbeiteten Datengrundlagen und Berechnungsmethoden (z.B. neuer Klimakostensatz, Emissionsfaktoren, Krankheitsbilder, etc.) mit dem neuen Python-Berechnungstool – ergibt die Resultate «2021 neu»
- Bestimmung der prozentualen Differenz zwischen «2021 bisher» und «2021 neu» (siehe Unterkapitel 9 von jedem Kapitel eines Kostenbereichs), differenziert nach:
 - Kosten- / Nutzenbereichen (Gesundheit Luft, Klima, Unfälle etc.),
 - Verkehrsträgern (Strasse, Schiene, Luftverkehr, Schiff) und Verkehrsart (Personenverkehr, Güterverkehr)
 - Verkehrsmitteln für den Strassenverkehr (Personenwagen, Lieferwagen, etc.)

Die berechneten prozentualen Differenzen zwischen «2021 bisher» und «2021 neu» werden auf die (bereits zu einem früheren Zeitpunkt berechneten) externen Effekte der Jahre 2010 bis 2020 angewendet.⁴⁴³ Mit diesem Vorgehen kann pragmatisch eine bereinigte Zeitreihe 2010 – 2020 erstellt werden.

Gewisse Ergebnisse und Differenzierungen sind neu verfügbar (z.B. Elektromobilität, nach Kanton). Da dazu keine «bisherigen» Ergebnisse vorliegen, war es nicht möglich, diese Aspekte der Zeitreihe rückwirkend zu berechnen. Kapitel 19.7.2 enthält die zusammengefassten Ergebnisse nach Verkehrsträger und Kapitel 19.7.3 nach Kostenbereichen. Detailliertere Ergebnisse (nach Kostenbereichen und Verkehrsträger, nach Verkehrsmitteln oder Personen- / Güterverkehr) sind auf der ARE-Website verfügbar.

⁴⁴² Basierend auf INFRAS und EcoPlan (2019)

⁴⁴³ Im Bereich Natur und Landschaft wurden die Anpassungsfaktoren für die Strasse korrigiert, um den durch eine Statistikrevision bedingten Anstieg der Autobahnlänge in den BFS-Daten zu neutralisieren und eine Korrektur der Reihe aufgrund einer Differenz, die nur die 2020-2021 Jahre betrifft, zu vermeiden (siehe Kapitel 12).

In den Bereichen Luftverschmutzung Gesundheit und Gebäude wurde nach der alten Methode (wegen fehlenden Grundlagen) für Trolleys und Trams keine Kosten angegeben. Nun sind neue Effektschätzer verfügbar. Für diese Fahrzeugkategorien wurden die Kosten rückwirkend auf der Grundlage der Fahrleistung pro Verkehrsmittel zugewiesen, wobei angenommen wurde, dass das Verhältnis zwischen den Kosten pro Fahrzeugkilometer für Trolleys und Trams und den Kosten pro Fahrzeugkilometer für die übrigen Strassenverkehrsmittel Luftverschmutzung oder Bodenschäden im Laufe der Zeit konstant bleibt.

Der Bereich Kosten in städtischen Räumen wurde nicht mehr nach der neuen Methode berechnet und daher auch in den Rückrechnungen 2010-2020 gestrichen

19.7.2 Resultate nach Verkehrsträger

Disclaimer: Der Bereich Lärm wurde noch nicht überarbeitet. Um Vergleiche von einem Jahr zum anderen zu ermöglichen, wird der Lärmbereich *nach der bisherigen Methodik*⁴⁴⁴ für alle Jahre inklusive 2021 in die Summen unten einbezogen.

Abbildung 19-44 und Abbildung 19-45 zeigen die Entwicklungen 2010-2021 der externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende nach Verkehrsträgern. Es sind zwei Zeiträume zu unterscheiden. Zunächst eine Periode des stetigen Anstiegs zwischen 2010 und 2019 für alle Verkehrsträger ausser dem Schiffsverkehr.⁴⁴⁵ Die externen Kosten sind in diesem Zeitraum um 13 % gestiegen, d.h. um 1.4 % pro Jahr.

Abbildung 19-44: Entwicklung der externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende pro Verkehrsträger 2010 bis 2021 (Niveau, Differenz und Index), Rückrechnungen basierend auf Datengrundlagen und Methode 2021

Externe Kosten (Mio CHF)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Strassenverkehr	21'734	21'907	21'995	21'350	21'412	21'485	22'198	22'651	22'864	23'177	19'888	21'589
Schienenverkehr	1'635	1'678	1'727	1'730	1'798	1'806	1'812	1'816	1'899	1'969	1'755	1'823
Luftverkehr	2'809	3'116	3'217	3'272	3'502	3'585	3'929	4'116	4'402	4'571	2'008	2'345
Schiffsverkehr	319	318	313	301	254	245	247	254	248	284	243	301
Total	26'497	27'019	27'251	26'653	26'966	27'121	28'186	28'836	29'412	30'001	23'895	26'058
Differenz zu 2010 (Mio CHF)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Strassenverkehr	0	173	261	-384	-323	-250	463	917	1'129	1'443	-1'846	-146
Schienenverkehr	0	42	92	94	163	171	177	180	264	334	120	188
Luftverkehr	0	307	407	463	693	775	1'120	1'307	1'593	1'762	-801	-464
Schiffsverkehr	0	-1	-6	-17	-64	-74	-72	-65	-71	-35	-76	-17
Total	0	521	754	156	468	623	1'689	2'339	2'915	3'504	-2'602	-439
Index 2010 =100	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Strassenverkehr	100	101	101	98	99	99	102	104	105	107	92	99
Schienenverkehr	100	103	106	106	110	110	111	111	116	120	107	111
Luftverkehr	100	111	115	116	125	128	140	147	157	163	71	83
Schiffsverkehr	100	100	98	95	80	77	78	80	78	89	76	95
Total	100	102	103	101	102	102	106	109	111	113	90	98

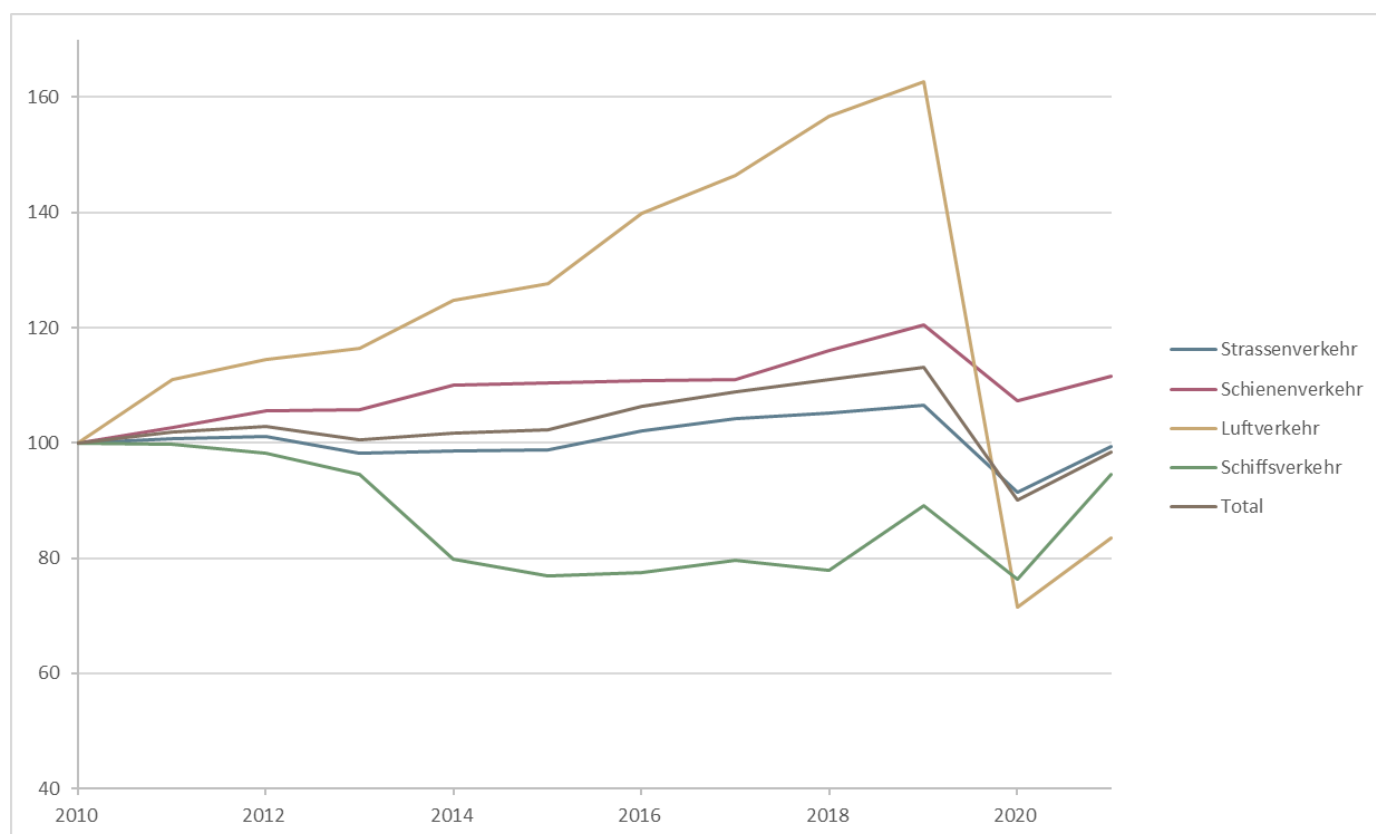
Danach wirkte sich die Covid-Pandemie stark aus und führte zwischen 2019 und 2020 zu einem Rückgang der externen Kosten um rund 6 Milliarden Franken. Auch das Jahr 2021 war noch durch die Pandemie beeinflusst. Die Kosten lagen tiefer als 2010. Die Verkehrsträger sind unterschiedlich betroffen, am stärksten der Luftverkehr: Die externen Kosten im Jahr 2021 sind 17% unter dem Niveau von 2010 und ca. halb so hoch wie 2019. Der Schienenverkehr hingegen weist 2021 11%

⁴⁴⁴ Basierend auf INFRAS und Ecomplan (2019)

⁴⁴⁵ Siehe Ecomplan; INFRAS (2019), S.161: «Dieser ist auf die abnehmende Anzahl Schiffe zurückzuführen. Die überproportionale Abnahme vom Jahr 2013 zum Jahr 2014 ist einem methodischen Bruch bei der Erfassung der Schiffe durch die Vereinigung der Schifffahrtsämter geschuldet und betrifft vor allem die Güterverkehrsschiffe.»

höhere Kosten als 2010 auf, und ca. 7% tiefere als 2019. Die externen Kosten des Strassenverkehrs sind aufgrund der Pandemie zwischen 2019 und 2020 um 14% gesunken. Im Jahr 2021 sind sie wieder angestiegen und liegen um 7% unter dem Niveau von 2019, nur knapp 1% unter dem Niveau von 2010. Der Schiffsverkehr liegt 2021 6% über dem Niveau von 2019, nachdem die externen Kosten zwischen 2019 und 2020 um 14 % gesunken waren.

Abbildung 19-45: Entwicklung der externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende pro Verkehrsträger 2010 bis 2021 (Index 2010), Rückrechnungen basierend auf Datengrundlagen und Methode 2021



Die Entwicklung der Kilometerleistung ist der wichtigste Erklärungsfaktor für alle Verkehrsträger. Folgende Abbildung zeigt die relevanten Entwicklungen auf. Die Kosten reagieren weniger als proportional zu den gefahrenen Kilometern, was vor allem auf technologische Entwicklungen hin zu effizienteren und saubereren Motoren und höhere Internalisierungsbeträge zurückzuführen ist.

Abbildung 19-46: Entwicklung der Fahrleistung pro Verkehrsträger 2010 bis 2021 (Niveau und Index 2010)

Fahrleistung	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Strassenverkehr (Mio. Fzkm)	67'646	68'528	69'757	70'911	72'070	73'277	74'537	75'657	76'378	76'948	65'618	68'595
Schienenverkehr (Mio. Zugkm)	211	210	212	216	220	223	227	226	226	229	222	233
Luftverkehr (Anzahl Bewegungen Linien- und Charterverkehr)	416'111	450'690	455'422	447'737	454'837	460'978	468'226	467'263	471'872	469'667	166'758	191'219
Schiffsverkehr - Personenverkehr (Mio. Schiffskm)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Schiffsverkehr - Güterverkehr (Fahrzeugbestand Güterschiff Rhein)	74	73	74	69	70	70	64	70	61	53	50	55
Index Fahrleistung 2010 = 100	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Strassenverkehr (Mio. Fzkm)	100	101	103	105	107	108	110	112	113	114	97	101
Schienenverkehr (Mio. Zugkm)	100	100	100	102	105	106	108	107	107	109	105	111
Luftverkehr (Anzahl Bewegungen Linien- und Charterverkehr)	100	108	109	108	109	111	113	112	113	113	40	46
Schiffsverkehr - Personenverkehr (Mio. Schiffskm)	100	99	100	99	99	99	101	94	96	96	69	79
Schiffsverkehr - Güterverkehr (Fahrzeugbestand Güterschiff Rhein)	100	99	100	93	95	95	86	95	82	72	68	74

Quelle: BFS, Fahrleistungen und Fahrzeugbewegungen im Personenverkehr; Leistungen im Güterverkehr (Zeitreihen). Fahrleistung der in- und ausländischen Fahrzeuge nach Fahrzeugart; Fahrzeuge und Transportmittelbestände des Güterverkehrs

19.7.3 Resultate nach Kostenbereich

Abbildung 19-47 und Abbildung 19-48 zeigen die Entwicklungen 2010-2021 der externen Kosten nach Kostenbereich. Im Allgemeinen folgen die Resultate der Entwicklung der Fahrleistung, gedämpft durch technologische Verbesserungen (z.B. Luftverschmutzung) oder verstärkt durch steigende Kostensätze (z.B. Klima). Der Bereich Unfälle stellt eine bemerkenswerte Ausnahme dar, da die Kosten seit 2010 fast kontinuierlich gesunken sind. Dieser Rückgang ist hauptsächlich auf die Verbesserung der Verkehrssicherheit auf der Strasse zurückzuführen.

Abbildung 19-47: Entwicklung der externen Kosten und Nutzen aus Sicht Verkehrsteilnehmende pro Kostenbereich 2010 bis 2021 (Niveau, Differenz und Index), Rückrechnungen basierend auf Datengrundlagen und Methode 2021

Externe Kosten (Mio CHF)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gesundheit Luft	5'598	5'686	5'755	5'856	5'963	6'016	6'207	6'192	6'367	6'505	5'443	5'938
Gebäude Luft	277	275	268	264	255	256	263	262	264	269	217	260
Ernteauffälle Luft	73	66	64	59	68	75	71	69	75	77	66	58
Waldschäden Luft	57	57	54	57	59	65	65	65	66	67	57	55
Biodiversitätsverluste Luft	153	148	141	136	130	122	120	116	113	109	86	86
Lärm*	2'332	2'378	2'420	2'463	2'587	2'636	2'683	2'716	2'781	2'820	2'529	2'607
Klima	6'660	7'044	7'388	7'467	7'744	7'821	8'445	8'774	9'067	9'229	6'055	7'044
Natur und Landschaft	1'008	1'042	1'056	1'070	1'069	1'067	1'071	1'072	1'080	1'087	1'091	1'118
Bodenschäden	163	170	173	178	180	181	186	187	190	193	177	190
Vor- und nachgelagerte Prozesse	4'292	4'346	4'370	4'394	4'417	4'433	4'694	4'861	5'027	5'189	4'447	4'775
Unfälle	6'483	6'433	6'150	5'302	5'047	4'949	4'863	5'084	4'925	4'967	4'306	4'484
LSVA	-598	-626	-588	-593	-553	-502	-481	-563	-543	-510	-580	-556
Total	26'497	27'019	27'251	26'653	26'966	27'121	28'186	28'836	29'412	30'001	23'895	26'058
Externe Gesundheitsnutzen	4'460	4'649	4'744	4'841	4'982	4'990	4'993	4'956	4'991	5'164	5'542	5'617
Differenz zu 2010 (in Mio CHF)	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gesundheit Luft	0	88	157	258	365	418	609	594	769	907	-155	340
Gebäude Luft	0	-2	-9	-13	-22	-22	-14	-15	-13	-8	-60	-18
Ernteauffälle Luft	0	-7	-9	-14	-4	2	-1	-4	3	5	-7	-15
Waldschäden Luft	0	-1	-3	0	2	8	7	7	9	9	0	-3
Biodiversitätsverluste Luft	0	-5	-11	-16	-23	-31	-33	-36	-40	-44	-66	-67
Lärm*	0	46	88	131	255	304	351	384	450	488	197	275
Klima	0	385	728	807	1'085	1'161	1'785	2'115	2'407	2'569	-605	384
Natur und Landschaft	0	34	48	61	60	59	62	64	71	79	83	109
Bodenschäden	0	8	11	16	17	19	23	25	27	30	14	27
Vor- und nachgelagerte Prozesse	0	54	78	102	125	141	402	569	735	897	155	484
Unfälle	0	-49	-333	-1'180	-1'436	-1'533	-1'620	-1'398	-1'558	-1'516	-2'177	-1'998
Total	0	550	744	151	424	527	1'572	2'304	2'860	3'416	-2'620	-481
Externe Gesundheitsnutzen	0	189	284	381	522	530	533	496	531	704	1'082	1'157
Index 2010 = 100	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gesundheit Luft	100	102	103	105	107	107	111	111	114	116	97	106
Gebäude Luft	100	99	97	95	92	92	95	95	95	97	78	94
Ernteauffälle Luft	100	91	88	81	94	103	98	94	104	106	91	80
Waldschäden Luft	100	99	94	99	103	114	113	113	115	116	99	95
Biodiversitätsverluste Luft	100	97	93	89	85	80	78	76	74	71	57	56
Lärm*	100	102	104	106	111	113	115	116	119	121	108	112
Klima	100	106	111	112	116	117	127	132	136	139	91	106
Natur und Landschaft	100	103	105	106	106	106	106	106	107	108	108	111
Bodenschäden	100	105	107	110	111	111	114	115	117	119	109	117
Vor- und nachgelagerte Prozesse	100	101	102	102	103	103	109	113	117	121	104	111
Unfälle	100	99	95	82	78	76	75	78	76	77	66	69
Total	100	102	103	101	102	102	106	109	111	113	90	98
Externe Gesundheitsnutzen	100	104	106	109	112	112	112	111	112	116	124	126

Abbildung 19-48: Entwicklung der externen Kosten aus Sicht Verkehrsteilnehmende für die grössten Kostenbereiche (> 2 Mrd. CHF) 2010 bis 2021 (Index 2010), Rückrechnungen basierend auf Datengrundlagen und Methode 2021



20 Anhang A: Gemeinsame Datengrundlagen

Der vorliegende Anhang enthält sämtliche Datengrundlagen, die in mehreren Kostenbereichen zur Anwendung kommen. Aus den einzelnen Kostenbereichen wird jeweils bei Verwendung gemeinsamer Daten auf diesen Anhang verwiesen.

20.1 Fahr- und Verkehrsleistungen

20.1.1 Fahr- und Verkehrsleistungen MIV

Für die Fahrleistungen (in Fahrzeugkilometern [Fzkm]) und die Verkehrsleistungen (in Personen-[pkm] bzw. Tonnenkilometern [tkm]) im motorisierten Individualverkehr werden die offiziellen Daten des BFS für das Jahr 2021 verwendet, die in der folgenden Abbildung zusammengestellt sind. Ausgenommen davon sind die Angaben zu den Mofas: Gegenüber den BFS-Zahlen werden davon die Fzkm der schnellen E-Bikes abgezogen, da sie gemäss unserer Definition nicht zu den Mofas gehören.⁴⁴⁶ Zudem sind in der Totalspalte auch die Fzkm bzw. pkm des Fuss- und Veloverkehrs enthalten, die unten hergeleitet werden.

Abbildung 20-1: Fahr- und Verkehrsleistungen in der Schweiz im Jahr 2021 im Strassenverkehr

	Personenverkehr							Güterverkehr			Gesamt- total
	Motorisierter privater Personenverkehr				Öffentlicher Personenverkehr			Li	LW	SS	
	PW	GW	MR	Mofa	Bus	Trolley	Tram				
Mio. Fzkm 2021	51'384.6	139.1	1'762.5	62.0	311.2	29.5	34.2	4'915.1	1'302.2	1'003.4	68'095.5
Mio. pkm 2021	80'111.8	2'938.4	1'843.5	62.0	2'369.7	430.7	814.2				95'721.9
Mio. tkm 2021								889.6	7'006.1	9'552.5	17'448.1

PW = Personenwagen, GW = Gesellschaftswagen, MR = Motorrad, Li = Lieferwagen, LW = Lastwagen, SS = Sattelschlepper.

Quellen: Fzkm - PV: BFS - Fahrleistungen und Fahrzeugbewegungen im Personenverkehr T.11.4.1.1 (Stand Dezember 2023)

Fzkm - GV: BFS - Fahrleistung der in- und ausländischen Fahrzeuge nach Fahrzeugart T.11.5.GTS-E21 (Leistungen der Güterfahrzeuge. Zeitreihen) (Stand November 2023)

pkm: BFS - Verkehrsleistungen im Personenverkehr T.11.4.1.2 (Stand Dezember 2023)

tkm: BFS - Transportleistung der in- und ausländischen Fahrzeuge nach Fahrzeugart T.11.5.GTS-E23 (Stand November 2023)

⁴⁴⁶ Für die Herleitung der Fzkm der E-Bikes verweisen wir auf die Ausführungen im folgenden Kapitel 20.1.2. Zudem werden gemäss Absprache mit dem Auftraggeber die leichten Sattelzüge und Sattelmotorfahrzeuge zusammen mit den Sattelschleppern ausgewiesen.

20.1.2 Verkehrsleistungen Fuss- und Veloverkehr

Die Verkehrsleistungen im Fuss- und Veloverkehr (Distanz, Dauer und Geschwindigkeit) werden aus den Daten des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021 hergeleitet, unterschieden nach Verkehrsmittel (Fuss, Velo, Pedelec, E-Bike, fäG (fahrzeugähnliche Geräte)) und Altersgruppe.⁴⁴⁷

Analog der Methode von 2015 werden Etappen, die nicht einem Transportzweck dienen (Wandern, Joggen), ausgeschlossen, basierend auf Etappendistanz in Kombination mit Aktivität am Etappenzielort.⁴⁴⁸

Um übermässigen Einfluss von Extremwerten bei der Berechnung der Durchschnittsgeschwindigkeitswerte für die Bestimmung der Gesundheitsnutzen in Kapitel 15⁴⁴⁹ zu verhindern, werden Extremwerte in den Daten gekappt (d.h. auf zulässige Maximalwerte reduziert – vgl. die folgenden beiden Abbildungen).

Abbildung 20-2: Maximal zulässige Distanzen, Dauern und Geschwindigkeiten pro Etappe⁴⁵⁰

Verkehrsmittel	Max. Distanz (km)	Max. Dauer (min)	Max. Geschwindigkeit (km/h)
Fuss (ohne fäG)	10	60	10
Velo	30	60	35
Pedelec	30	60	35
E-Bike	50	60	50

Die durchschnittliche Dauer und Geschwindigkeit werden pro Verkehrsmittel und Altersgruppe berechnet. Die Geschwindigkeit wird zur Herleitung der Intensität der körperlichen Aktivität verwendet, welche – multipliziert mit der Dauer – die Belastung durch die körperliche Aktivität ergibt.

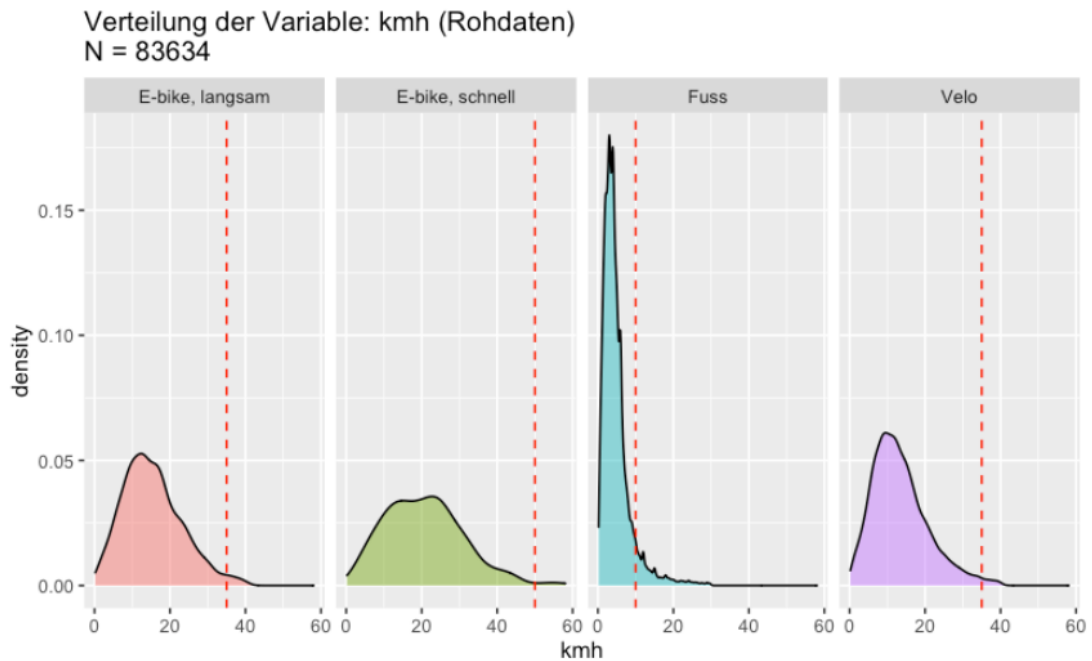
⁴⁴⁷ Die Unterscheidung in Altersgruppen wird durch die verfügbaren Daten für die Baseline Risiken diktiert. Für Mortalitäts-effekte werden 5-Jahres Altersklassen unterschieden, für Krankheitsbilder werden vier Altersgruppen unterschieden (bis 14, 15-39, 40-69, 70+)

⁴⁴⁸ Ausgeschlossen werden insbesondere das Wandern (1256 Fussetappen von mehr als 3km Länge mit Aktivität am Etappenziel "Wandern") und Sport zu Fuss (567 Fussetappen von mehr als 1km Länge mit Aktivität am Etappenziel "Aktiver Sport").

⁴⁴⁹ Da fäG in Kapitel 15 nicht berechnet werden können, werden sie auch hier nicht betrachtet.

⁴⁵⁰ Lange Etappendauer oder -Distanz ist nicht per se problematisch, aber bei der Berechnung der Geschwindigkeit multiplizieren sich die in diesen selbstberichteten (d.h. nicht direkt gemessenen) Angaben enthaltenen Fehler. Dieser Effekt wird durch das Kappen reduziert. Das Kappen der maximal zulässigen Geschwindigkeit betrifft 8% der Fussetappen und weniger als 2% der (Elektro-) Velo-Etappen.

Abbildung 20-3: Verteilung der Geschwindigkeiten nach Verkehrsmittel; Werte rechts der roten Linie werden durch den Obergrenzwert ersetzt (MZMV 2021)



Insgesamt wurden im Fuss- und Veloverkehr im Jahr 2021 7'150 Mio. Personenkilometer zurückgelegt. Ein Grossteil davon (59%) entfällt auf den Fussverkehr, 30% auf den Veloverkehr, 7% auf Pedelecs, und je 2% auf E-Bikes und fäG.

Abbildung 20-4: Verkehrsleistungen im Fuss- und Veloverkehr

	E-Bike	Pedelec	Velo	fäG	Fuss	Total
Geschwindigkeit (km/h)	22.2	15.4	13.6	7.3	4.3	
Etappen (pro Person und Tag)	0.01	0.03	0.20	0.03	1.54	
Dauer (Minuten pro Person und Tag)	0.16	0.82	4.00	0.51	26.59	
Distanz (km pro Person und Tag)	0.05	0.16	0.73	0.04	1.42	
Verkehrsleistung (Mio. pkm)	148.4	482.6	2'163.6	126.5	4'229.7	7'150.8

20.1.3 Fahr- und Verkehrsleistungen Schienenverkehr

Auch im Schienenverkehr stammen die Daten zu den Fahr- und Verkehrsleistungen aus den vom BFS veröffentlichten Daten.

Abbildung 20-5: Fahr- und Verkehrsleistungen in der Schweiz im Jahr 2021 im Schienenverkehr

	Personen- verkehr	Güter- verkehr	Total
Mio. Zugkm	205.00	27.30	232.30
Mio. pkm	14'308		
Mio. Ntkm		12'024	
Mio. NNtkm		10'398	

Quellen:

Zugkm - PV: BFS - Fahrleistungen und Fahrzeugbewegungen im Personenverkehr T.11.4.1.1 (Stand Dezember 2023)

Zugkm – GV: BFS - Fahrzeugbewegungen und Fahrleistungen im Güterverkehr T.11.5.1.1 (Stand November 2023)

pkm: BFS - Verkehrsleistungen im Personenverkehr T.11.4.1.2 (Stand Dezember 2023)

Ntkm/NNtkm: BFS - Verkehrsleistung im Güterverkehr T.11.5.1.2 (Stand November 2023)

Die Verkehrsleistungen im **Luft- und Schiffsverkehr** werden ebenfalls vom BFS übernommen und hier nicht separat dargestellt, sie sind aber aus den Abbildungen in Kapitel 19 ersichtlich.

20.1.4 Differenzierung nach Raumtypen

Für die Differenzierung der Fahr- und Verkehrsleistungen im Strassen- und Schienenverkehr nach dem Raumtyp (dicht, mitteldicht und gering besiedelt) wurden uns vom ARE Auswertungen aus den nationalen Verkehrsmodellen (Nationales Personenverkehrsmodell NPVM und Güterverkehrsmodell) zur Verfügung gestellt. Dabei wurde der durchschnittliche Werktagsverkehr (DWV) im Ist-Zustand 2017+ ausgewertet.⁴⁵¹ In diesen Auswertungen wurden die Fahrleistungen⁴⁵² nach Gemeinden differenziert (Stand Gemeinden 1.1.2020). Zudem gibt die DEGURBA-Gemeindetypologie des BFS an, welche Gemeinden als dicht besiedelt, mitteldicht besiedelt bzw. gering besiedelt gelten. Für jede Gemeinde wurden die Fahrleistungen aus dem nationalen Personenverkehrsmodell ausgewertet, wobei zusätzlich folgende Differenzierungen vorgenommen wurden:

- **Strassenverkehr:** Differenzierung nach **Autobahn, ausserorts und innerorts**, wobei innerorts als Strecken mit maximal 60 km/h zulässiger Höchstgeschwindigkeit definiert sind und ausserorts als Strecken mit mehr als 60 km/h.⁴⁵³ Diese Differenzierung wird verwendet, um die Emissionen, die ebenfalls nach Autobahn, ausserorts und innerorts unterschieden werden können, genauer bestimmen zu können.
- Die Strecken wurden zudem nach **bebaut und unbebaut** (bzw. innerhalb / ausserhalb des Siedlungsgebiets) differenziert. Dies erfolgte über einen Verschnitt der Strecken im GIS mit dem Layer SwissNAMES^{3D} (aus SwissTLM^{3D} der Swisstopo) für Siedlungsgebiete. Dies wurde auch

⁴⁵¹ Im Vergleich zum bisherigen Ist-Zustand 2017 gibt es im Zustand 2017+ mehr Anbindungen und somit eine bessere Auslastung des nachgeordneten Strassennetzes sowie neu die Unterscheidung Velo und E-Bike (vorher gab es nur Velo).

⁴⁵² Auf Auswertungen der Personen- und Tonnenkilometer musste – ausser im öffentlichen Verkehr – verzichtet werden, da dies zu aufwändig wäre. Pkm und tkm werden in der Folge analog zu den Fzkm auf die Raumtypen verteilt.

⁴⁵³ Rampen (Autobahnein- und -ausfahrten) werden je nach zulässiger Höchstgeschwindigkeit auf innerorts oder ausserorts verteilt.

für Autobahnen und Schienenstrecken durchgeführt. Diese Unterscheidung wird benötigt, weil lokale Gesundheits-⁴⁵⁴ und Gebäudeschäden nur im bebauten Gebiet auftreten können.

- Die Auswertungen wurden im Strassenverkehr für die folgenden Fahrzeugkategorien durchgeführt: Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen, Lastenzüge, Autobusse und Trolleybusse (pkm und Fzkm)⁴⁵⁵, Trams (pkm und Tramkm), Fussverkehr⁴⁵⁶, Veloverkehr und E-Bike-Verkehr (nicht differenziert nach Pedelec und E-Bike). Für die im nationalen Personenverkehrsmodell fehlenden Verkehrsmittel wird wie folgt vorgegangen:⁴⁵⁷
 - Cars werden gleich verteilt wie Lastwagen.⁴⁵⁸
 - Motorräder werden analog den Personenwagen differenziert.⁴⁵⁹
 - Mofas werden wie E-Bikes behandelt.
 - FäG werden gemäss der Verteilung der Fussgänger aufgegliedert.
- Der **Schienenpersonenverkehr** wird ebenfalls mit dem NPVM und dem Layer SwissNAMES^{3D} auf bebaut und unbebaut aufgeteilt. Für den Schienenpersonenverkehr liegen wie für den übrigen ÖV-Daten für die pkm und die Zugkm vor.
- Im **Schienengüterverkehr** erfolgt im nationalen Verkehrsmodell keine Umlegung auf das Netz, so dass keine Streckenbelastungen vorliegen. Deshalb werden für den Schienengüterverkehr die Grundlagedaten für das Lärmmodell sonBASE eingesetzt: Dies sind Daten zu Anzahl Zügen (am Tag und in der Nacht) und zu Streckenlängen, die vom BAFU und BAV erhoben wurden. Dabei wurden die Strecken und damit die Zugkm ebenfalls nach bebaut und unbebaut aufgeteilt (wie oben). Die Aufteilung für die Zugkm muss mangels besserer Datengrundlagen auch für die Tonnenkilometer verwendet werden.

Die so hergeleitete prozentuale Aufteilung der Fahr- bzw. Verkehrsleistungen für das Jahr 2017 wird dann auf die aktuellen absoluten Daten des BFS zu den Fahr- und Verkehrsleistungen für das Jahr 2021 angewendet. Im öffentlichen Personenverkehr kann die räumliche Verteilung der Fahr- und Verkehrsleistungen aufgrund der vorliegenden Datengrundlagen differenziert vorgenommen

⁴⁵⁴ Die Gesundheitskosten werden am Wohnort betrachtet.

⁴⁵⁵ Autobusse und Trolleybusse müssen zusammengefasst werden. Ein differenzierter Ausweis ist nicht möglich, da im NPVM die Differenzierung zwischen Auto- und Trolleybus nicht immer richtig erfasst ist.

⁴⁵⁶ Im Fussverkehr werden die Anzahl Wege nach den Gemeinden differenziert und dann wird für alle Wege die durchschnittliche Distanz der Fusswege von 1.16 km verwendet, um pkm zu ermitteln.

⁴⁵⁷ Für die räumliche Verteilung der Fahrleistung im schweren Güterverkehr ergeben sich zusätzliche Erschwernisse aufgrund der unterschiedlichen Gruppierung der Kategorien Lastwagen, Lastenzüge (= Lastwagen mit Anhänger) und Sattelschlepper in den BFS-Angaben und den NPVM-Auswertungen: Das BFS und auch wir in der vorliegenden Studie unterscheiden zwischen Lastwagen (ohne und mit Anhänger) und Sattelschleppern. Im nationalen Verkehrsmodell werden hingegen Lastenzüge und Sattelschlepper unter der Bezeichnung «Lastenzüge» zusammengefasst. Mangels anderer Daten müssen wir somit für «unsere» Kategorie «Sattelschlepper» vereinfachend die räumliche Verteilung (prozentuale Anteile der Fahrleistung in dicht, mitteldicht und gering besiedeltem Gebiet) für die Kategorie Lastenzüge aus dem nationalen Verkehrsmodell übernehmen. Für die räumliche Verteilung «unserer» Kategorie «Lastwagen» wird ein gewichteter Durchschnitt der Ergebnisse aus dem Verkehrsmodell für Lastwagen (ohne Anhänger: 80.8%) und Lastenzüge (19.2%) verwendet werden, wobei die Gewichte aus den Anteilen der Fahrzeugkilometer 2017 gemäss BFS bzw. gemäss Verkehrsmodell hergeleitet werden.

⁴⁵⁸ Busse werden im Verkehrsmodell zusammen mit den Lastwagen modelliert.

⁴⁵⁹ Motorräder werden im NPVM nicht modelliert, sondern als Aufschlag von 2% auf den Personenwagen miteinbezogen.

werden, für die anderen Verkehrsmittel müssen Fahr- und Verkehrsleistungen in gleicher Weise räumlich verteilt werden.

20.1.5 Differenzierung nach Kantonen

Die Differenzierung der Fahr- und Verkehrsleistung nach Kantonen erfolgt – ausgehend von den gemeindefeinen Daten aus dem nationalen Personenverkehrsmodell – genau gleich wie die Verteilung nach Raumtypen. Alle Erläuterungen im vorangehenden Kapitel 20.1.4 gelten somit auch für die Differenzierung nach Kantonen.

20.1.6 Differenzierung nach Antriebsarten

Die Differenzierung nach den drei Kategorien der Antriebsarten (fossil, elektrisch und Rest) betrifft die Fahrleistung des Strassenverkehrs und erfolgt über die im Handbuch Emissionsfaktoren⁴⁶⁰ (HBEFA, Version 4.2) hinterlegten prozentualen Anteile der verschiedenen Antriebsarten innerhalb einer Fahrzeugkategorie für das betreffende Jahr. Im vorliegenden Bericht und in den Berechnungen werden Benzin und Diesel zusammengefasst als fossile Antriebsart ausgewiesen, elektrisch stellt eine eigene Kategorie dar und die übrigen Emissionskonzepte (Brennstoffzellen, Erdgas) werden als Rest zusammengefasst.

20.1.7 Differenzierung Helikopter nach Personen- und Güterverkehr

Für die Aufteilung der Helikopterflüge nach Personen- und Güterverkehr wird an den bisher verwendeten Anteilen von 56% (Personen) und 44% (Fracht) festgehalten. Diese wurden für das Jahr 2010 auf Basis von Flugstunden-Angaben der Swiss Helicopter Association (SHA) ermittelt. Diese Daten werden nicht mehr erhoben, weder von der SHA noch vom BAZL.⁴⁶¹

20.2 Schadstoffemissionen

20.2.1 Strassenverkehr

Für den Strassenverkehr werden die Emissionsfaktoren aus dem HBEFA (Handbuch Emissionsfaktoren Strassenverkehr, Version 4.2)⁴⁶² für das Jahr 2021 verwendet. Dies umfasst die Emissionsfaktoren (g/Fzkm) für die Schadstoffe Cd, CH₄, CO₂, N₂O, NH₃, NO_x, Pb, PM₁₀, SO₂, Zn, sowie den Benzin-, Diesel- und Erdgasverbrauch. Das Handbuch enthält spezifische Emissionsfaktoren

⁴⁶⁰ INFRAS (2022)

⁴⁶¹ Das BAZL ermittelt die Helikopterbewegungen auf Flughäfen. Die Daten beinhalten die Anzahl Passagiere und die transportierte Fracht in Tonnen, jedoch nicht die Anzahl Flugbewegungen nach Typ (Personen- oder Frachttransport). Wird pro Passagier ein Gewicht von 80kg geschätzt, ist der Anteil des Personenverkehrs für das Jahr 2021 bei 96%. Dieser hohe Anteil ist nicht plausibel. Wahrscheinlich wird das Gesamtgewicht der Fracht massiv unterschätzt. Möglicherweise beinhalten die Daten nur die Fracht bei Start und Landung am Flughafen / Heliport und nicht die restliche Fracht, die während den Flügen ausserhalb des Flughafens auf- und abgeladen wird. Da diese Aufteilung als unplausibel eingeschätzt wird, wird an der bisherigen Aufteilung festgehalten.

⁴⁶² INFRAS (2022)

für die verschiedenen Fahrzeugkategorien⁴⁶³ und Antriebsarten, sowie differenzierte Werte für ausserorts, innerorts und Autobahn. Emissionsfaktoren für die Antriebsarten fossil, elektrisch und Rest werden als gewichteten Durchschnitt anhand der dazugehörigen Emissionskonzepte berechnet. Dabei dient der Anteil des jeweiligen Emissionskonzepts an der Fahrleistung der Fahrzeugkategorie als Gewicht. Im HBEFA werden in Bezug auf den öffentlichen Strassenverkehr nur Emissionsfaktoren für den Bus ausgewiesen, jedoch nicht für Trolleybusse und Trams. Für Trolleybusse werden darum die Emissionsfaktoren der Luftschadstoffe PM₁₀, Cd, Pb und Zn für Busse aus dem HBEFA und für das Tram werden Emissionsfaktoren aus der Ökobilanz-Datenbank Ecoinvent 3.10 verwendet.⁴⁶⁴ Bei diesen beiden Fahrzeugkategorien sind nur die genannten Luftschadstoffe relevant, da sie mit Strom betrieben werden. Für die Emissionsmengen werden die hier beschriebenen Emissionsfaktoren mit den jeweiligen Fahrleistungsdaten multipliziert. Daraus resultieren die gesamten Emissionsmengen gemäss Territorialitätsprinzip.

20.2.2 Schienenverkehr

Für den Schienenverkehr werden direkt die gesamten Emissionsmengen aus dem Treibhausgasinventar⁴⁶⁵ (CO₂, CH₄, N₂O) und dem aktuellen Luftschadstoff-Inventar der Schweiz verwendet (PM₁₀, NO_x, SO₂, NH₃)⁴⁶⁶. Die Aufteilung der gesamten Emissionen auf den Personen- und Güterverkehr erfolgt über die Anzahl Dieselloks (inkl. Strom-Diesel-Hybrid Loks), die im Güterverkehr, respektive im Personenverkehr zum Einsatz kommen. Denn insbesondere die Emissionen von NO_x, NH₃ und SO₂ stammen im Schienenverkehr aus der Treibstoffverbrennung in Dieselloks.

20.2.3 Schiffsverkehr

Werte für die jährlichen Luftschadstoffemissionen des Schiffsverkehrs stammen aus verschiedenen Quellen. Für den Güterverkehr auf dem Rhein werden für PM₁₀ und NO_x Emissionsmengen pro Schiff und Jahr Daten von Ecotransit world⁴⁶⁷ verwendet und für die CO₂-Emissionen pro Schiff und Jahr stammen die Werte aus der KfV-Statistik des BFS.⁴⁶⁸ Für den Personenschiffsverkehr und Güterverkehr auf den Seen (dazu zählen Fischer- und Arbeitsboote sowie Lastschiffe) stammen die PM₁₀-, NO_x- und CO₂-Emissionen pro Schiff und Jahr bzw. Prognosen für diese Emissionen aus der Studie «Energieverbrauch und Luftschadstoffemissionen des Non-Road-Sektors».⁴⁶⁹ Daten aus dem Luftschadstoffinventar (EMEP-Datenbank) und dem Treibhausgasinventar werden für die Luftschadstoffe SO₂, NH₃ und Pb bzw. für CH₄ und N₂O sowie für den Diesel- und Benzin-

⁴⁶³ Für Mofa und Motorrad, sowie für Lastwagen und Sattelschlepper werden die Emissionsfaktoren auf Subsements-Ebene von HBEFA verwendet, da für diese Verkehrsmittel auf Fahrzeugkategorie-Ebene aggregiert ausgewiesen werden.

⁴⁶⁴ Für Tram wurde bisher angenommen, dass die PM₁₀-Emissionen vernachlässigbar sind. Eine Überprüfung dieser Annahmen basierend auf Ecoinvent 9.10 ergab, dass direkte PM₁₀-Emissionen durchaus berücksichtigt werden sollten, während direkte (ohne vor- und nachgelagerte Prozesse) Zn-, Pb- und Cd- Emissionen vernachlässigbar klein sind.

⁴⁶⁵ Bundesamt für Umwelt, BAFU (2023b)

⁴⁶⁶ EMEP Center on Emission Inventories and Projections (2023)

⁴⁶⁷ IVE mbH; ifeu; INFRAS; u. a. (2019)

⁴⁶⁸ BFS Bundesamt für Statistik (2019a)

⁴⁶⁹ Bundesamt für Umwelt, BAFU (2015)

verbrauch verwendet. Diese Emissionsdaten werden mit Hilfe der NO_x-Emissionen (EMEP vs. non-road Datenbank) vom Absatzprinzip auf das Halbstreckenprinzip korrigiert.

20.2.4 Luftverkehr

Werte für die jährlichen Luftschadstoffemissionen des Luftverkehrs werden direkt vom BAZL berechnet. PM₁₀- und NO_x-Triebwerksemissionen werden differenziert nach verschiedenen Flugarten (Linien- und Charterflüge interkontinental und europäisch, Helikopter, Business Aviation und Rest General Aviation) und Infrastruktur (Landes- und Regionalflughäfen) ausgewiesen. Für die PM₁₀-Emissionen durch Abrieb (Pneu-, Brems- und Pistenabrieb) im Luftverkehr stellt ebenfalls das BAZL die Datengrundlagen zur Verfügung: Es wird mit 0.08 g / Landung für europäische Flüge bzw. 0.27 g / Landung für Interkontinentalflüge gerechnet.⁴⁷⁰ Es zeigt sich, dass der Anteil von Reifen- und Bremsabrieb an PM in der Umgebungsluft wesentlich kleiner ist als die Triebwerksemissionen (unter 1%).⁴⁷¹ Neben diesen direkten Emissionen verursacht durch den Betrieb der Flugzeuge und Helikopter, werden zusätzlich Emissionen von PM₁₀ und NO_x an den drei Landesflughäfen Zürich, Genf und Basel erhoben. Die Emissionen werden durch den Bus-, Lastwagen- und Schleppverkehr an den Flughäfen verursacht.

CO₂-Emissionen differenziert nach Flugart und Infrastruktur sowie Emissionen aus dem on-site Verkehr an den Flughäfen werden ebenfalls vom BAZL erhoben und zur Verfügung gestellt.

Aufgrund der neuen Berechnungsmethode der Kosten verursacht durch non-CO₂-Emissionen im Luftverkehr werden in dieser Studie erstmals auch spezifische Emissionsmengen von klimawirksamen NO_x und ultrafeinen Partikel ausgewiesen, die auf über 8 km Höhe ausgestossen werden.

Daten zur Emission weiterer Luftschadstoffe (SO₂, NH₃ und Pb) stammen aus dem Luftschadstoffinventar und werden anhand der NO_x-Emissionen im selben Verhältnis auf die Flugarten und Infrastrukturen aufgeteilt.

20.3 Diskontsatz

Für die Ermittlung des Diskontsatzes wird einerseits die soziale Zeitpräferenzrate und andererseits das Wachstum des Kostensatzes für die Bewertung der verlorenen Lebensjahre berücksichtigt:

- Die soziale Zeitpräferenzrate S für die Diskontierung der künftig verlorenen Lebensjahre durch luftverschmutzungs- und lärmbedingte Todesfälle im Jahr 2021 (bzw. künftig gewonnene Lebensjahre durch körperliche Betätigung im Fuss- und Veloverkehr) ergibt sich auf Basis der VSS-Norm 41 821⁴⁷² aus folgender Formel:

$$S = (1 + \delta) * (1 + g)^u - 1$$

⁴⁷⁰ Diese Zahlen beruhen auf ACRP (Airport Cooperative Research Program) o. J. und sind gemäss BAZL immer noch aktuell.

⁴⁷¹ Größere Partikel aus dem Reifen- und Bremsabrieb schaffen es nicht weit, sondern sedimentieren sofort im Pistenbereich. Zudem sind bei Regen oder feuchter Piste die PM-Emissionen bei der Landung praktisch nicht mehr vorhanden. Auch können die PM₁₀-Emissionen beim Start (im Vergleich zur Landung) vernachlässigt werden.

⁴⁷² VSS 41 821 (2006)

- wobei δ die pure oder reine Zeitpräferenzrate ist, g das reale Konsumwachstum pro Kopf und μ die Elastizität des Grenznutzens des Konsums darstellt.
- δ wird über die Sterblichkeitsrate bestimmt, die gemäss aktuellen Zahlen des BFS fast unverändert bei 0.81% liegt.
- Zufällig derselbe Wert ergibt sich für die Wachstumsprognose g bis 2050 (0.81% pro Jahr gemäss den mittleren BIP-Szenario von SECO (April 2020), die in den ARE-Branchenszenarien 2060 verwendet wurden).⁴⁷³
- Zu μ gibt es unseres Wissens keine neuen Studien für die Schweiz, so dass der bisherige Wert aus der Norm von 1.5 übernommen werden kann.
- Damit ergibt sich mit den aktualisierten Zahlen einen Diskontsatz von 2.03%, sodass weiterhin mit einem Diskontsatz von 2% gemäss VSS-Norm 41 821 gerechnet werden kann.
- Für die jährliche Zunahme des Kostensatzes zur Bewertung der verlorenen Lebensjahre wird eine reale Wachstumsrate von 1% pro Jahr zugrunde gelegt, die auf Angaben des BFS zum BIP-Wachstum basiert.⁴⁷⁴ Denn der VOSL und damit auch der VLYL nehmen mit der realen Wachstumsrate des BIP pro Kopf zu, allerdings mit einer Einkommenselastizität von 0.8 (vgl. Kapitel 20.5.5). Damit nimmt der VOSL und der VLYL jährlich um 0.8% zu.

Dies führt unter Verrechnung des Diskontsatzes mit dem Wachstum des Kostensatzes zu einem aktualisierten **(Netto-)Diskontsatz von 1.19%** ($= (1+2\%) / (1+1\%)^{0.8} - 1$), der bei der Berechnungen der verlorenen Lebensjahre verwendet wird (vgl. Kapitel 20.6).

Für die Berechnung des **Klimakostensatzes** wird zur Berechnung der soziale Zeitpräferenzrate dieselbe Gleichung verwendet (siehe Diskussion in Kapitel 10.2.1, dort genannt «Ramsey-Gleichung»). Die verwendeten Parameter sind aber andere:

- Es wird eine reine Zeitpräferenzrate von 1% verwendet (vgl. Kapitel 10.4.1). Diese konservative Wahl deckt nach Einschätzung des ARE die Unsicherheit ab, die bei der Schätzung von Klimaschäden besteht.
- Der Parameter μ hat gemäss der zugrundeliegenden Studie⁴⁷⁵ den Wert $\mu=0.8$.
- Da Klimaschäden global auftreten, muss das Wirtschaftswachstum verschiedener Welt-Regionen betrachtet werden. Dazu werden hier die im Modell FUND (Version 3.0) hinterlegten Wachstumsraten verwendet.⁴⁷⁶ Diese sinken mit der Zeit und konvergieren zwischen den Regionen.

⁴⁷³ Zum Vergleich wurde mit aktuellen Daten des BFS zudem die reale Wachstumsrate des Konsums pro Kopf in den letzten 26 Jahren bestimmt. Diese liegt mit 0.55% pro Jahr etwas tiefer als die Prognose für das künftige reale Konsumwachstum. Daraus ergäbe sich ein Diskontsatz von 1.65%. Zudem wurden auch die Szenarien zur BIP-Entwicklung in der Schweiz des Seco Staatssekretariat für Wirtschaft (2023) untersucht: Dort ergibt sich zwischen 2021 und 2050 ein reales BIP-Wachstum pro Kopf von durchschnittlich 0.86% pro Jahr (0.61% bis 1.11%) bzw. zwischen 2021 und 2070 ein solches von 0.92% (0.57% bis 1.27%). Daraus ergibt sich bis 2050 ein Diskontsatz von 2.11% (1.73% bis 2.49%) bzw. bis 2070 2.21% (1.67% bis 2.74%). Auch mit diesen Datengrundlagen scheint für den Diskontsatz 2% ein sinnvoller gerundeter Wert zu sein.

⁴⁷⁴ Das durchschnittliche jährliche Wachstum des BIP belief sich in den 20 Jahren vor der Covid-Pandemie auf 1.05%. Somit kann die bisher verwendete Wachstumsrate von 1% weiterhin für die Berechnungen benutzt werden. Das zeigen auch die Zahlen des seco zur BIP-Prognose (vgl. vorangehende Fussnote).

⁴⁷⁵ Anthoff (2007)

⁴⁷⁶ Anthoff (2007)

20.4 Aktualisierung und Übertragung von monetären Werten (Value transfer)

Über alle Kostenbereiche hinweg werden monetäre Werte, die beispielsweise aus der Vorgängerstudie übernommen werden, auf das neue Basisjahr 2021 aktualisiert. Für die Aktualisierung dieser Werte wird die Entwicklung verschiedener Indizes herangezogen. Je nach Kostenelement werden zum Teil unterschiedliche Indizes zur Aktualisierung verwendet. Der gewählte Index soll das Kostenelement bestmöglich widerspiegeln. So wird der Konsumentenpreisindex für allgemeine Verbrauchsgüter und Dienstleistungen verwendet, während der Nominallohnindex für diejenigen Kosten zum Einsatz kommt, die mit der Lohnentwicklung verbunden sind. Für Kosten im Bereich des Baus und des Erhalts der Infrastruktur oder von Bauwerken wird der Baupreisindex angewendet. Verschiedene Preisindizes für Gesundheitskosten werden für medizinische Kosten herangezogen.

Einige monetäre Werte werden von anderen Studien auf die vorliegende Studie übertragen. Das bedeutet, dass Werte aus einem Kontext (z.B. ein bestimmtes Land und ein bestimmtes Jahr) der durchgeführten Originalstudie auf einen anderen Kontext – die externen Effekte des Verkehrs in der Schweiz im Jahr 2021 – übertragen werden.

Wenn wie beim VOSL angenommen wird, dass die Kosten vom Einkommen abhängig sind, erfolgt diese Wertübertragung anhand eines unit value transfers mit Einkommensanpassung. Die folgende Formel beschreibt das angewandte Vorgehen bei einem unit value transfer mit Einkommensanpassung:

$$Wert_{B,Y} = Wert_{A,X} \left(\frac{BIP \text{ pro Kopf}_B}{BIP \text{ pro Kopf}_A} \right)^\beta * PPP_X * (1 + \% \Delta Index_{X-Y}) * (1 + \% \Delta BIP \text{ pro Kopf}_{X-Y})^\beta$$

wobei: B = Zielpopulation (Schweiz); A = Population der Originalstudie

Y = Zieljahr (2021); X = Jahr des Originalwertes

β = Einkommenselastizität (0.8)

PPP_X = Kaufkraftbereinigter Wechselkurs zum Zeitpunkt X

Im Gegensatz dazu werden bei Kostensätzen, bei denen keine Abhängigkeit vom Einkommen angenommen wird, die Werte nicht mit dem Einkommen variiert. Das bedeutet, dass die Einkommenselastizität in der oben aufgeführten Formel gleich Null ist. Beide Terme mit der Anpassung an das Einkommen nehmen dadurch den Wert eins an, und die Werte werden lediglich mit dem Wechselkurs und der Entwicklung des entsprechenden Indexwertes angepasst.

Schliesslich werden die Kostensätze zu den immateriellen Kosten, die in Marktpreisen vorliegen, noch in Faktorpreise umgewandelt (vgl. Kapitel 3.2.1).

Abbildung 20-6 liefert einen Überblick über die angewandten Indizes und Methoden in der vorliegenden Studie für die Aktualisierung und Übertragung von monetären Werten.

Abbildung 20-6: Übersicht Aktualisierung und Übertragung von monetären Werten

Kostenelement	Indizes zur Anpassung des Basisjahres	Wechselkurs bei Währungsanpassungen	Einkommensanpassung	Anpassung Marktpreise
Gesundheitskosten Luft, Lärm und Gesundheitsnutzen FVV				
VOSL / VL.YL	Kosumentenpreisindex	PPP-adjusted Wechselkurs	ja	ja
Spitalkosten	Preisindex Spitalleistungen	-	nein	nein
Medizinische Kosten (ausserhalb Spital) pro Inzidenz	Preisindex Gesundheit (je nach Kostensatz Medikamente, ärztliche Leistungen, Gesundheitspflege)	-	nein	nein
Immaterielle Kosten pro Hospitalisation bzw. Inzidenz	Nominallohnwachstum	PPP-adjusted Wechselkurs	nein	ja
Gebäudeschäden durch Luftverschmutzung				
Renovationskosten	Baupreisindex Renovation Büro (Oktober)	-	nein	nein
Erstellungskosten Gebäudehülle	Baupreisindex Hochbaupreisindex (Oktober)	-	nein	nein
Reinigungskosten	Nominallohnindex	-	nein	nein
Waldschäden durch Luftverschmutzung				
Kostensatz Sturmschaden Lothar	Nominallohnindex	-	nein	nein
Biodiversitätsverluste durch Luftverschmutzung				
Kostensätze Biodiversitätsverluste Luftschadstoffe(NEEDS 2008)	Kosumentenpreisindex	Jahresmittel-Wechselkurs	nein	nein
Klima				
Klimakostensatz	Kosumentenpreisindex, Harmonisierter Verbraucherpreisindex	PPP-adjusted Wechselkurs	ja	nein
Kosten vor- und nachgelagerte Prozesse				
Kostensätze Luftschadstoffe	Kosumentenpreisindex, Harmonisierter Verbraucherpreisindex	Jahresmittel-Wechselkurs	nein	nein
Natur und Landschaft				
Kosten für Habitatfragmentierungen (Strasse und Schiene)	Baupreisindex Tiefbau (Ø April/Oktober)	-	nein	nein
Kosten für Habitatverluste (Strasse und Schiene)	Baupreisindex Tiefbau (Ø April/Oktober)	-	nein	nein
Kosten für Habitatverluste (Schiff)	Baupreisindex Tiefbau (Ø April/Oktober)	-	nein	nein
Kostensätze je Defragmentierungsbauwerk	Baupreisindex Tiefbau (Ø April/Oktober)	-	nein	nein
Bodenschäden durch toxische Stoffe				
Deponie und Sanierungskosten	Baupreisindex	-	nein	nein
Unfälle				
Immaterielle Kosten pro Unfallopfer (analog Gesundheit Luft, Lärm etc.)	-	-	nein	nein

20.5 Kosten von Krankheits- und Todesfällen

20.5.1 Einleitung

a) Übersicht berücksichtigte Krankheitsbilder

In den Bereichen Gesundheitskosten der Luftbelastung, Gesundheitskosten des Lärms sowie Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr (FVV) werden zusätzliche bzw. vermiedene Krankheits- und Todesfälle bewertet. Das prinzipielle Vorgehen und die verwendeten Kosten-sätze sind in allen drei Bereichen gleich und wird im Folgenden erläutert. Die in den verschiedenen Bereichen berücksichtigten Krankheitsbilder und Kostenbestandteile werden in der folgenden Abbildung dargestellt (zusammen mit dem sogenannten ICD-10-Code, wobei ICD für «International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems» steht und die Ziffer 10 auf die zehnte Revision der Codes hinweist).

b) Übersicht berücksichtigte Kostenbestandteile und Berechnungskonzept

Die Gesundheitskosten setzen sich aus den folgenden Kostenbestandteilen zusammen:

- Die **medizinischen Heilungskosten** umfassen die Kosten des Ressourcenaufwands für Pflege und Genesung (stationäre und ambulante Behandlung, Arzneimittel und Analysen, ärztlich verordnete Nach- und Badekuren, Hilfsmittel und Gegenstände, welche der Heilung dienen).
- Der **Produktionsausfall** entsteht infolge von dauerhafter oder vorübergehender Arbeitsunfähigkeit der Betroffenen.
- **Wiederbesetzungskosten** werden dadurch verursacht, dass bei einem dauerhaften Ausfall einer Arbeitskraft die Stelle neu besetzt werden muss.
- Die **immateriellen Kosten** umfassen die Kosten von Leid, Schmerz, Schock und den Verlust an Lebensfreude. Diese Kosten werden mit Hilfe von Zahlungsbereitschaften ermittelt.
- Zudem fallen auch **Administrativkosten** bei Versicherungen an. Diese sind aber so gering, dass sie wie bisher nur bei den Unfällen berücksichtigt werden, da sie in den anderen Bereichen weniger als 0.5% der Kosten ausmachen dürften.⁴⁷⁷

Die Luftverschmutzung und der Lärm können auch Vermeidungskosten (z.B. Freizeitaufenthalt in wenig belasteten Gebieten, Wechsel des Wohnorts usw.) verursachen, die aber von untergeordneter Bedeutung sein dürften. Die Vermeidungskosten werden deshalb vernachlässigt (soweit sie nicht in der Zahlungsbereitschaft für die Bewertung von immateriellen Kosten enthalten sind).⁴⁷⁸

⁴⁷⁷ Ecoplan (1996), S. 71–74

⁴⁷⁸ Ecoplan; Infrass; ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin) (2004), S. 75 und 79

Abbildung 20-7: Übersicht über die berücksichtigten Krankheitsbilder

Krankheitsbild	ICD-10-Code	Krankheitsfolgen						Todesfolgen		
		Medizinische Heilungskosten		Produktionsausfälle		Immaterielle Kosten		Produktionsausfälle (verlorene Erwerbsjahre)	Wiederbesetzungskosten	Immaterielle Kosten (verlorene Lebensjahre)
		Spitalaufenthalte	Andere	Spitalaufenthalte	Andere	Spitalaufenthalte	Andere	(verlorene Erwerbsjahre)		(verlorene Lebensjahre)
Alle Krankheitsbilder	-	✓ ¹	✓	✓	1	✓		✓	✓	✓
Herz-/Kreislaufkrankungen	I00 - I99	✓ ¹	✓	✓	1	✓ ¹		✓	✓	✓
Atemwegserkrankungen	J00 - J99	✓ ¹		✓ ¹	1	✓ ¹		✓	✓	
COPD	J40 - J44	✓ ²		✓	✓	✓		✓		
Lungenkrebs	C34	✓		✓	✓	✓		✓		
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	E11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Demenz	F00 - F03 + G30 - G31	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
Depression	F32 - F33	✓		✓	✓	✓	✓	✓		
Brustkrebs	C50	✓		✓		✓		✓		
Kolonkrebs	C18	✓		✓		✓		✓		

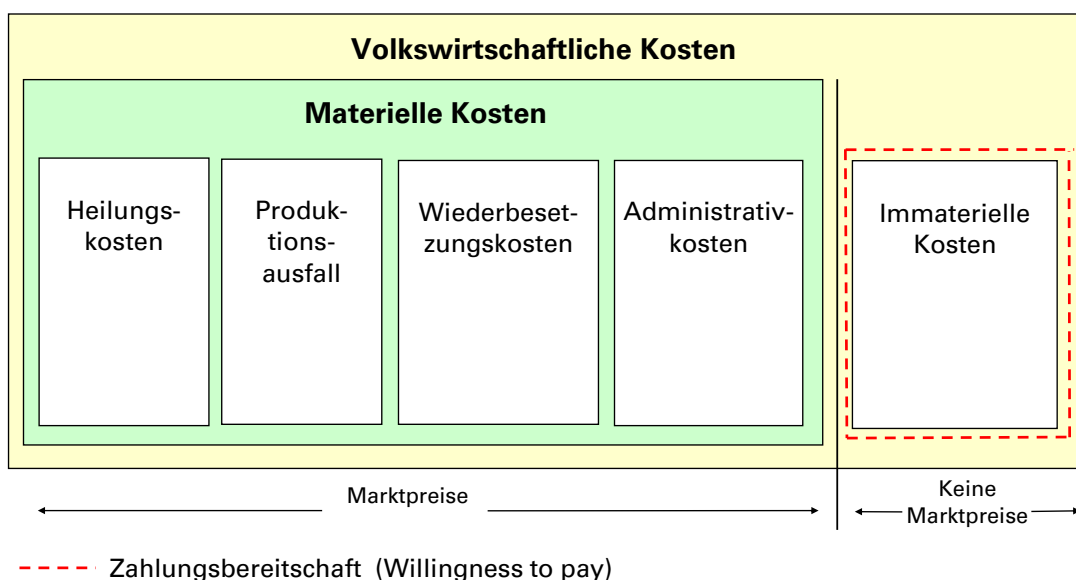
✓ Luftbelastung ✓ Lärm ✓ Gesundheitsnutzen * Zusätzlich Wiederbesetzungskosten

¹ Studie betrachtet nur Spitaltage ² Kosten durch Spitalaufenthalte in Atemwegserkrankungen enthalten

Die volkswirtschaftlichen Kosten setzen sich somit aus materiellen (medizinische Heilungskosten, Produktionsausfall und Wiederbesetzungskosten) und immateriellen Kosten zusammen. Für die materiellen Kosten liegen weitgehend Marktpreise⁴⁷⁹ vor, für die immateriellen hingegen nicht. Für die Berechnung der volkswirtschaftlichen Kosten wird folgendes Konzept verwendet (vgl. Abbildung 20-8):

- Die **immateriellen Kosten** werden mit einem Zahlungsbereitschafts-Ansatz berechnet. Die Zahlungsbereitschaft für eine Verminderung des Krankheitsrisikos entspricht dabei dem Nutzengewinn der einzelnen Individuen, wenn Schmerz, Leid und Verlust an Lebensfreude als Folge des geringeren Krankheitsrisikos abnehmen.
Es stellt sich die Frage, ob in der erfragten Zahlungsbereitschaft zum Teil auch selbst getragene Kosten in den Bereichen Heilungskosten, Produktionsausfall, Administrativkosten sowie Sachschäden, Polizei- und Rechtsfolgekosten enthalten sein könnte. In einer Schweizer Studie (vgl. folgende Box) konnte aber für den Produktionsausfall explizit nachgewiesen werden, dass dieser in den Angaben zur Zahlungsbereitschaft nicht enthalten ist. Auf Basis dieser Erkenntnis gehen wir davon aus, dass auch andere materielle Kostenbereiche in der Zahlungsbereitschaft nicht erfasst sind und diese somit nur die immateriellen Kosten umfasst.
- Beim Produktionsausfall wird der **Bruttoproduktionsausfall** miteinbezogen (vgl. folgende Box).
- Die **übrigen materiellen Kosten** – wie medizinische Heilungskosten, Wiederbesetzungskosten und Administrativkosten (wobei letztere nur im Kapitel 14 „Unfälle“ berücksichtigt werden) – werden anhand von Marktpreisen bestimmt.

Abbildung 20-8: Übersicht über die Bestandteile der Gesundheitskosten



⁴⁷⁹ Zwar gibt es beispielsweise bei den Medizinalkosten verschiedene regulatorische Vorschriften, welche die Marktkräfte von Angebot und Nachfrage einschränken. Im Unterschied zu den immateriellen Kosten ergeben sich aber grosse Kostenbestandteile (Lohn für Personal, Baukosten für Infrastruktur, Gerätekosten usw.) aus direkt beobachtbaren Marktergebnissen.

Bei der Herleitung der Kostensätze werden jeweils auch jene Kosten berücksichtigt, welche zwar im Jahr 2021 verursacht werden, aber erst in den Folgejahren anfallen (z.B. länger andauernde medizinische Behandlungskosten, Produktionsausfall nach Todesfall usw.).

Box: Brutto- versus Nettoproduktionsausfall

International wird oft nur der Netto-, nicht der Bruttoproduktionsausfall berücksichtigt, wobei sich der Nettoproduktionsausfall aus dem Bruttoproduktionsausfall abzüglich des Eigenkonsums der Betroffenen ergibt. Hintergrund für dieses Vorgehen war die Vermutung, dass in der VOSL-Zahlungsbereitschaft auch der Verlust an Eigenkonsum enthalten sein könnte, weil die Befragten in ihrer Zahlungsbereitschaft evtl. mitberücksichtigen, dass sie z.B. nach einem Unfall keinen Lohn mehr erhalten. Zur Frage, ob der Verlust an Eigenkonsum in der Zahlungsbereitschaft enthalten ist oder nicht, lagen lange keine spezifischen Untersuchungen vor. Im Sinne des at least Ansatzes wurde dementsprechend davon ausgegangen, dass der Verlust an Eigenkonsum im VOSL enthalten ist.

In einer Studie aus dem Jahr 2015 ist B,S,S.⁴⁸⁰ unseres Wissens erstmals dieser Frage explizit nachgegangen. Die Studie kommt zum Schluss, dass in den Antworten zur Zahlungsbereitschaft der Verlust an Eigenkonsum klar nicht enthalten ist. Die Befragten berücksichtigen in der Regel in ihren Antworten somit ihren potenziellen Lohnausfall nicht. Als Folge dieser Ergebnisse wurde die Berechnungsmethode in der Schweiz angepasst: Es wird nicht nur der Nettoproduktionsausfall, sondern der gesamte Bruttoproduktionsausfall berücksichtigt.⁴⁸¹

c) Übersicht zum Bewertungskonzept

Ausgangspunkt für die Bewertung der Gesundheitskosten sind bei fast allen in dieser Studie berücksichtigten Krankheitsbildern die sogenannten Inzidenzen, also die Anzahl an neuen Krankheitsfällen, die in der Schweizer Bevölkerung während eines Jahres auftreten und deren Krankheitsfolgen sich über mehrere Jahre hinziehen können.⁴⁸² Mit Hilfe von Belastungs-Wirkungs-Beziehungen (sogenannten Effektschätzern für die Inzidenz) wird abgeschätzt, wie stark sich bei den berücksichtigten Krankheitsbildern die Anzahl neu aufgetretener Krankheitsfälle durch Luft- oder Lärmbelastung erhöht bzw. durch Bewegung im Fuss- und Veloverkehr vermindert.

Pro berücksichtigtes Krankheitsbild werden – ausgehend von dieser relativen Veränderung in der Inzidenz – anschliessend die Krankheitsfolgen z.B. in Form von Spitaleintritten, Arztbesuchen, Me-

⁴⁸⁰ B,B,S. (2015), vgl. auch Ecoplan (2016), Kapitel 3.3.

⁴⁸¹ Ecoplan (2016), Kapitel 3.3

⁴⁸² Im Unterschied hierzu wird mit der Prävalenz angegeben, wie hoch der Bevölkerungsanteil ist, der zu einem bestimmten Zeitpunkt von einer bestimmten Krankheit betroffen ist.

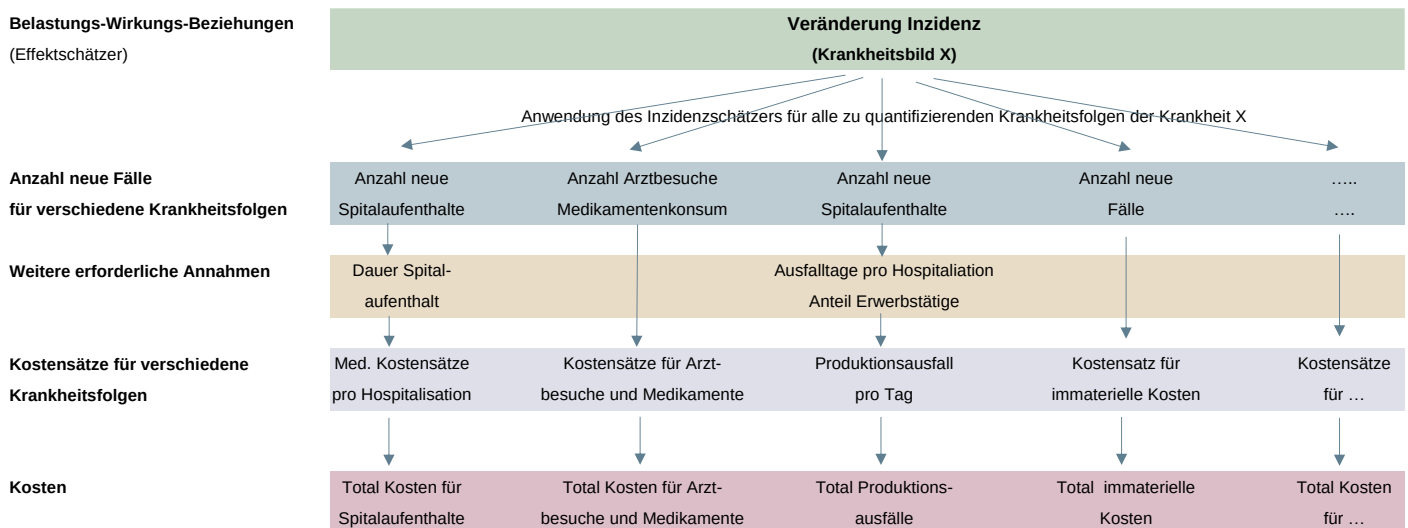
dikamentenkonsum, Ausfalltagen usw. ermittelt (vgl. folgende Abbildung). Hierbei wird angenommen, dass sich diese Krankheitsfolgen im gleichen Ausmass (d.h. mit dem gleichen Prozentsatz) verändern wie die relative Veränderung bei der Inzidenz (bzw. Zu- oder Abnahme der neu auftretenden Krankheitsfälle).

In einem nächsten Berechnungsschritt werden die einzelnen Krankheitsfolgen mit Kostensätzen und allenfalls weiteren benötigten Annahmen (z.B. Dauer einer Krankheit oder Anzahl Ausfalltage pro Spitaleintritt) hinterlegt, um so pro Krankheitsfolge die Kosten berechnen zu können.

Bei einzelnen Krankheitsbildern liegen für gewisse Krankheitsfolgen zum Teil spezifische Effektschätzer vor (z.B. für Spitaleintritte durch Herz-/Kreislaufferkrankungen und für Spitaleintritte durch Atemwegserkrankungen aufgrund Luftverschmutzung). In diesen wenigen Fällen erfolgt die Abschätzung der Gesundheitskosten durch Spitalaufenthalte über die spezifischen Effektschätzer (und nicht über die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen für die Inzidenz).

Im Folgenden leiten wir für die in Abbildung ausgewiesenen Krankheitsbilder die jeweiligen Kostensätze für die berücksichtigten Krankheitsfolgen (medizinische Heilungskosten, Produktionsausfälle, Wiederbesetzungskosten, immaterielle Kosten) her. Für die Herleitung der Kostensätze wurde grundsätzlich die neuere Literatur und aktuelle Datenquellen zum Thema aufgearbeitet, um zu überprüfen, ob die bisher verwendeten Kosten-sätze immer noch anwendbar sind oder angepasst werden müssen bzw. um neue Kostensätze zu finden.

Abbildung 20-9: Vorgehen zur Abschätzung der Gesundheitskosten



20.5.2 Medizinische Heilungskosten

Bei den medizinischen Heilungskosten (und später auch bei den Produktionsausfällen sowie bei den immateriellen Kosten) wird unterschieden zwischen Kosten, die im Zusammenhang mit Spitalaufenthalten stehen und Kosten, die sich aus den übrigen Krankheitsfolgen ergeben. Der Grund für diese Unterscheidung liegt vor allem in der Datenverfügbarkeit:

- Für Kosten im Zusammenhang mit Spitalaufenthalten stehen meist relativ gute, aktuelle Datengrundlagen zur Verfügung.
- Für die übrigen Kosten für die weiteren Krankheitsfolgen gibt es hingegen Lücken in der Datenverfügbarkeit bzw. muss auf ältere Daten zurückgegriffen werden.

a) Spitalkosten

Für die Spitalkosten beruhen die verwendeten Kostensätze auf der «Statistik diagnosebezogener Fallkosten» und der «Medizinischen Statistik der Krankenhäuser»⁴⁸³ des BFS – beide für das Jahr 2021. Die Fallkosten wurden uns vom BFS für die hier relevanten ICD 10-Kategorien zur Verfügung gestellt. Gemäss SwissDRG AG, welche die Daten für das BFS aufbereitet, sind in den Angaben nur die Kosten in der allgemeinen Abteilung enthalten. Um auch die Kosten der Halbprivat- und Privatabteilung zu berücksichtigen, werden die Kostenzahlen der SwissDRG noch mit einem Faktor 1.09 hochgerechnet.⁴⁸⁴ Ausgehend von den relevanten Krankheitsbildern und der durchschnittlichen Aufenthaltsdauer⁴⁸⁵ wurden die durchschnittlichen Spitalkosten pro Spitaltag ermittelt.

Wie die folgende Abbildung zeigt, schwanken die Spitalkosten pro Hospitalisation je nach Krankheitsbild zwischen knapp 15'000 CHF (Brustkrebs) und gut 26'000 CHF (Depression). Diese Unterschiede sind einerseits auf die unterschiedlich langen Aufenthaltsdauern zurückzuführen, die zwischen 5 Tagen (Brustkrebs) und 32 Tagen (Depression) schwanken. Andererseits ergeben sich auch grosse Unterschiede beim Kostensatz pro Spitaltag, der zwischen 800 CHF (Depression) und 2'900 CHF (Brustkrebs) liegt, wobei die ersten Tage tendenziell teurer sind, da dann eine allfällige Operation stattfindet.

Im Vergleich zur bisher verwendeten Hochrechnung für 2021, die auf Daten aus dem Jahr 2010 beruht, führen die neuen Datengrundlagen bei den untersuchten Krankheitsbildern zu einer starken Erhöhung der Kosten (pro Hospitalisation durchschnittlich +31%, pro Spitaltag +75%). Bei einigen Krankheitsbildern liegen die neuen Kostensätze pro Spitaltag ungefähr doppelt so hoch wie bisher. Insgesamt erachten wir die neuen Datengrundlagen als deutlich zuverlässiger: Erstens sind sie aktuell (die bisherigen Daten von 2010 sind in der bisherigen Form nicht mehr verfügbar). Zweitens beruhen sie auf einer breiten Abdeckung von 77% aller Hospitalisationen (anstatt der bisherigen Stichprobe bei 50 von ca. 300 Spitälern mit ca. 34% aller Hospitalisationen). Drittens erfolgt

⁴⁸³ BFS Bundesamt für Statistik (2022c)

⁴⁸⁴ Basierend auf den BFS Bundesamt für Statistik (2022b) werden die Spitalkosten ohne Leistungen von Privatversicherungen auf die gesamten Spitalkosten hochgerechnet. Der verwendete Faktor von 1.09 wurde mit Fachleuten der SwissDRG AG abgesprochen.

⁴⁸⁵ Die durchschnittliche Aufenthaltsdauer pro ICD10-Kategorie wird anhand der medizinischen Statistik der Krankenhäuser (BFS) ermittelt.

die Zuteilung der Spitalkosten auf die uns interessierenden Krankheitsbilder automatisiert und damit präziser (neu direkt über ICD-10-Code, bisher händische Zuordnung).

Abbildung 20-10: Durchschnittliche Fallkosten pro Hospitalisation und Spitaltag

Krankheitsbild	ICD-10-Code	Durchschnittliche Fallkosten pro Spitaleintritt	Durchschnittliche Aufenthaltsdauer	Durchschnittliche Fallkosten pro Spitaltag
Herz-Kreislaufkrankungen	I00–I99	20'047	8.3	2'409
Atemwegserkrankungen	J00–J98	16'494	7.7	2'134
Lungenkrebs	C34	20'887	10.1	2'068
Diabetes Typ 2	E11	18'751	10.6	1'762
Demenz	F00-F03, G30-31	23'664	20.7	1'142
Depression	F32-F33	26'312	32.8	802
Brustkrebs	C50	14'803	5.1	2'910
Kolonkrebs	C18	25'649	11.2	2'296

Zudem kann bei Demenz und Depression mit den neuen Datengrundlagen auf eine bisherige Spezialauswertung verzichtet werden. Dies hat zur Folge, dass die Kosten pro Spitaltag bei Demenz und Depression neu um gut 30% tiefer ausfallen als bisher. Auch hier sind die neuen Datengrundlagen deutlich besser abgestützt als die bisherigen.

b) Weitere medizinische Heilungskosten

Für die weiteren medizinischen Heilungskosten (ausserhalb von Spitalaufenthalten) ergab die eingeschränkte Literaturanalyse für die verschiedenen Krankheitsbilder die folgenden Kostensätze:⁴⁸⁶

- Für **Tage mit eingeschränkter Aktivität** liegen nach wie vor keine Daten vor, da bei diesem Krankheitsbild unklar ist, ob überhaupt ärztliche Leistungen / Medikamente beansprucht werden. Dies führt tendenziell zu einer Unterschätzung (at least Ansatz).
- **COPD:** Für die medizinischen Kosten von Arztbesuchen und für Medikamente (ohne Spitalkosten) gibt es eine Schweizer Untersuchung der Daten der Krankenversicherung Helsana,⁴⁸⁷ welche ein Ergebnis von 887 CHF im Jahr 2016 ausweist bzw. von 847 CHF im Jahr 2021.⁴⁸⁸ Dieses Ergebnis wird durch eine englische Studie in seiner Grössenordnung bestätigt.⁴⁸⁹ Bei

⁴⁸⁶ Auftragsgemäss wurde die Suche nach weiteren Kosten ausserhalb von Spitalaufenthalten nur für die – gegenüber der Studie INFRAS; Ecoplan (2019) – im Luftbelastungsbereich neu aufgenommenen Krankheitsbilder (COPD, Lungenkrebs, Diabetes, Demenz) durchgeführt. Für die bisher bereits berücksichtigten Krankheitsbilder (Herz- / Kreislaufkrankungen, Depression, Brustkrebs, Kolonkrebs) stand kein Budget zur Ermittlung von Kostensätzen ausserhalb von Spitalaufenthalten zur Verfügung. Dieser Hinweis gilt auch für Ermittlung der Kostensätze bei den Produktionsausfällen (Kapitel 20.5.3b) und immateriellen Kosten (20.5.6b).

⁴⁸⁷ Schmidt; Brunner; Wieser; u. a. (2018)

⁴⁸⁸ Für die Hochrechnung wenden wir je 50% der Preisentwicklung bei ärztlichen Leistungen und bei Medikamenten (gemäss BFS) an.

⁴⁸⁹ In Public Health England (2018), S. 25 wird ein Wert von 527 £ (2015) angegeben oder umgerechnet 918 CHF (2021).

Bronchitis sind wir bisher davon ausgegangen, dass die Krankheit 15 Jahre dauert. Bronchitis, das Teil von COPD ist, wird in der Literatur bei der Bestimmung der Kostensätze oft mit COPD gleichgesetzt. Deshalb verwenden wir die bisherige Annahme von 15 Jahren auch für COPD. Die Kosten von 847 CHF fallen also während 15 Jahren an bzw. abdiskontiert sozusagen während 14.01 Jahren, womit mit Kosten von **11'874 CHF** pro neu auftretenden Fall von COPD zu rechnen ist.

- **Lungenkrebs:** In einer älteren Schweizer Studie⁴⁹⁰ wurden die medizinischen Kosten von Lungenkrebs untersucht. Ein Grossteil der Kosten (knapp 75%) sind Spitalkosten, so dass sich für die übrigen Kosten (Diagnose und Behandlung) ein Wert von 4'952 € (1999) oder umgerechnet **7'542 CHF** (2021) ergibt.⁴⁹¹
- **Diabetes:** Für Medikamentenkosten (1'442 CHF 2011) und Arztkosten (905 CHF 2011) kann auf eine Schweizer Studie⁴⁹² zurückgegriffen werden, die wiederum auf einer anderen Schweizer Studie beruht.⁴⁹³ Mit der Entwicklung der Medikamenten- bzw. Arztkosten gemäss BFS fortgeschrieben ergeben sich damit pro Patient jährliche Kosten von gut 2'000 CHF. Zudem ist aus derselben Studie⁴⁹⁴ bekannt, dass Diabetes durchschnittlich 9.2 Jahre dauert (was in einer englischen Studie⁴⁹⁵ mit 9.1 Jahren bestätigt wird) – oder abdiskontiert 8.8 Jahre. Durch das Neuauftreten der Krankheit, die ca. 9 Jahre dauert, entstehen also Medikamenten- und Arztkosten von insgesamt **18'194 CHF**.
- **Demenz:**⁴⁹⁶ Für die weiteren medizinischen Heilungskosten bei der Demenz liegt eine Studie aus der Schweiz von 2019 vor:⁴⁹⁷ Darin werden die Kosten der Demenz in der Schweiz im Jahr 2017 bestimmt, die sich auf 11.8 Mrd. CHF oder jährlich knapp 80'000 CHF pro Demenzfall belaufen. Die Berechnung der Demenzkosten basiert auf dieser Studie und nimmt verschiedene zusätzliche Abgrenzungen vor. Dies mit dem Ziel, nur die Kosten zu berücksichtigen, die durch Demenz verursacht werden und Kosten auszuschliessen, die einem Demenzpatienten zugeschrieben werden, aber auch ohne Demenz anfallen würden. Dies betrifft die Kosten für die Unterbringung in Heimen, alltägliche Haushaltsarbeiten wie Kochen oder Einkaufen (diese Kosten würden auch ohne Demenz anfallen) und die Pflege aufgrund anderer Krankheiten. Zwei Arten von Kosten werden im Vergleich zur Ecoplan-Studie 2019 angepasst: Die Heimkosten und Kosten für informelle Pflege und Betreuung (Kosten der Pflege durch Angehörige):
 - Die Ecoplan-Studie 2019 ordnet alle Betriebskosten des Heimes minus 16'000 CHF pro Jahr und Klient für Lebensunterhalt und Wohnen (vgl. S.16) dem dementen Patienten zu. Für die vorliegenden Berechnungen werden alle Kosten für Pension, Betreuung, Therapie, Medikamente, Ärzte und Material abgezogen, ausser die obligatorische Pflege im Sinne des

⁴⁹⁰ Dedes; Szucs; Bodis; u. a. (2004) Eine aktuellere Studie konnte nicht gefunden werden.

⁴⁹¹ Umrechnung mit dem in der Studie verwendeten € - CHF-Wechselkurs und der Entwicklung der Arztkosten.

⁴⁹² Wieser; Tomonaga; Riguzzi; u. a. (2014), S. 63

⁴⁹³ Schmitt-Koopmann; Schwenkglenks; Spinass; u. a. (2004)

⁴⁹⁴ Schmitt-Koopmann; Schwenkglenks; Spinass; u. a. (2004)

⁴⁹⁵ UK-Department für Environment, Food & Rural Affairs (2023), S. 4.4, table 8

⁴⁹⁶ Der im Folgenden hergeleitete Kostensatz wurde vom ARE erarbeitet.

⁴⁹⁷ Ecoplan (2019)

KVG⁴⁹⁸. Die Arzt- und Medikamentenkosten werden in einer separaten Kostenkategorie (siehe Abbildung 20-11) geführt.

Mit diesem Vorgehen unterschätzen wir einerseits die durch Demenz verursachten Heimkosten, da die Betreuung (z.B. beim Anziehen oder Duschen) nicht einbezogen wird. Andererseits beinhalten die KVG-Heimkosten auch die Pflege für andere Krankheiten, was zu einer leichten Überschätzung führt. Insgesamt überwiegt wahrscheinlich der erste Effekt, so dass die Heimkosten hier eine at least Schätzung (vgl. Kapitel 3.3) darstellen. Der Anteil der obligatorischen Pflege im Sinne des KVG macht basierend auf der Statistik der sozialmedizinischen Institutionen (BFS) 41% der Heimkosten aus.⁴⁹⁹

- Die informellen Pflegekosten werden im Vergleich zu Ecoplan 2019 in zweierlei Hinsicht angepasst. Erstens werden weniger Stunden für informelle Pflege berücksichtigt: Von den 141 Millionen Stunden pro Jahr werden folgende Stunden abgezogen:
 - 67 Millionen Stunden für die tägliche Hilfe, da diese Aufgaben auch ohne Demenz erledigt werden müssen und daher nur ein Transfer entsteht, aber keine zusätzlichen Kosten.
 - 4 Millionen Stunden, da dies der Betreuung durch die Spitex entspricht und eine Doppelzählung zu verhindern ist

Zweitens werden die so berechneten Stunden mit einem tieferen Kostensatz monetarisiert. Anstatt den Spezialistenlohn wie in Ecoplan 2019 zu verwenden (ca. 40 Franken pro Stunde), wird eine tiefere Schätzung basierend auf den AHV/IV Betreuungsgutschriften angewendet: Die Sozialversicherungen AHV/IV erkennen das Recht an, bei der Pflege von Angehörigen ein Einkommen in Höhe der dreifachen minimalen AHV-Rente zu deklarieren. Pro Jahr sind dies 42'300 CHF im Jahr 2017. Dieser Betrag geteilt durch die Anzahl der Stunden, die durchschnittlich für die Betreuung eines dementen Angehörigen aufgewendet werden⁵⁰⁰, ergibt knapp 27 CHF pro Stunde.

Die übrigen Kosten (Ärzte, Medikamente, Spitex) stammen ohne Anpassung aus Ecoplan 2019. Mit den oben beschriebenen Anpassungen kostet ein Demenzfall im Jahr 2017 also 33'700 (ohne Spitalkosten). Rechnet man die Kosten auf 2021 hoch,⁵⁰¹ so ergeben sich die in der folgenden Abbildung dargestellten Kosten von knapp 33'500 CHF pro Jahr.

Gemäss Alzheimer's Research UK hat eine demenzkranke Person nach ihrer Diagnose im Durchschnitt eine Lebenserwartung von 5.4 Jahren.⁵⁰² Abdiskontiert über diese 5.4 Jahre ergeben sich somit nach der Diagnose Kosten von ca. 175'000 CHF (ohne Spitalkosten). Diese Berechnung berücksichtigt nicht, dass die Schwere der Demenz und damit auch ihre Kosten mit der Zeit zunehmen. Wird dieser Effekt mit Kostensätzen pro Jahr für leichte, mittelschwere

⁴⁹⁸ Siehe Art.7 Krankenpflege-Leistungsverordnung, KLV

⁴⁹⁹ BFS Bundesamt für Statistik (2018)

⁵⁰⁰ Ecoplan (2019), Abbildung 15

⁵⁰¹ Je nach Kostenbestandteil mit den Preisindices des BFS für Medikamente, ärztliche Leistungen, Spitalleistungen oder Gesundheitspflege bzw. bei der informellen Pflege mit dem Nominallohnwachstum.

⁵⁰² Nach der Diagnose beträgt die durchschnittliche Lebenserwartung bei Alzheimer 5.8 Jahre und bei Nicht-Alzheimer-Demenz 4.68 Jahre (Liang; Li; Yang; u. a. (2021)). Dies wird gewichtet mit der Häufigkeit von Alzheimer (60%) und Nicht-Alzheimer (40% – Alzheimer's Research UK (2024)).

und schwere Demenz⁵⁰³ grob abgeschätzt, reduziert sich der abdiskontierte Betrag auf rund **168'800 CHF pro Inzidenz**.

Abbildung 20-11: Kosten der Demenz pro Fall und Jahr

	CHF pro Fall und Jahr (2021)
Spitalkosten	1'789
Heimkosten	17'486
Spitexkosten	2'737
Arztkosten	228
Medikamentenkosten	102
Kosten der interdisziplinären Diagnostik (memory clinics)	173
Informelle Pflege und Betreuung	12'756
Total	35'272
Total ohne Spital	33'483

Quelle: Eigene Auswertung basierend auf Ecoplan (2019)

- **Übrige Krankheitsbilder:** Für Herz- / Kreislauferkrankungen, Depression, Brustkrebs und Kolonkrebs werden auftragsgemäss nur die Spitalkosten berücksichtigt und keine weiteren Heilungskosten ermittelt.⁵⁰⁴ Verschiedene Kosten wie z.B. Medikamentenkonsum sowie für Arzt- und Psychiaterbesuche müssen damit vernachlässigt werden. Relevant dürfte dies vor allem für Depressionen sein.⁵⁰⁵ Zudem haben z.B. rund neun von zehn Personen mit depressiven Symptomen gleichzeitig körperliche Beschwerden oder Schmerzen. Besonders häufig sind Rückenbeschwerden und Schlafstörungen.⁵⁰⁶ Diese Auswirkungen können wie erwähnt hier nicht miteinbezogen werden.
- Bei den **verlorenen Lebensjahren** (bzw. frühzeitigen Todesfällen) werden keine weiteren medizinischen Behandlungskosten berücksichtigt (soweit sie nicht in den Spitalkosten enthalten sind). Zudem werden die Bestattungskosten vernachlässigt.⁵⁰⁷

Insgesamt ergibt sich aus diesen Abgrenzungen eine Unterschätzung der tatsächlichen Kosten.

⁵⁰³ Ecoplan (2019), S. 31

⁵⁰⁴ Vgl. Fussnote 486, S. 474.

⁵⁰⁵ Diese Kosten dürften bei der Depression insgesamt in der Grössenordnung von 32% der Spitalkosten liegen (Tomonaga Y.; Haettenschwiler J.; Hatzinger M.; u. a. (2013), S. 244).

⁵⁰⁶ Tomonaga Y.; Haettenschwiler J.; Hatzinger M.; u. a. (2013), S. 245; BFS Bundesamt für Statistik (2013)

⁵⁰⁷ Die Bestattungskosten fallen früher oder später bei allen Menschen an. Bei einem frühzeitigen Tod fallen sie aufgrund des Diskontierungseffektes etwas höher aus.

20.5.3 Produktionsausfall

Der Bruttoproduktionsausfall wird wie folgt (und methodisch gleich wie bisher) ermittelt: Ausgangslage bilden das verfügbare Bruttoeinkommen der Schweiz im Jahre 2021 (456'783 Mio. CHF gemäss BFS). Dieses wird durch die Zahl der Erwerbstätigen (4'420'299 Erwerbstätige⁵⁰⁸) dividiert. Daraus ergibt sich pro Erwerbstätigen ein Bruttoeinkommensausfall von 97'100 CHF pro Person und Jahr (zu Faktorpreisen⁵⁰⁹). Dazu ist noch die Zunahme der betrieblichen Vorsorgeansprüche (36'572 Mio. CHF) zu rechnen, die sich pro Erwerbstätigen auf 7'774 CHF belaufen. Dies ergibt einen Bruttoproduktionsausfall (inkl. Vorsorgeansprüche) von 104'874 CHF pro Jahr und Erwerbstätigen oder 287 CHF pro Tag und Erwerbstätigen.

Beim Nettoproduktionsausfall wird vom Bruttoproduktionsausfall der «letzte Verbrauch der Gebietsansässigen» von 365'286 Mio. CHF (gemäss BFS) abgezogen, bevor die Zunahme betrieblicher Vorsorgeansprüche addiert wird. Dies ergibt einen Nettoproduktionsausfall (inkl. Vorsorgeansprüche) von 27'224 CHF pro Jahr und Erwerbstätigen oder 75 CHF pro Tag und Erwerbstätigen. Der Nettoproduktionsausfall wird für die Bewertung der externen Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr sowie für die Aufteilung der Unfallkosten auf private und externe Kosten benötigt.

Neben dem Kostensatz pro Jahr (bzw. Tag) muss auch die Anzahl der verlorenen Erwerbsjahre bei Todesfällen bzw. die Dauer des Erwerbsausfalls bei Krankheiten bestimmt werden (vgl. dazu Kapitel 20.6).

a) Kosten für Produktionsausfälle aufgrund von Spitalaufenthalten

Für die Bestimmung der Ausfalltage durch Spitalaufenthalte wird die amerikanische «Official Disability Guideline» verwendet.⁵¹⁰ Diese enthält die Anzahl der Ausfalltage pro Erwerbstätigen sehr detailliert für verschiedene Krankheitsbilder nach ICD10-Codes.⁵¹¹ Mit Hilfe dieser Angaben und der Fallzahlen in der Schweiz wurden gewichtete Durchschnitte pro Hospitalisation bestimmt, welche sich für Atemwegserkrankungen auf 36 Ausfalltage⁵¹² belaufen und für Herz- / Kreislauferkrankungen auf 66 Tage (vgl. folgende Abbildung). Diese Werte liegen im Vergleich zur Anzahl Spitaltage um den Faktor 8.0 bzw. 4.6 höher.

⁵⁰⁸ Spezialauswertung durch das BFS.

⁵⁰⁹ Wie in Kapitel 3.2 erläutert, bedeuten Faktorpreise, dass die indirekten Steuern herausgerechnet werden. Dazu wird gemäss Kapitel 3.2 durch 1.064 dividiert.

⁵¹⁰ Work Loss Data Institute (2013). Die Daten sind nicht mehr zugänglich, daher musste auf eine Aktualisierung verzichtet werden.

⁵¹¹ Die Übertragung der Daten von der USA auf die Schweiz ist selbstverständlich mit Unsicherheiten verbunden, doch führt sie gemäss Angabe einer grösseren Schweizer Krankenkasse – welche die Datenquelle ihren eigenen Berechnungen zugrunde legt – eher zu einer Unterschätzung der Ausfalltage, weil in den USA aufgrund des weniger guten Sozialversicherungsschutzes der Druck zu einer möglichst raschen Wiederaufnahme der Arbeit höher sein dürfte als in der Schweiz.

⁵¹² Für COPD (ICD-10-Code J40-J44) werden keine Kosten durch Spitalaufenthalte berechnet, weil diese bereits in den Spitalaufenthalten der Atemwegserkrankungen (J00-J99) enthalten sind. Damit wird eine Doppelzählung vermieden.

Für Diabetes bei Erwachsenen ergibt sich ein Durchschnitt von 19 Ausfalltagen (Faktor 1.8), bei Brustkrebs 29 Ausfalltage (Faktor 5.7), bei Kolonkrebs 82 Ausfalltage (Faktor 7.4) und bei der Depression 42 Ausfalltage (Faktor 1.3).⁵¹³

Wegen fehlenden Daten in der «Official Disability Guideline» zu den Ausfalltagen infolge Lungenkrebs wurde als Ausgangspunkt die Anzahl Spittage verwendet und mit dem Faktor 6.0 (Durchschnitt der anderen, hier betrachteten Krankheitsbilder) multipliziert. Daraus resultiert ein Durchschnitt von 61 Ausfalltagen.

Abbildung 20-12: Anzahl Ausfalltage, Anteil Erwerbstätige und Bruttoproduktionsausfall

Krankheitsbild	ICD-10-Code	Durchschnittliche Anzahl Ausfalltage pro Hospitalisation	Anteil Erwerbstätige	Bruttoproduktionsausfall pro Hospitalisation in CHF
Spittage wegen Herz-/Kreislaufkrankungen	I00–I99	66	29.6%	5'646
Spittage wegen Atemwegserkrankungen	J00–J98	36	36.0%	3'680
Lungenkrebs bei Erwachsenen	C34	61	36.2%	6'307
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	E11	19	33.0%	1'768
Depression bei Erwachsenen	F32-F33	42	60.2%	7'311
Brustkrebs	C50	29	43.8%	3'667
Kolonkrebs	C18	82	30.4%	7'180

Diese verminderten Ausfalltage gelten für Erwerbstätige. Nicht alle Hospitalisationen betreffen aber Erwerbstätige. Entsprechend müssen die Kostensätze pro Hospitalisation (einer beliebigen Person) noch reduziert werden. Aus den Grundlagedaten des BFS zu den Erwerbstätigen und zur Bevölkerung lässt sich ableiten, dass bei den 15-39-Jährigen 70% erwerbstätig sind, bei den 40-69-Jährigen 71% und bei den über 70-Jährigen 4% (bei den 0-14-Jährigen gibt es keine Erwerbstätigen – in diesen vier Altersklassen liegen die Spitaldaten vor). Mit diesen Angaben kann der Produktionsausfall pro Hospitalisation entsprechend angepasst werden. Je nach Alter der von einer Krankheit Betroffenen liegt der Anteil zwischen 30% und 60% (vgl. Abbildung). Es zeigt sich, dass bei Depressionen ein besonders hoher Anteil der Fälle Personen im erwerbsfähigen Alter betrifft.

Wird der Bruttoproduktionsausfall von 287 CHF pro Tag mit der Anzahl Ausfalltage und dem Anteil der Erwerbstätigen multipliziert, so ergeben sich pro Hospitalisation je nach Krankheitsbild Produktionsausfälle von 1'800 CHF (Diabetes) bis 7'300 CHF (Depression) (vgl. Abbildung).

Bei **Demenz**patienten muss aufgrund der Unheilbarkeit der Krankheit davon ausgegangen werden, dass sie nach einer Spitaleinweisung nicht mehr an ihren Arbeitsplatz zurückkehren können.

⁵¹³ Bei der Depression (ICD-10-Code F32 und F33) ist für F33 die amerikanische Angabe gemäss Work Loss Data mit 32.7 Tage tiefer als die durchschnittliche Aufenthaltsdauer im Spital in der Schweiz von 36.3 Tagen. Deshalb wird der Faktor 1.3 der Kategorie F32 auch für F33 verwendet.

Für einen Demenzfall einer 40-69-jährigen Person verwenden wir deshalb approximativ den Produktionsausfall eines 60-Jährigen (abdiskontiert 4.5 Jahre oder 472'000 CHF) und für über 70-Jährige den Produktionsausfall eines 80-Jährigen (abdiskontiert 0.08 Jahre oder 8'800 CHF).

b) Kosten für übrige Produktionsausfälle

Auch wenn keine Spitalaufenthalt nötig ist, so können diverse Krankheiten zu Ausfalltagen und damit zu Produktionsverlusten führen.⁵¹⁴

- **Tage mit eingeschränkter Aktivität:** Die Ausfalltage durch Tage mit eingeschränkter Aktivität werden direkt aus epidemiologischen Studien bestimmt (vgl. Kapitel 4.3.2). Diese können anschliessend mit dem Kostensatz pro Tag von **287 CHF** multipliziert werden.

Zudem ist zu beachten, dass alle Ausfalltage aufgrund der anderen Krankheitsbilder auch als Tage mit eingeschränkter Aktivität gelten müssen. Um Doppelzählungen zu vermeiden, werden deshalb die Produktionsausfälle aller anderen berücksichtigten Krankheitsbilder (ohne Todesfälle) hier abgezogen. Weil sich die Belastungs-Wirkungs-Beziehung für Tage mit Erwerbsausfall aber nur auf die 20-60-Jährigen bezieht, werden bei allen anderen Krankheitsbildern auch nur die Erwerbsausfälle der 20-60-Jährigen abgezogen.⁵¹⁵

- **COPD:** In den bisherigen Berechnungen wurde für Bronchitis davon ausgegangen, dass pro neuen Fall chronischer Bronchitis während 15 Jahren je ein Tag pro Jahr ausfällt, was abdiskontiert 14.01 Tage ergibt. Da Bronchitis ein Teil von COPD ist und da in der Literatur zur Bestimmung der Kostensätze Bronchitis und COPD häufig gleichgesetzt werden, übernehmen wir diese Annahme für COPD.⁵¹⁶ Multipliziert mit dem Kostensatz pro Tag (287 CHF) und dem Anteil der Erwerbstätigen von 28.8%⁵¹⁷ ergibt sich für die übrigen Produktionsausfälle ein Kostensatz von **1'160 CHF** ($= 287 * 14.01 * 28.8\%$).
- **Lungenkrebs:** Die Zahl der Ausfalltage durch Lungenkrebs wurde in einer griechischen Studie erhoben.⁵¹⁸ Über 32 Monate erheben die Autoren durchschnittlich 255 Ausfalltage (davon 14 durch Pflegepersonen und 241 durch die Patienten selbst). Gemäss Abbildung 20-12 betrifft aber nur 36.2% dieser Ausfalltage tatsächlich Erwerbstätige. Multipliziert mit 287 CHF / Tag ergibt sich somit ein Kostensatz von **26'507 CHF** pro Inzidenz. Eingeschlossen in diesen Kostensatz sind auch die Ausfalltage aufgrund von Spitalaufenthalten. Deshalb müssen bei der Berechnung die Ausfalltage bzw. Produktionsausfälle durch Spitalaufenthalte von den hier berechneten Produktionsausfällen für Inzidenzen abgezogen werden, um Doppelzählungen zu vermeiden.

⁵¹⁴ Wie in Fussnote 486, S. 474 erwähnt, konnte die Suche nach weiteren Produktionsausfällen ausserhalb von Spitalaufenthalten nur für ausgewählte Krankheitsbilder vorgenommen werden.

⁵¹⁵ Dazu wird für Hospitalisationen und Inzidenzen der Anteil der Produktionsausfälle der 20-60-Jährigen berechnet.

⁵¹⁶ Eine Literaturanalyse förderte zwar weitere Datengrundlagen zu Tage, doch sind diese so schlecht dokumentiert, dass deren Herleitung unklar bleibt und eine Abgrenzung zu den Ausfalltagen aufgrund von Spitalaufenthalten nicht möglich ist.

⁵¹⁷ Für die Herleitung dieses Anteils werden die Daten aus der Global burden of disease study (2019) für Inzidenzen nach den Altersklassen 0-14-, 15-39-, 40-69- und über 70-Jährige ausgewertet und mit den Erwerbsquoten dieser Altersklassen kombiniert.

⁵¹⁸ Zarogoulidou; Panagopoulou; Papakosta; u. a. (2015)

- **Diabetes:** Für Diabetes ist eine Grobschätzung erforderlich: Basis bildet eine Schweizer Studie, die pro Diabetes-Patienten durchschnittlich 10.3 Arztbesuche pro Jahr ausweist.⁵¹⁹ Wird pro Arztbesuch von einem Produktionsausfall von einem halben Tag ausgegangen und wird zudem berücksichtigt, dass nur 62.5%⁵¹⁷ der Patientinnen und Patienten erwerbstätig sind, so ergibt sich ein Produktionsausfall von 925 CHF pro Jahr. Da eine Diabeteserkrankung durchschnittlich 8.8 Jahre dauert (abdiskontiert, vgl. Kapitel 20.5.2b), ergibt sich daraus ein Kostensatz von **8'180 CHF** pro Neuauftreten der Krankheit (Inzidenz).⁵²⁰
- **Demenz:** Während wir bei den Spitalaufenthalten der Demenz davon ausgehen, dass betroffene Personen nicht an ihren Arbeitsplatz zurückkehren können, ist bei der Diagnose (bzw. Inzidenz) weniger klar, wie sich dies auswirkt. In der Demenzkostenstudie⁵²¹ wird z.B. argumentiert, dass Demenz hauptsächlich Menschen im fortgeschrittenen Alter betrifft, die meist nicht mehr im Erwerbsleben stehen, so dass Produktivitätsverluste der Demenzpatienten nicht berücksichtigt werden. Dabei wird allerdings vernachlässigt, dass es auch Demenzfälle im arbeitsfähigen Alter gibt und dass viele Personen auch nach dem Pensionsalter noch erwerbstätig sind. Bei einer Demenzerkrankung dürfte jedoch auf die Arbeitstätigkeit nach dem Pensionsalter verzichtet werden. Zudem dürfte in einem frühen Stadium der Demenz (z.B. bevor sie diagnostiziert wird) die Leistungsfähigkeit abnehmen. Selbst vor einem demenzbedingten Spitaleintritt ist also mit Produktionsausfällen zu rechnen. Dazu konnten jedoch **keine Datengrundlagen** gefunden werden, so dass auf eine Quantifizierung verzichtet werden muss.
- **Übrige Krankheitsbilder:** Wie bereits erwähnt werden für Herz- / Kreislauferkrankungen, Depression, Brustkrebs und Kolonkrebs nur Produktionsausfälle im Zusammenhang mit Spitalaufenthalten berücksichtigt. Auf die Quantifizierung weitere Produktionsausfälle – losgelöst von Spitalaufenthalten – wird auftragsgemäss verzichtet. Im Zusammenhang mit Depressionen weisen wir diesbezüglich auf folgende Punkte hin:
 - Selbst bei leichten Depressionen (ohne Spitalaufenthalt) können hohe volkswirtschaftliche Kosten durch **verminderte Produktivität und Arbeitsausfälle** entstehen.⁵²²
 - Insbesondere Depressionen führen immer wieder zu **Kosten bei der IV**. Da unsere Bewertung bei Depressionen aber nur über die Spitaltage geht und das Verhältnis zwischen Hospitalisationen und IV-Entschädigungen nicht bekannt ist, kann keine Abschätzung der eingesparten IV-Kosten erfolgen.⁵²³

⁵¹⁹ Schmitt-Koopmann; Schwenkglenks; Spinas; u. a. (2004), S. 5

⁵²⁰ Eine andere Schweizer Studie (Wieser; Tomonaga; Riguzzi; u. a. (2014), S. 64) weist Kosten von 2'932 CHF (2011) pro Patient und Jahr für Absentismus und Frühpensionierung aus – bzw. 3'109 CHF 2021 bei Anpassung mit Nominallohnwachstum. Über 8.8 Jahre würde sich ein Kostensatz von ca. 27'500 CHF ergeben. Die Herleitung des Kostensatzes wird jedoch in der Studie nicht erläutert, womit der Kostensatz nicht nachvollziehbar ist. Deshalb verzichten wir auf die Anwendung dieses Kostensatzes.

⁵²¹ Ecoplan (2019), S. 8

⁵²² Tomonaga Y.; Haettenschwiler J.; Hatzinger M.; u. a. (2013), S. 245; BFS Bundesamt für Statistik (2013)

⁵²³ Die IV-Kosten dürften in der Grössenordnung von 12% der Produktionsausfälle liegen (Tomonaga Y.; Haettenschwiler J.; Hatzinger M.; u. a. (2013), S. 244).

- Zudem kann nach einer Depression möglicherweise nur noch eine **weniger anspruchsvolle Arbeit** erledigt werden.⁵²⁴

20.5.4 Wiederbesetzungskosten

Nach Todesfällen von Erwerbstätigen müssen deren Stellen neu besetzt werden. Aus einer Umfrage ist bekannt, dass die Wiederbesetzungskosten ca. 50% des Jahreslohnes ausmachen.⁵²⁵ Zusammen mit dem durchschnittlichen Jahreseinkommen (gemäss BFS) folgt daraus, dass die Wiederbesetzungskosten für erwerbstätige Männer / Frauen 40'450 / 34'390 CHF betragen (zu Faktorpreisen).

Wiederbesetzungskosten entstehen nur, wenn jemand dauerhaft nicht mehr arbeiten kann. Im Rahmen der Berechnung der verlorenen Lebensjahre wird auch bestimmt, wie viele Todesfälle von Erwerbstätigen zu beklagen sind (differenziert nach Geschlecht). Die dort ermittelte Zahl der Todesfälle kann direkt mit den hier hergeleiteten Kostensätzen multipliziert werden.

Bei den Spitaleintritten durch Demenz gehen wir wie erwähnt davon aus, dass sie nicht an ihren Arbeitsplatz zurückkehren. Allerdings ist bei den Demenzfällen nur bekannt, wie viele Spitaleintritte sich insgesamt (nach 3 Altersklassen) ergeben, nicht aber der Anteil der Erwerbstätigen, bei denen sich Wiederbesetzungskosten ergeben. Um diese Lücke zu schliessen, wird der obige Kostensatz mit der Bevölkerungsgrösse und der Zahl der Erwerbstätigen nach den Altersklassen umgerechnet und zwischen Männern und Frauen gemittelt. Dies ergibt zur Bewertung der eingesparten Wiederbesetzungskosten folgende Ansätze: 27'000 CHF für 40-69-Jährige und 2'000 CHF bei den über 70-Jährigen. Gemittelt mit der Anzahl Spitaleintritte von Demenzpatienten (gemäss BFS) in den zwei Altersklassen ergibt dies einen Durchschnittswert von 4'800 CHF.

Bei Lungenkrebspatienten zeigt eine Schweizer Studie⁵²⁶, dass bereits nach 5 Jahren 80% der Patienten verstorben sind. Die Wiederbesetzungskosten für diese verstorbenen Patienten sind in den Berechnungen bereits bei den Todesfällen enthalten.

Auch bei Depressionspatienten ist damit zu rechnen, dass sie möglicherweise ihrer bisherigen Arbeit nicht mehr nachgehen können. Die dabei entstehenden Wiederbesetzungskosten (bzw. deren Einsparung) werden hier jedoch vernachlässigt, weil nicht bekannt ist, wie gross der Anteil der Depressionspatienten ist, die nicht mehr an ihre Arbeit zurückkehren können.

⁵²⁴ So zeigt Baer N.; Schuler D.; Füglistner-Dousse S.; u. a. (2013), S. 100, dass bei starker Depression bei Männern der Lohn sinkt (bei Frauen ist kein Effekt feststellbar).

⁵²⁵ Ecoplan (2002), S. 42

⁵²⁶ Galli; Rohrmann; Lorez (2019)

20.5.5 Immaterielle Kosten von Todesfällen

a) Herleitung des VOSL

Der bisher verwendete VOSL (value of statistical life) aus der OECD-Studie (2012) basiert auf der weltweit grössten Metaanalyse von VOSL-Studien⁵²⁷, in der nur qualitativ hochwertige Studien berücksichtigt wurden. Konkret wurden 261 VOSL-Resultate aus 28 Studien untersucht und daraus ein Basiswert von 3.0 Mio. US\$ (2005) für die OECD-Länder abgeleitet. Der ermittelte Wert weist eine **Schwankungsbreite von ±50%** aus, was im Rahmen der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt wird.

Ausgehend von dieser Studie⁵²⁸ wird für die vorliegende Berechnung der externen Effekte der **VOSL** auf die Schweiz angepasst und auf das Jahr 2021 fortgeschrieben⁵²⁹, was einen Wert **von 6.9 Mio. CHF (zwischen 3.5 und 10.4 Mio. CHF)** ergibt.⁵³⁰ Die Berechnungsformel für das Jahr 2021 lautet (vgl. auch Kapitel 20.4):⁵³¹

$$\begin{aligned} \text{VOSL}_{\text{CH, 2021 (CHF)}} &= \text{VOSL}_{\text{OECD, 2005, USD}} * (Y_{\text{CH, 2005}} / Y_{\text{OECD, 2005}})^{0.8} * \text{PPP}_{2005} \\ &\quad * (1 + \% \Delta P_{2005-2021}) * (1 + \% \Delta Y_{2005-2021})^{0.8} / \text{UF}_{\text{M} \rightarrow \text{F}} \\ &= 3.013 \text{ Mio. \$} * (40'213 \$ / 30'869 \$)^{0.8} * 1.69 \text{ CHF} / \$ * 1.039 * 1.167^{0.8} / 1.0642 \\ &= 6'938'682 \text{ CHF} \end{aligned}$$

$\text{VOSL}_{\text{OECD, 2005, USD}}$ = Basiswert der OECD von 3.013 Mio. US\$

$Y_{\text{CH, 2005}}$ = Reales BIP pro Kopf in der Schweiz in Kaufkraftparität 2005

$Y_{\text{OECD, 2005}}$ = Durchschnittliches reales BIP pro Kopf in der OECD in Kaufkraftparität 2005

0.8 = Einkommenselastizität des VOSL, die sich aus den OECD-Schätzungen ergibt⁵³²

PPP_{2005} = Mit der Kaufkraftparität angepasster Wechselkurs 2005

$(1 + \% \Delta P_{2005-2021})$ = Inflation in der Schweiz zwischen 2005 und 2021

$(1 + \% \Delta Y_{2005-2021})$ = Wachstum des realen BIP pro Kopf in der Schweiz von 2005 bis 2021

$\text{UF}_{\text{M} \rightarrow \text{F}}$ = Umrechnungsfaktor von Marktpreisen in Faktorpreise

b) Herleitung des VLYL

Für die Bewertung der immateriellen Kosten benutzen wir jedoch nicht den VOSL selbst, sondern den **VLYL (= value of a life year lost)**. Beim VLYL-Konzept wird nicht der einzelne Todesfall

⁵²⁷ OECD (2012)

⁵²⁸ OECD (2012)

⁵²⁹ Methodik gemäss OECD (2012) bzw. Ecoplan (2016)

⁵³⁰ Aktuell läuft bei der OECD eine Aktualisierung der Meta-Analyse von 2012. Neben Studien zu «stated preferences» sollen neu auch Studien zu «revealed preferences» berücksichtigt werden. Die Publikation dieser Arbeiten ist für die zweite Hälfte 2024 geplant und damit zu spät für das vorliegende Projekt. Eine Aktualisierung des VOSL soll deshalb erst erfolgen, wenn die neue OECD-Studie abgeschlossen ist.

⁵³¹ Für die Herleitung siehe auch Bundesamt für Raumentwicklung, ARE (2022)

⁵³² OECD (2012), S. 63–64

bewertet, sondern die durch den Todesfall verlorenen Lebensjahre. Es bietet den Vorteil, eine spezifische Bewertung nach dem Alter der verstorbenen Personen zuzulassen. Dies ist z.B. bei den luftverschmutzungsbedingten Todesopfern, bei den Todesfällen durch Unfälle im Fuss- und Veloverkehr und bei den Gesundheitsnutzen im Fuss- und Veloverkehr besonders wichtig, weil deren Alter im Durchschnitt wesentlich über demjenigen von getöteten Personen im Strassenverkehr liegt.

Meist fehlen konkrete Angaben zur Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung eines verlorenen Lebensjahres. Daher wird der VLYL aus dem VOSL abgeleitet. Dabei entspricht die abdiskontierte Summe der verlorenen Lebensjahre dem VOSL:⁵³³

$$\text{VOSL} = \text{VLYL} * \sum_{i=a}^T \frac{{}_aP_i}{(1+r)^{i-a}}$$

wobei

- T: Die maximale Lebenserwartung = 110 Jahre.
- a: Durchschnittliches Alter der Personen, deren VOSL erfragt wurde: 50 Jahre.⁵³⁴ Der vorgeschlagene VOSL aus der OECD-Studie (2012) basiert auf einer Metaanalyse von 261 Schätzungen aus dem Unfall- und Umweltbereich in einer Vielzahl von OECD-Ländern.
- ${}_aP_i$: Bedingte Wahrscheinlichkeit, dass eine Person im Alter a das Alter i erreicht. Diese wurden mit den aktuellen Daten des BFS zu den Überlebenswahrscheinlichkeiten nach 1-Jahres-Altersklassen und differenziert nach Männer und Frauen aktualisiert.
- r: Die Diskontrate beträgt wie in Kapitel 20.3 berechnet 1.19%.

Daraus ergibt sich ein **VLYL von 249'000 CHF (zwischen 125'000 und 374'000 CHF – exakt 249'018 CHF)**. Die Bewertung der verlorenen Lebensjahre entspricht dem at least Ansatz.⁵³⁵

VOSL

Die Bewertung von immateriellen Kosten bei Todes- oder Krankheitsfällen ist ausserhalb der Ökonomie wenig üblich, weil nach Ansicht Betroffener der Wert eines Menschenlebens schwer in Geldeinheiten bewertet werden kann. Die Ökonomie unternimmt nicht den Versuch, den Wert eines bestimmten Lebens zu bewerten. Ziel ist vielmehr, den **Nutzen der Risikoverminderung** zu bewerten, wenn z.B. infolge vermehrter Verkehrssicherheit die Zahl der tödlichen Strassenverkehrsunfälle abnimmt. In der Ökonomie wird in diesem Zusammenhang oft der Begriff des „**Value of Statistical Life**“ (**VOSL**) verwendet. Damit wird ausgedrückt, dass es um die Bewertung von verminderten Risiken geht, bevor die negativen

⁵³³ Ecoplan (2016), S. 45

⁵³⁴ Das Durchschnittsalter wurde aus den Daten der OECD-Studie berechnet, die auf dem Internet frei verfügbar sind (www.oecd.org/env/policies/vsl). Allerdings ist das Durchschnittsalter nicht bei allen Studien in der Datenbank angegeben, so dass der Durchschnittswert nur auf den verfügbaren Daten beruhen kann.

⁵³⁵ International erfolgt die Bewertung oft direkt über die Anzahl frühzeitiger Todesfälle und unter Verwendung des VOSL.

Folgen bereits eingetreten sind und nicht um den Wert eines bestimmten Menschenlebens, nach dem ein Unfall zum Tod dieses Menschen geführt hat.

Der VOSL wurde mittels einer Umfrage zur Zahlungsbereitschaft für eine kleine Reduktion des Todesfallrisikos bestimmt. In den Umfragen werden die Befragten mit konkreten Entscheidungen konfrontiert, die einerseits eine kleine Veränderung des Todesfallrisikos und andererseits monetäre Kosten mit sich bringen. Die Antworten ermöglichen, die Zahlungsbereitschaft dieser Personen für ihre Vermeidung von Schock, Leid, Schmerz, Verlust an Lebensfreude einzuschätzen. Diese Studien stammen oft aus dem Unfallkontext (meist Strassenverkehr). Erhoben wird dabei jeweils die Zahlungsbereitschaft für eine geringe Risikoreduktion eines tödlichen Unfalls (z.B. wie viel wären die Befragten bereit zu bezahlen, um das Unfallrisiko um 0.1% zu verringern) bei ganz vielen verschiedenen Menschen. Diese Zahlungsbereitschaft wird danach auf einen Todesfall hochgerechnet (in diesem Beispiel Multiplikation mit 1'000, da $0.1\% \cdot 1000 = 100\% =$ ein verhinderter Todesfall) und als „value of statistical life“ (VOSL) bezeichnet. Diese Normierung auf einen Todesfall dient letztlich nur der Vereinfachung beim Ausweis der Zahlungsbereitschaft und der konkreten Anwendung in der Praxis bei der Bewertung von Todesfällen.

Die Herleitung des verwendeten „Value of Statistical Life“ (VOSL) wird in Ecoplan (2016) "Empfehlungen zur Festlegung der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos (value of statistical life)" ⁵³⁶ dargelegt. Dort wird insbesondere die Bezugnahme auf die OECD-Studie 2012 ⁵³⁷, die Umrechnung zwischen dem statistischen Wert des Lebens und dem Wert eines verlorenen Lebensjahres (VLYL), sowie die Nichtdifferenzierung des VOSL nach Kostenbereichen (Krankheit vs. Unfall) begründet.

20.5.6 Immaterielle Kosten von Krankheitsfällen

Mangels empirischer Erhebungen zur Zahlungsbereitschaft in der Schweiz muss meist auf ausländische Untersuchungen zurückgegriffen werden. Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf die Schweiz ist selbstverständlich nicht unproblematisch. Es bleibt allerdings mangels besserer Datengrundlagen keine Alternative zur Verwendung ausländischer Studienergebnisse. Basierend auf einer Literaturrecherche und den bisher verwendeten Kostenätzen werden für die Bewertung der Krankheitsfälle die im Folgenden hergeleiteten Zahlungsbereitschaften verwendet.

⁵³⁶ Ecoplan (2016)

⁵³⁷ OECD (2012)

a) Immaterielle Kosten aufgrund von Spitalaufenthalten

In den bisherigen Studien zu den externen Effekten⁵³⁸ wird oft ein einheitlicher Kostensatz pro Spitaltag verwendet. Dieser Kostensatz beruht auf einer Studie aus den USA⁵³⁹ für Herz- / Kreislauferkrankungen sowie Atemwegserkrankungen und liegt in etwa in der Mitte der Werte von zwei anderen europäischen Studien.⁵⁴⁰ Der ursprüngliche Wert von 420 US\$ (2003) ergibt umgerechnet **863 CHF pro Spitaltag** im Jahr 2021.⁵⁴¹ Dieser Kostensatz wird für alle Krankheitsbilder mit Spitalaufenthalten verwendet, d.h. für⁵⁴²

- Herz- / Kreislauferkrankungen (umgerechnet mit der durchschnittlichen Anzahl Aufenthaltstage im Spital ergibt dies pro Hospitalisation einen Kostensatz von 7'185 CHF)
- Atemwegserkrankungen (pro Hospitalisation 6'673 CHF)
- Lungenkrebs (pro Hospitalisation 8'722 CHF)
- Diabetes (pro Hospitalisation 9'189 CHF)
- Depression (pro Hospitalisation 28'314 CHF)
- Brustkrebs (pro Hospitalisation 4'392 CHF)
- Kolonkrebs (pro Hospitalisation 9'644 CHF)

Obwohl ein einheitlicher Kostensatz pro eingesparten Spitaltag verwendet wird,⁵⁴³ ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Aufenthaltsdauern also differenzierte Kostensätze pro Hospitalisation.

⁵³⁸ Ecoplan; INFRAS (2014); INFRAS; Ecoplan (2019)

⁵³⁹ Thayer; Chestnut; Lazo; u. a. (2003), S. 59 und xi.

⁵⁴⁰ Ecoplan; Infrass; ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin) (2004), S. 88: EU-Projekt UNITE und trinationale Studie Sommer; Seethaler; Chanel; u. a. (1999), S. 49.

⁵⁴¹ Umrechnung wie bisher mit Kaufkraftparität, Umwandlung in Faktorpreise und Fortschreibung mit Nominallohnwachstum auf 2021. Im Vergleich zu bisher entspricht dies also einer Fortschreibung des bisher verwendeten Wertes mit dem Nominallohnwachstum.

⁵⁴² Derselbe Kostensatz wurde für elf verschiedene Krankheitsbilder auch bereits bei der Bewertung der Gesundheitskosten des Passivrauchens angewendet – darunter Schlaganfall, Brustkrebs und Lungenkrebs (ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin am Schweizerischen Tropeninstitut Basel); Ecoplan; Lungenliga Schweiz (2009)).

⁵⁴³ Neu werden Herz- / Kreislauferkrankungen umfassend miteinbezogen. In den bisherigen Berechnungen der externen Effekte wurden hingegen Bluthochdruck und ischämische Herzkrankheiten, die beide Teil der Herz- / Kreislauferkrankungen sind, einzeln berücksichtigt. Dabei wurden folgende Krankheitsbild-spezifische Kostensätze verwendet: Für Bluthochdruck wurde ein Kostensatz von 1'619 CHF pro Spitaltag (Preise 2019 – dieser Kostensatz stammt ursprünglich aus Metroeconomica Limited (2001), S. 13) verwendet und für ischämische Herzkrankheiten 16'305 CHF pro Hospitalisation bzw. 2'651 CHF pro Spitaltag (Preise 2019 – dieser Wert beruht auf Suter; Sommer; Marti; u. a. (2002), S. 32 und wird aus Ecoplan; Planteam; Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie (IHA-ETH) (2004), S. 104–105 übernommen). Da für die nun interessierenden Krankheitsbilder keine spezifischen Kostensätze vorliegen (und auch keine gefunden werden konnten), verwenden wir – wie bisher und gemäss dem at least Ansatz – den tiefsten Kostensatz pro Spitaltag von den drei bisher verwendeten Kostensätzen – denjenigen für Herz- / Kreislauferkrankungen sowie Atemwegserkrankungen.

b) Immaterielle Kosten für andere Krankheitsfolgen

Im Folgenden werden die weiteren immateriellen Kostensätze erläutert:⁵⁴⁴

- **Tage mit eingeschränkter Aktivität:** Der bisher verwendete Kostensatz kann weiterverwendet werden. Er beträgt **230 CHF pro Tag** (Fortschreibung auf 2021 mit dem Nominallohnwachstum), beruht auf einer internationalen Studie⁵⁴⁵ und ist den verwendeten Kosten-sätzen in anderen aktuellen Studien sehr ähnlich.⁵⁴⁶

Um Doppelzählungen zu vermeiden, werden – wie bei den Produktionsausfällen – von den so ermittelten immateriellen Kosten für Tage mit eingeschränkter Aktivität sämtliche immateriellen Kosten der übrigen Krankheitsfälle (ohne Todesfälle) abgezogen.

- **COPD:** Für COPD verwenden wir einen Kostensatz von 60'000 € (2010) bzw. **117'766 CHF** (2021), der auf dem Neuauftreten von COPD beruht.^{547, 548} Der Kostensatz wird zudem durch zwei andere Studien⁵⁴⁹ bestätigt, die sehr ähnliche Werte empfehlen.
- **Lungenkrebs:** Für die Bewertung der immateriellen Kosten des Lungenkrebses haben wir zwei Quellen gefunden: Im Projekt HEIMTSA⁵⁵⁰ wird ein Kostensatz von 720'000 € (2010) angegeben (mit grosser Schwankungsbreite: -90% und +480%). Dieser Wert liegt sehr hoch und wir gehen davon aus, dass darin auch das Todesfallrisiko (teilweise) enthalten sein dürfte (Tod durchschnittlich 3 Jahre nach der Diagnose⁵⁵¹). Das Todesfallrisiko bewerten wir jedoch direkt über die verlorenen Lebensjahre. Um Doppelzählungen zu vermeiden, verzichten wir auf diesen hohen Kostensatz. In einer Studie zum Clean Air Outlook⁵⁵² wird ein deutlich tieferer Kostensatz von 29'832 € (2015) pro Inzidenz angegeben – oder umgerechnet **49'713 CHF** (2021).⁵⁵³ Unklar bleibt aus der Studie jedoch, welche Kosten darin enthalten sind (und aus welcher Quelle der Wert stammt!). Um Doppelzählungen zu vermeiden, werden deshalb vorsichtig die medizinischen Kosten, die Produktionsausfälle (und zwar sowohl die Kosten durch Hospitalisationen als auch die sonstigen Kosten) sowie auch die immateriellen Kosten der Spitalaufenthalte abgezogen.⁵⁵⁴

⁵⁴⁴ Wie in Fussnote 486, S. 474 erwähnt, konnte die Suche nach weiteren immateriellen Kosten ausserhalb von Spitalaufenthalten nur für ausgewählte Krankheitsbilder vorgenommen werden.

⁵⁴⁵ Sommer; Seethaler; Chanel; u. a. (1999), S. 49

⁵⁴⁶ Amann; Holland; Maas; u. a. (2017), S. 15; EEA (2021a), S. 47; IIASA International Institute for Applied Systems Analysis; Umweltbundesamt Österreich; EMRC; u. a. (2022), S. 121

⁵⁴⁷ HEIMTSA (2011b), S. 78; (a)

⁵⁴⁸ Derselbe Kostensatz wurde bisher für chronische Bronchitis verwendet, das Teil von COPD ist. Dies war zulässig, da in der Literatur für COPD und Bronchitis häufig derselbe Kostensatz verwendet wird.

⁵⁴⁹ EEA (2021a), S. 47; IIASA International Institute for Applied Systems Analysis; Umweltbundesamt Österreich; EMRC; u. a. (2022), S. 121

⁵⁵⁰ HEIMTSA (2011a)

⁵⁵¹ Eigene Berechnung basierend auf Galli; Rohrmann; Lorez (2019)

⁵⁵² IIASA International Institute for Applied Systems Analysis; Umweltbundesamt Österreich; EMRC; u. a. (2022), S. 121

⁵⁵³ Umrechnung mit PPP-Wechselkurs, Nominallohnwachstum und Umrechnung in Faktorpreise.

⁵⁵⁴ Einzig die Widerbesetzungskosten werden nicht abgezogen, da diese international meist vernachlässigt werden und deshalb kaum im Kostensatz enthalten sind.

- **Diabetes:** Für Diabetes liegt aus derselben Studie⁵⁵⁵ ein Wert von 21'194 € (2015) vor – oder umgerechnet **35'318 CHF** pro Inzidenz. Wir verwenden diesen Wert, ziehen aber – um Doppelzählungen zu vermeiden – wiederum die bisher berechneten medizinischen Kosten und Produktionsausfälle sowie die immateriellen Kosten der Krankenhausaufenthalte ab.
- **Demenz:** Für die Heilung von Demenz liegt eine Schweizer Zahlungsbereitschaftsstudie vor.⁵⁵⁶ Wir berücksichtigen dabei nur die Zahlungsbereitschaft für die Heilung der Demenz, nicht jedoch Kosten für die Betreuung des Patienten durch den Ehepartner, die in der Studie ebenfalls ausgewiesen werden, aber zu den medizinischen Behandlungskosten gehören und dort bereits berücksichtigt werden. In der Studie wurden nur leichte und mittlere Demenzfälle betrachtet,⁵⁵⁷ was tendenziell zu einer Unterschätzung führt. Die Studie weist sowohl den Median als auch den Mittelwert der Zahlungsbereitschaften aus, wobei wir wie bisher den Durchschnitt dieser beiden Werte verwenden. Für die Demenz ergibt dies eine Zahlungsbereitschaft von 11.6% des Haushaltvermögens.⁵⁵⁸ Bei einem durchschnittlichen Haushaltvermögen von 614'000 CHF (Werte 2001 gemäss Studie) ergibt sich eine Zahlungsbereitschaft von **79'831 CHF** pro Fall (hochgerechnet auf 2021 und zu Faktorpreisen).⁵⁵⁹

In den bisherigen Berechnungen gingen wir im Rahmen der Sensitivitätsanalysen davon aus, dass die immateriellen Kostensätze (für Spitaleintritte und sonstige Kosten) auch um 50% höher oder tiefer liegen könnten. Diese Schwankungsbreite dürfte auch weiterhin ihre Gültigkeit haben. Doch wie in Kapitel 3.3.2 erläutert, verzichten wir neu auf Sensitivitäten, welche das Ergebnis um weniger als 10% der Gesamtkosten im Kostenbereich verändern dürften. Entsprechend der geringen Auswirkungen dieser Kostensätze auf die bisherigen Ergebnisse (Luftbelastung -6% und 7%, Lärm $\pm 3\%$, Gesundheitsnutzen Fuss- und Veloverkehr $\pm 0.4\%$) führen wir somit für die immateriellen Kostensätze der Krankheitsbilder (ohne Todesfälle) keine Sensitivitätsanalysen mehr durch.

20.5.7 Zusammenfassung der Kostensätze pro Krankheitsbild

Die folgende Tabelle fasst die oben hergeleiteten Kostensätze zusammen. Auffallend ist, dass die Kostensätze pro verlorenes Lebensjahr bzw. Erwerbsjahr hoch sind (246'000 bzw. 105'000 CHF). Zudem verursachen auch Demenzerkrankungen hohe Kosten, die sich vor allem auf die hohen

⁵⁵⁵ IIASA International Institute for Applied Systems Analysis; Umweltbundesamt Österreich; EMRC; u. a. (2022), S. 121

⁵⁵⁶ König; Zweifel (2004). Die Studie weist sowohl die Zahlungsbereitschaft für die vollständige Heilung aus (in der Studie *cure* genannt), als auch die Zahlungsbereitschaft dafür, dass kein Betreuungsaufwand mehr anfällt (*no burden*). Wir berücksichtigen nur die Differenz dieser beiden Zahlungsbereitschaften, die der Heilung des Patienten entspricht, ohne dass der Betreuungsaufwand berücksichtigt wird.

⁵⁵⁷ König; Zweifel (2004), S. 7

⁵⁵⁸ König; Zweifel (2004), S. 20. Da die Studie perfekten Altruismus findet (d.h. die Präferenzen des einen Ehepartners entsprechen den egoistischen Präferenzen des anderen), wird die Zahlungsbereitschaft des Betreuers verwendet, um die Zahlungsbereitschaft des Patienten abzubilden.

⁵⁵⁹ Bisher wurden die Kosten durch vermiedene Demenzerkrankungen durch körperliche Aktivität im Fuss- und Veloverkehr anhand der vermiedenen Spitaleintritte abgeschätzt. Dazu wurde derselbe Kostensatz verwendet. Neu wird der Kostensatz also für die Inzidenz angewendet (die bisher nicht bewertet wurde), da er sich auf die Diagnose Demenz bezieht. Dadurch werden die immateriellen Kosten der Demenz deutlich steigen, da es deutlich mehr Inzidenzen als Spitaleintritte gibt.

Pflegekosten von 490'000 CHF (je zu ca. 50% in Heimen und durch informelle Pflege) pro Demenzfall sowie die immateriellen Kosten von 80'000 CHF pro Fall zurückführen lassen. Schliesslich wird auch das Neuauftreten von COPD mit immateriellen Kosten von 118'000 CHF bewertet. Aus der Abbildung ist zudem zu erkennen, dass bei verschiedenen Krankheitsbildern keine spezifischen Datengrundlagen zu einzelnen Kostenbereichen verfügbar sind, weshalb auf eine Bewertung verzichtet werden muss.

Abbildung 20-13: Zusammenfassung der verwendeten Kostensätze (in CHF 2021)

Krankheitsbild	ICD-10-Code	Spitalkosten pro Hospitalisation	Sonst. med. Kosten pro Inzidenz	Produktionsausfall pro Hospitalisation	Produktionsausfall sonst pro Inzidenz	Wiederbesetzungskosten (Mann / Frau) pro Hospitalisation	Immaterielle Kosten pro Hospitalisation	Immaterielle Kosten sonst pro Inzidenz
Pro verlorenes Lebensjahr	-	-	-	-	-	-	-	249'018
Pro verlorenes Erwerbsjahr bzw. pro Todesfall	-	-	-	-	104'874	40451 / 34391	-	-
Tage mit eingeschränkter Aktivität (pro Tag)	-	-	n.a.	-	287	-	-	230
Herz-/Kreislauferkrankungen	I00 - I99	20'047	n.a.	5'646	n.a.	-	7'185	n.a.
Atemwegserkrankungen	J00 - J99	16'494	-	3'680	-	-	6'673	-
COPD	J40 - J44	-	11'874	-	1'160	-	-	117'766
Lungenkrebs	C34	20'887	7'542	6'307	26'507	-	8'722	49'713
Diabetes (Typ 2 - Altersdiabetes)	E11	18'751	18'194	1'768	8'180	-	9'189	35'318
Demenz	F00 - F03 und G30 - G31	23'664	490'000	60'945	n.a.	4'837	-	79'831
Depression	F32 - F33	26'312	n.a.	7'311	n.a.	n.a.	28'314	n.a.
Brustkrebs	C50	14'803	n.a.	3'667	n.a.	-	4'392	n.a.
Kolonkrebs	C18	25'649	n.a.	7'180	n.a.	-	9'644	n.a.

n.a. = not available (nicht verfügbar)

- = nicht relevant bzw. keine Kosten

20.6 Berechnung der verlorenen Lebensjahre

a) Grundkonzept

Die Bewertung der frühzeitigen Todesfälle erfolgt wie in den bisherigen Studien für das ARE nicht direkt anhand der Todesfälle, sondern über die Bewertung der dadurch verlorenen Lebensjahre. Die Anzahl der verlorenen Lebensjahre wird dabei aus dem relativen Risiko und der Überlebensfunktionskurve (abgeleitet aus Sterbetafeln⁵⁶⁰) berechnet. In der Berechnung wird das veränderte Sterberisiko (durch Luft- oder Lärmbelastung bzw. durch körperliche Betätigung im Fuss- und Veloverkehr) in der altersabhängigen Überlebenswahrscheinlichkeit berücksichtigt und mit einem Referenzszenario verglichen. Diese Methodik wurde auch in den bisherigen Bewertungen (ab dem Jahr 2000) jeweils verwendet. Für die vorliegende Studie werden alle Inputdaten aktualisiert: Bevölkerungsgrösse, Sterbewahrscheinlichkeiten, Häufigkeit verschiedener Todesursachen – alles nach 1-Jahres-Altersklassen.

⁵⁶⁰ Für die Berechnungen werden die im Jahr 2017 vom BFS publizierten Sterbetafeln verwendet, die sich auf Daten der Jahre 2008 bis 2013 beziehen. Neuere Sterbetafeln werden vom BFS erst im Jahr 2027 publiziert.

Ergänzend zu den verlorenen Lebensjahren werden für die Ermittlung des Produktionsausfalls und der Wiederbesetzungskosten auch die verlorenen Erwerbsjahre und die Todesfälle bei Erwerbstätigen benötigt. Die Berechnung erfolgt dabei anhand der Erwerbsquoten nach 1-Jahres-Altersklassen der 15- bis 100-Jährigen.⁵⁶¹

b) Anwendung auf Luft- und Lärmbelastung sowie Gesundheitsnutzen

Die Ermittlung der verlorenen Lebens- bzw. Erwerbsjahre wird für alle drei Bereiche (Luftbelastung, Lärmbelastung, Gesundheitsnutzen des Fuss- und Veloverkehrs) durchgeführt, (ausgehend von einem identischen Grund-Berechnungsdatei, aber natürlich mit anderen epidemiologischen Effektschätzern).

c) Berücksichtigung der zeitlichen Komponente der verlorenen Lebensjahre

Bei den Berechnungen wird berücksichtigt, dass sich die Todesfälle im Jahr 2021 auch auf die Zukunft auswirken. Wenn sich aufgrund der Luftbelastung im Jahr 2021 die Bevölkerung reduziert, führt dies auch in den Folgejahren zu verlorenen Lebensjahren. Dies wird mit den Berechnungen auf der Basis von Sterbetafeln beachtet. Bei der ökonomischen Bewertung ist es zudem von Bedeutung, wann die Verluste auftreten, da Verluste in der Zukunft weniger stark gewichtet werden als Verluste heute. Man trägt diesem Umstand in der Ökonomie mit der Diskontierung Rechnung. Deshalb werden in diesem Bericht die mit 1.2%⁵⁶² diskontierten verlorenen Lebens- und Erwerbsjahre berechnet und dargestellt.

Box: Verzicht auf dynamische Modellierung der zeitlichen Verzögerung bei den Gesundheitseffekten

In der Schweizerischen Abschätzung der Luftschadstoff-bedingten Gesundheitseffekte von 2000⁵⁶³ wurde angenommen, dass Effekte der Luftbelastung nicht unmittelbar eintreffen, sondern erst nach einer gewissen Zeit nach der Belastung. Der Zeitverlauf wurde anhand von sogenannten Interventionsstudien abgeschätzt. Eine systematische Analyse hat gezeigt, dass der Effekt auf das Resultat in Bezug auf verlorene Lebensjahre gering ist. Deshalb wurde ab den Berechnungen für das Jahr 2010⁵⁶⁴ auf diese dynamische Modellierung verzichtet. Da seit dem 2000-er Projekt kaum mehr Interventionsstudien publiziert wurden, sind die diesbezüglichen Abschätzungen mit Unsicherheiten behaftet. Weiter hat sich die dynamische Modellierung international nicht durchgesetzt und würde zu Inkonsistenzen innerhalb des Projektes führen, da im Lärmbereich die Grundlagen für eine solche Modellierung nicht gegeben sind. Insgesamt würde die dynamische Modellierung also einen grossen

⁵⁶¹ Beispielsweise beträgt die Erwerbsquote eines 39-jährigen (bzw. 76-jährigen) Mannes im Jahr 2021 91% (bzw. 6%). Entsprechend berechnen wir pro verlorenes Lebensjahr eines 39-jährigen (bzw. 76-jährigen) Mannes 0.91 (bzw. 0.06) verlorene Erwerbsjahre.

⁵⁶² Es wird eine Diskontrate von 1.19% verwendet (vgl. Kapitel 20.3).

⁵⁶³ Ecoplan; Infrass; ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin) (2004)

⁵⁶⁴ Ecoplan; INFRAS (2014)

Aufwand bedeuten und hätte dennoch nur geringe Auswirkungen auf das Resultat. Deshalb wird seit der Studie für das Jahr 2010 auf die Berücksichtigung einer zeitlichen Verzögerung bei der Schadstoffwirkung verzichtet.

d) Bereinigte Daten zur Sterbewahrscheinlichkeit: Unfälle, Gewalt und Covid-19 Pandemie

Zur Bestimmung der verlorenen Lebensjahre z.B. durch die Luftverschmutzung im Jahr 2021 werden die Lebensjahre der 2021 lebenden Bevölkerung zweimal berechnet: Einmal wird jede 1-Jahres-Alterskohorte (getrennt für Frauen und Männer) mit den Überlebenswahrscheinlichkeiten weiterverfolgt bis nach mehr als 100 Jahren dann alle gestorben sind. Das andere Mal wird untersucht, wie viel weniger Personen 2021 gestorben wären, wenn die Luftbelastung 2021 geringer gewesen wäre. Die grössere Bevölkerung im Jahr 2022 (mit weniger Luftbelastung 2021) wird dann wiederum mit den gleichen Überlebenswahrscheinlichkeiten wie im Referenzfall bis an ihr Lebensende weiterverfolgt. Aus der Differenz dieser beiden Berechnungen ergeben sich die durch die reduzierte Luftbelastung im Jahr 2021 gewonnen werden bzw. durch die höhere Luftbelastung verloren gehen.

Für die Berechnung des Effektes der Luftbelastung im Jahr 2021 werden die durch Unfälle und Gewalt verursachten Todesfälle speziell behandelt: Diese Todesfälle sind von den hier betrachteten Belastung-Wirkungs-Beziehungen nicht tangiert. Deshalb wird die Belastungs-Wirkungs-Beziehung nur auf die um die Todesfälle durch Unfälle und Gewalt korrigierte Überlebenswahrscheinlichkeit angewendet. Der Anteil der Todesfälle, die durch Unfälle und Gewalt verursacht werden (ICD-10-Kategorien V01 bis Y899), wird basierend auf dem Durchschnitt der Jahre 2015 bis 2019 ermittelt.⁵⁶⁵ Da der Effekt der Covid-19 Pandemie in den heutigen Sterbewahrscheinlichkeitsdaten nicht abgebildet ist (basieren auf den Jahren 2008-2013), könnte die Berücksichtigung der Jahre 2020 und 2021 bei den Todesfalldaten zu Verzerrungen führen. Zudem gibt es zunehmend Hinweise auf eine synergistische Wirkung von Covid und Luftschadstoffen. Dieser Effekt ist in den Effektschätzern nicht berücksichtigt, so dass in Corona-Jahren mit einer gewissen Unterschätzung zu rechnen ist. Zudem blieben die absoluten Todesfallzahlen mit Unfall- und Gewalt-Ursachen auch in den letzten Jahren (mit Covid) im Trend. Für die Berechnung der Anteile dieser Todesfälle am Total werden die über fünf 1-Jahres-Altersklassen geglätteten Werten benutzt. Für die Todesfälle im 50. Lebensalter wird also der mittlere Anteil Todesfälle der 48- bis 52-Jährigen benutzt.

Eine ähnliche Abgrenzung wird bei Todesfällen vorgenommen, die durch kardiovaskuläre Erkrankungen verursacht werden. Für diese Todesfälle werden ebenfalls Daten von 2015 bis 2019 berechnet. Die Entwicklung der absoluten Anzahl Todesfälle blieb 2020 und 2021 im Trend. Somit ist auch bei diesen Daten keinen Effekt der Covid-19 Pandemie sichtbar. Die Jahre 2020 und 2021

⁵⁶⁵ Die Sterblichkeitsdaten stammen vom Bundesamt für Statistik. Die mittlere Anzahl Todesfälle zwischen 2015 und 2019 beläuft sich auf 66'882.

können somit ausgeblendet werden, was sicherstellt, dass die Kohärenz mit den Sterbewahrscheinlichkeitsdaten gewährleistet ist. Anteilsmässig entsprechen die Todesfälle, die auf kardiovaskuläre Erkrankungen zurückzuführen sind, rund 30% des Totals, bei den Frauen etwas mehr als bei den Männern. Der Durchschnitt über die Jahre 2015 - 2019 wird zudem auf das Niveau von 2019 skaliert, weil der Anteil der Todesfälle im Zeitraum 2011 bis 2019 einen statistisch signifikanten absteigenden Trend aufweisen.

21 Anhang B: Detaillierte Betrachtungen zur Kalibrierung der Baseline Aktivität (SGB) für die Verknüpfung mit den Mobilitätsdaten (MZMV)

Im Folgenden werden die methodischen Herausforderungen für die Kalibrierung der Baseline Aktivität (SGB) für die Verknüpfung mit den Mobilitätsdaten (MZMV) erläutert und die detaillierte Vorgehensweise beschrieben.

Ziel ist es, den Personen in der MZMV Stichprobe eine Baseline Aktivität zuweisen zu können. Genauer gesagt erfolgt dies für Personengruppen, definiert nach Alter, Geschlecht und zusätzlichen Zuordnungsvariablen (insb. Fuss und Velonutzung). Hierzu werden die Möglichkeiten stark durch die beiden Datensätze vorgegeben. In einem ersten Schritt gilt es also zu vergleichen, welche der relevanten Zuordnungsvariablen in beiden Datensätzen vorhanden sind, und ob die Formate vergleichbar sind, oder sinnvoll angepasst werden können.

Es stellen sich folgende Fragen:

- Sind die Fuss- und Velo-Aktivität Fragen aus MZMV und SGB vergleichbar?
- Wie ist Baseline Aktivität zu interpretieren? Inklusive Fuss- und Velo-Aktivität, oder zusätzlich?
- Wie verteilen sich Fuss- und Velo-Aktivität und Baseline Aktivität über die Altersgruppen?
- Wie verteilt sich Baseline Aktivität innerhalb der Altersgruppen?
- Wie verteilt sich Baseline Aktivität in Abhängigkeit von Fuss- und Velo-Aktivität?

a) Sind die Fuss- und Velo-Fragen aus MZMV und SGB vergleichbar?

Fuss und Veloverkehr wird in der SGB nur rudimentär mit 2 Fragen erfasst: "Wie bewegen Sie sich normalerweise fort, um sich an verschiedene Orte zu begeben (hin und zurück) z.B. zur Arbeit, zur Schule, zum Einkaufen oder zum Markt, zum Ausgehen?", und falls zu Fuss oder mit dem Velo angekreuzt wird: "Wie lange sind Sie normalerweise täglich insgesamt zu Fuss oder mit dem Velo unterwegs?" Die Zuweisung kann somit nur annäherungsweise für "Fuss- und Velonutzung insgesamt" durchgeführt werden, d.h. ohne Berücksichtigung von Unterschieden zwischen Fussgängern und (Elektro-) Velofahrenden.

Für den Vergleich wurde die SGB Variable mit den MZMV Daten nachgebildet. Dazu werden die Fuss- und Velo-Minuten aggregiert und gemässe der SGB Variable kategorisiert (6 Kategorien⁵⁶⁶). Umgekehrt werden auch die SGB Kategorien in Minuten umgerechnet, und mit den MZMV Daten verglichen.

⁵⁶⁶ Keine Wegstrecke zu Fuss oder mit dem Velo; 0 bis 14 Minuten; 15 bis 29 Minuten; 30 bis 59 Minuten; 1 Stunde bis weniger als 2 Stunden; 2 Stunden oder mehr.

Gemäss der Frageformulierung in der SGB müssten hierzu die Etappen aus dem MZMV zuerst auf die erwähnten Etappenzwecke gefiltert werden (insb. Ausschluss von Umsteigen und Freizeitaktivität). Dies führt im Vergleich zur SGB aber zu deutlich tieferen Werten. Die Übereinstimmung zwischen SGB und MZMV ist deutlich besser, wenn alle Etappen berücksichtigt werden, was darauf hindeutet, dass die Befragten in der SGB kaum zwischen unterschiedlichen Wegzwecken unterscheiden.

Bei der Verwendung der Gesamtaktivität aus der SGB in Kombination mit der Fuss- und Veloaktivität aus dem MZMV stellt sich die Frage, ob die beiden Variablen vergleichbar erhoben wurden. Hierzu können wir die Fuss- und Veloaktivität vergleichen, welche in beiden Befragungen erhoben wurde, allerdings auf unterschiedliche Art (SGB eine Frage Fuss und Velo, MZMV Wegetagebuch). Hierbei zeigt sich, dass die MZMV Werte für die Fuss- und Velodauer (zusammengenommen) ziemlich konstant über alle Altersklassen um max. 20% höher liegt (durchschnittlich ca.18% je nach Altersgruppenstruktur, siehe Abbildung 21-1 unten).

Als Nächstes gilt es zu beurteilen, ob dieser Unterschied auch auf die Gesamtaktivität zutreffen würde, wäre sie im MZMV erhoben worden. Wenn wir Unter-/Überschätzung vollständig der Frageformulierung in der SGB zuschreiben, wenden wir keine Korrektur für die Gesamtaktivität an. Wenn wir die Unter-/Überschätzung vollständig der SGB-Befragungsmethodik (im weitesten Sinne) zuschreiben, wäre es naheliegend, die Gesamtaktivität mit demselben Verhältnis zu korrigieren, das wir für die Fuss- und Veloaktivität beobachten. Es ist plausibel, dass das detaillierte Format des Wegetagebuchs zumindest einen Teil der Unterschätzung der Fuss- und Velodauer in der SGB erklärt. Im MZMV müssen sich Teilnehmer detailliert an alle einzelnen Wege erinnern, die sie am Vortag unternommen haben, während in der SGB abstrakter ("normalerweise") und aggregiert die Gesamtdauer zu Fuss und mit dem Velo erfragt wird ("Wie lange sind Sie normalerweise täglich insgesamt zu Fuss oder mit dem Velo unterwegs?", welche dann in rel. groben Kategorien (vgl. Fussnote 566) erfasst wird. Zudem wird in der SGB gefragt, wie man sich normalerweise fortbewegt. Ist dies z.B. das Auto oder der ÖV, werden (weniger häufige) Fuss- und Velowege (zur Haltestelle) in der SGB vernachlässigt. Der MZMV-Wert wird daher als Goldstandard behandelt.

Des Weiteren gilt es hier zu beobachten, dass die aus den MZMV-Daten resultierende körperliche Aktivität für Fuss- und Velo (METhrs/wk) geringer ist, als in der SGB, trotz längerer Aktivitätsdauer. Dies ist auf die Berücksichtigung individueller Werte für Dauer und Geschwindigkeit (anstelle von Kategorien-Mittelwerten) zurückzuführen. Die aus den MZMV-Daten hergeleitete Fuss- und Veloaktivität wird als Gold-Standard betrachtet, d.h. nicht korrigiert.

b) Wie ist Baseline Aktivität zu interpretieren? Inkl. Fuss-Velo, oder zusätzlich?

Bei der Interpretation der Aktivitätsdaten aus der SGB stellt sich eine fundamentale Frage: Ist die erhobene "Gesamtaktivität" (Ein Konstrukt aus Fragen zu Dauer und Häufigkeit von Aktivitäten die zu erhöhtem Atem oder Schwitzen führen) so zu interpretieren, dass sie auch Fuss- und Veloaktivität beinhaltet, oder soll sie als Aktivität zusätzlich zu Fuss- und Veloaktivität interpretiert werden?

Das in der SGB verwendete Fragekonstrukt zur Gesamtaktivität wurde aus der Forschung übernommen, und wird dort durchaus als umfassendes Mass für körperliche Aktivität verwendet.

Für Vergleiche von Aktivitätsdomänen (Fuss, Velo, Arbeit, Sport, Haushalt) ist es aber vorteilhaft, auf Domäne-spezifische Fragen zurückzugreifen, die methodisch vergleichbarer sind, d.h. Dauer und Häufigkeit für jede Domäne erfragen.⁵⁶⁷

Betrachten wir die Werte aus der SGB, stellt sich heraus, dass die Mehrheit der Befragten welche mehr Fuss- und Veloaktivität als die geringste Kategorie vermelden (d.h. 12 oder 18 METh/Woche), tiefere Werte für die Gesamtaktivität aufweisen. Der Anteil "plausibler" Werte für Fuss-Velo-Aktivität, relativ zur Gesamtaktivität, beträgt zwar für alle Gesamt-Aktivitätslevels mind. 65%, bei den unplausiblen Werten zeigt sich aber, dass diese die Gesamtaktivität oft um ein Vielfaches (bis zu 10-fach) übertreffen. Dies deutet stark darauf hin, dass die Fragen zu "Gesamtaktivität" von den Befragten vornehmlich in Bezug auf "andere Aktivität als Fuss- und Veloaktivität" beantwortet wurden. Es ist allerdings nicht auszuschliessen, dass ein Teil der Fuss- und Velo-Aktivität (insb. wenn sie zu erhöhtem Atmen oder Schwitzen führt) auch in der "Gesamtaktivität" erfasst ist.

"Gesamtaktivität" wird daher als "andere Aktivität als Fuss- und Veloaktivität" interpretiert. Zudem wird ein Korrekturfaktor angewendet, um die mögliche Doppelzählung von Fuss-Velo-Aktivität zu berücksichtigen (0.8, d.h. 20% der "Gesamtaktivität" ist Fuss-Velo-Aktivität, im Durchschnitt über alle Teilnehmer). Die Interpretation von "Gesamtaktivität" als "andere Aktivität als Fuss- und Veloaktivität" resultiert in geringeren Gesundheitsnutzen, als wenn sie als tatsächliche Gesamtaktivität interpretiert würde. Die Anwendung eines Korrekturfaktors führt zu höheren Gesundheitsnutzen, als wenn "Gesamtaktivität" vollständig als "andere Aktivität als Fuss- und Veloaktivität" interpretiert würde.

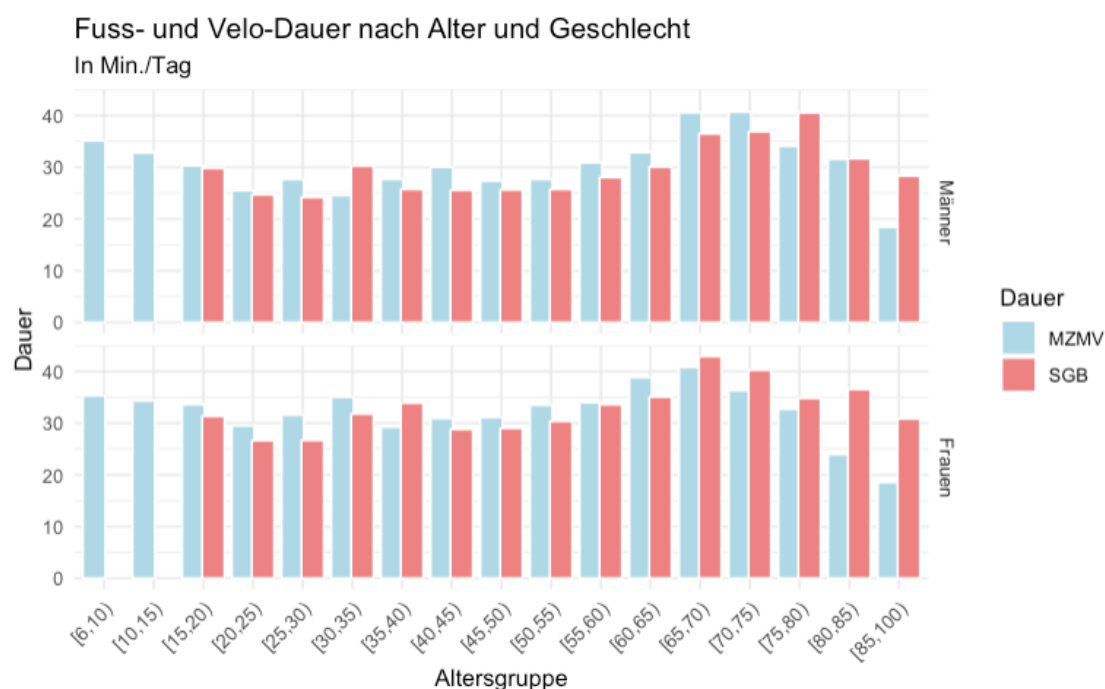
Im Rahmen der Hauptrechnung wenden wir den Korrekturfaktor 0.8 an, der Annahmen zur Doppelzählung von Fuss- und Velo-Aktivität berücksichtigt. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse interpretieren wir "Gesamtaktivität" als vollständig "andere Aktivität als Fuss- und Veloaktivität".

c) Wie verteilen sich Fuss- und Velo- und Baseline Aktivität über die Altersgruppen?

Über die Altersgruppen betrachtet zeigt sich sowohl in der SGB als auch im MZMV eine gewisse Altersabhängigkeit für die Fuss- und Velo-Dauer, mit höheren Werten für die jüngeren und älteren Altersgruppen. Betrachtet man die daraus resultierende körperliche Aktivität, zeigt sich, dass mit der Berechnung basierend auf MZMV Daten die Altersunterschiede deutlich abgeschwächt sind - ältere Menschen sind zwar länger unterwegs, aber mit geringerer Intensität (höherer Anteil zu Fuss, geringere Geschwindigkeit). Dasselbe Muster trifft auch für Unterschiede zwischen Männern und Frauen zu. Nichtsdestotrotz wird die Baseline Aktivität Altersgruppen-spezifisch zugewiesen.

⁵⁶⁷ Siehe Global physical activity questionnaire (GPAQ): Bull; Maslin; Armstrong (2009)

Abbildung 21-1: Fuss- und Velodauer nach Alter, Geschlecht und Datenquelle



d) Wie verteilt sich Baseline Aktivität innerhalb der Altersgruppen?

Aufgrund der Frage-Konstruktion in der SGB, und der Umrechnung in kontinuierliche Aktivitätseinheiten ergeben sich bloss vier mögliche Werte für die Baseline Aktivität (i.e. 0, 6, 12, 18 METh/Woche). Die Verteilung über diese Kategorien, innerhalb jeder Altersgruppe, wird für die Berechnung der Wirkungen beibehalten (d.h. disaggregiert gerechnet).

e) Wie verteilt sich Baseline Aktivität in Abhängigkeit von Fuss- und Velo-Aktivität?

Von weiterem Interesse ist die Verteilung der Baseline Aktivität gegenüber der Fuss- und Velo-Aktivität. Hierbei zeigt sich praktisch keine, oder allenfalls eine geringe Abnahme anderer Aktivitäten mit zunehmender Fuss- und Velo-Aktivität. Auf eine Fuss/Velo-spezifische Zuweisung der Baseline Aktivität wird daher verzichtet.

22 Literaturverzeichnis

- ACRP (Airport Cooperative Research Program): Measuring PM Emissions from Aircraft Auxiliary Power Units, Tires, and Brakes. ACRP report 97. Transportation Research board.
- Ainsworth, B E; Haskell, W L; Herrmann, S D; u. a. (2011a): 2011 Compendium of Physical Activities: a second update of codes and MET values. In: *Med Sci Sports Exerc*, 43, 8, 1575–1581.
- Ainsworth, B E; Haskell, W L; Herrmann, S D; u. a. (2011b): 2011 Compendium of Physical Activities: a second update of codes and MET values. In: *Med Sci Sports Exerc*, 43, 8, 1575–1581.
- Alzheimer's Research UK (2024): Dementia Statistics Hub: Breakdown of dementia by disease type.
- Amann, Markus; Holland, Mike; Maas, Rob; u. a. (2017): Costs, benefits and economic impacts of the EU Clean Air Strategy and their implications on innovation and competitiveness. IIASA report.
- Anthoff, D (2007): Report on marginal external damage costs of greenhouse gas emissions. New Results from FUND 3.0, Version 1.1. In: Technical Report to the NEEDS project.
- ARE (2006): Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000, Klima und bisher nicht erfasste Umweltbereiche, städtische Räume sowie vor- und nachgelagerte Prozesse.
- ASTRA Bundesamt für Strassen (2017): Fachapplikation Verkehrsunfälle (VU): Instruktionen zum Unfallaufnahmeprotokoll 2018 (UAP2018).
- Baer N.; Schuler D.; Füglistner-Dousse S.; u. a. (2013): Depressionen in der Schweiz. Daten zur Epidemiologie, Behandlung und sozial-beruflichen Integration. Obsan Bericht 56. Neuchâtel: Schweizerisches Gesundheitsobservatorium.
- BAFU (2010): Faktenblatt 1 Biodiversität – Definition und Bedeutung.
- BAFU (2020): Landschaftskonzept Schweiz Landschaft und Natur in den Politikbereichen des Bundes.
- BAFU (2022): Jahrbuch Wald und Holz.
- BAFU (2024): LCA-Datenbank der Bundesverwaltung.
- BAFU und BAZL (2019): Biodiversität und ökologischer Ausgleich auf Flugplätzen, Vollzugshilfe.
- B,B,S. (2015): Monetarisierung des statistischen Lebens im Strassenverkehr. Forschungsauftrag VSS 2011/104 des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute.
- Beelen, Rob; Raaschou-Nielsen, Ole; Stafoggia, Massimo; u. a. (2014): Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. In: *The Lancet*, 383, 9919, 785–795.
- BFS (2022a): Schweizerische Zivilluftfahrt 2021. Neuchâtel.
- BFS (2022b): Strasseninfrastrukturechnung der Schweiz 2019.
- BFS (2023a): Diagnosen bei Hospitalisierungen, nach ICD-10 Kapitel, Altersklasse und Geschlecht.

- BFS (2023b): Gebäude- und Wohnungsstatistik (GWS).
- BFS (2023c): Infrastruktur und Streckenlänge.
- BFS (2023d): Landwirtschaftliche Strukturhebung, wichtigste Flächenkategorien.
- BFS (2024): Strasseninfrastrukturechnung der Schweiz 2021. Neuchâtel.
- BFS Bundesamt für Statistik (2013): Vielfältige Folgen leichter Depressionen. Medienmitteilung vom 17.6.2013.
- BFS Bundesamt für Statistik (2018): Statistik der sozialmedizinischen Institutionen 2017 - Definitive Standardtabellen, Tabelle 13-A: Betriebskosten nach Hauptkostenträger, in tausend Franken, nach Kanton der Institution.
- BFS Bundesamt für Statistik (2019a): Statistik der Kosten und der Finanzierung des Verkehrs – Methodenhandbericht, Version 2.0.
- BFS Bundesamt für Statistik (2019b): Statistik der Kosten und der Finanzierung des Verkehrs 2015.
- BFS Bundesamt für Statistik (2022a): Kosten und Finanzierung des Gesundheitswesens nach Leistungen und Finanzierungsregimes.
- BFS Bundesamt für Statistik (2022b): Kosten und Finanzierung des Gesundheitswesens nach Leistungserbringern und Finanzierungsregimes 2020p, Tabelle 14.05.01.05.
- BFS Bundesamt für Statistik (2022c): Medizinische Statistik der Krankenhäuser.
- BFS Bundesamt für Statistik und ARE Bundesamt für Raumentwicklung (2023): Mobilitätsverhalten der Bevölkerung - Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2021.
- Bickel, Peter und Friedrich, Rainer (2006): Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO). IER University of Stuttgart.
- BLW (2022): Agrarbericht.
- Braun, Sabine und Rihm, Beat (2012): Ozonbelastung von Waldbäumen in der Schweiz und damit verbundene Wachstumseinbussen. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 163, 9, 383–388.
- Brimblecombe, Peter und Grossi, Carlota M. (2010): Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution. In: The Scientific World JOURNAL, 10, 116–125.
- Brunekreef, Bert; Andersen, Zorana J; Forastiere, Francesco; u. a. (2022): A proposal for sensitivity analyses of the health impacts of PM2.5 and NO2 in Europe, in support of the revision of the EU ambient Air Quality Standards for these pollutants. European Respiratory Society (ERS) and International Society of Environmental Epidemiology (ISEE).
- Bull, Fiona C; Maslin, Tahlia S und Armstrong, Timothy (2009): Global physical activity questionnaire (GPAQ): nine country reliability and validity study. In: Journal of physical activity & health, 6, 6, 790–804.
- Bundesamt für Raumentwicklung, ARE (2022): Value of Statistical Life (VOSL): Empfohlener Wert der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos in der Schweiz.

- Bundesamt für Strassen ASTRA (2019): Fachapplikation Verkehrsunfälle (VU). Instruktionen zum Unfallaufnahmeprotokoll 2018 (UAP2018).
- Bundesamt für Umwelt, BAFU (2015): Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-road-Sektors.
- Bundesamt für Umwelt, BAFU (2019): Luftschadstoffinventar der Schweiz. Jährliche Submission unter der UNECE-Konvention (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution). Submission März 2019.
- Bundesamt für Umwelt, BAFU (2023a): Luftschadstoffinventar der Schweiz. Jährliche Submission unter der UNECE-Konvention (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution). Submission März 2023.
- Bundesamt für Umwelt, BAFU (2023b): Treibhausgasinventar der Schweiz, Common Reporting Format CRF. Jährliche Submission unter der UN Klimarahmenkonvention UFGCC. Daten für 1990 bis 2023.
- Bundesrat (2021): Strategie Nachhaltige Entwicklung 2030.
- Burkhardt, Michael; Rossi, Luca und Boller, Markus (2008): Diffuse release of environmental hazards by railways. In: Desalination, 226, 1–3, 106–113.
- Burnett, Richard; Chen, Hong; Szyszkowicz, Mieczysław; u. a. (2018): Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, 115, 38, 9592–9597.
- BUWAL (2003): LOTHAR – Ökonomische Auswirkungen, Wald- und Gesamtwirtschaft. Umwelt-Materialien Nr. 157.
- BUWAL (2004): LOTHAR – Rechenschaftsbericht, Materielle und finanzielle Bilanz 2000-2003.
- BUWAL (2005a): Landschaftsästhetik Arbeitshilfe. Leitfaden Umwelt Nr. 9.
- BUWAL (2005b): LOTHAR – Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Umwelt-Materialien Nr. 184.
- Castro, Alberto; Götschi, Thomas; Achermann, Beat; u. a. (2020): Comparing the lung cancer burden of ambient particulate matter using scenarios of air quality standards versus acceptable risk levels. In: International Journal of Public Health, 65, 2, 139–148.
- Castro, Alberto; Künzli, Nino; de Hoogh, Kees; u. a. (2023): Mortality attributable to ambient fine particulate matter and nitrogen dioxide in Switzerland in 2019: Use of two-pollutant effect estimates. In: Environmental Research, 231, 116029.
- Castro, Alberto; Rössli, Martin; de Hoogh, Kees; u. a. (2022): Methods Matter: A Comparative Review of Health Risk Assessments for Ambient Air Pollution in Switzerland. In: Public Health Reviews, 0.
- Castro, Alberto; Rössli, Martin und Kutlar Joss, Meltem (2023): Quantifizierung des Gesundheitsnutzens der neuen Luftqualitätsleitlinien der Weltgesundheitsorganisation in der Schweiz. Interner Projektbericht.
- Chen, Jie; Rodopoulou, Sophia; de, Hoogh Kees; u. a. (2021): Long-Term Exposure to Fine Particle Elemental Components and Natural and Cause-Specific Mortality—a Pooled Analysis of Eight European Cohorts within the ELAPSE Project. In: Environmental Health Perspectives, 129, 4, 047009.

- Christodoulakis, John; Tzanis, Chris G; Varotsos, Costas A; u. a. (2017): Impacts of air pollution and climate on materials in Athens, Greece. In: Atmos. Chem. Phys.
- Committee on the Medical Effects of Air Pollutants (2022): Cognitive decline, dementia and air pollution.
- Credit Suisse (2017): Die durchschnittliche Lebensdauer von Bauteilen. Zürich.
- Dedes, Konstantin J.; Szucs, Thomas D.; Bodis, Stephan; u. a. (2004): Management and Costs of Treating Lung Cancer Patients in a University Hospital. *Pharmacoeconomics* 2004; 22 (7): 435-444.
- Die Mobiliar (2022): Risse, Flecken, Dämmung: Wann Sie die Fassade sanieren sollten. URL <https://www.mobiliar.ch/hub/wohnen/umbau/fassadensanierung>.
- Econcept und Nateco (2004): Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft. Monetarisierung der Verluste und Fragmentierung von Habitaten. Bern, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumplanung, des Bundesamtes für Strassen und des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Ecoplan (1996): Monetarisierung der verkehrsbedingten externen Gesundheitskosten. Synthesenbericht, GVF-Auftrag Nr. 272.
- Ecoplan (2002): Unfallkosten im Strassen- und Schienenverkehr der Schweiz 1998. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung.
- Ecoplan (2010): Kosten der Demenz in der Schweiz. Studie im Auftrag der Schweizerischen Alzheimervereinigung.
- Ecoplan (2016): Empfehlungen zur Festlegung der Zahlungsbereitschaft für die Verminderung des Unfall- und Gesundheitsrisikos (value of statistical life). Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung ARE und der Beratungsstelle für Unfallverhütung bfu.
- Ecoplan (2019): Alzheimer Schweiz Demenzkostenstudie 2019: Gesellschaftliche Perspektive. Studie im Auftrag von Alzheimer Schweiz.
- Ecoplan (2020): Bewertung der externen Effekte im Strassenverkehr: Grundlagen für die Durchführung einer Kosten- Nutzen-Analyse. Forschungsprojekt VSS 2015/115 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).
- Ecoplan und INFRAS (2006a): Die Nutzen des Verkehrs – Synthese der Teilprojekte 1-4. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung und des Bundesamtes für Strassen.
- Ecoplan und INFRAS (2006b): Die Nutzen des Verkehrs – Teilprojekt 1: Begriffe, Grundlagen und Messkonzept. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung und des Bundesamtes für Strassen.
- Ecoplan und INFRAS (2008): Externe Kosten des Verkehrs in der Schweiz. Aktualisierung für das Jahr 2005 mit Bandbreiten. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung und des Bundesamtes für Umwelt.
- Ecoplan und INFRAS (2014): Externe Kosten des Verkehrs 2010: Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung.
- Ecoplan; Infras; und ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin) (2004): Externe Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung in der Schweiz. Aktualisierung

für das Jahr 2000. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, des Bundesamtes für Energie sowie des Bundesamtes für Gesundheit.

Ecoplan und ISPMZ (2013): Integration des Langsamverkehrs in die Transportrechnung. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Statistik BFS und des Bundesamtes für Raumentwicklung ARE.

Ecoplan und Metron (2005): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Forschungsauftrag VSS 2000/342 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS).

Ecoplan; Planteam; und Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie (IHA-ETH) (2004): Externe Lärmkosten des Strassen- und Schienenverkehrs der Schweiz: Aktualisierung für das Jahr 2000. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung ARE, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL sowie des Bundesamtes für Gesundheit BAG.

Ecoplan und Swiss TPH (2021): Neuberechnung der Lärmkosten des Verkehrs in der Schweiz. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung und des Bundesamtes für Umwelt.

Ecoplan und IMDM (2023): Evaluation 2022 der Anzeigelemente des neuen Trassenpreissystems 2017, im Auftrag des Bundesamts für Verkehr. Bern.

EEA (2021a): Costs of air pollution from European industrial facilities 2008–2017.

EEA (2021b): Wheat yield loss in 2019 in Europe due to ozone exposure.

EEA European Environment Agency (2020): Environmental noise in Europe — 2020. URL <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>, abgerufen am 9. Juli 2020.

Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL) (2013): Feinstaub in der Schweiz 2013.

Eisenbahn Bundesamt, EBA (2006): Hinweise zur ökologischen Wirkungsprognose in UVP, LBP und FFH-Verträglichkeitsprüfungen bei Aus- und Neubaumassnahmen von Eisenbahnen des Bundes, veröffentlicht März 2004, aktualisiert November 2006.

Emberson, Lisa D.; Pleijel, Håkan; Ainsworth, Elizabeth A.; u. a. (2018): Ozone effects on crops and consideration in crop models. In: *European Journal of Agronomy*, 100, 19–34.

EMEP Center on Emission Inventories and Projections (2023): CLRTAP: European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP).

EPA (2023): Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances.

van Essen, Huib; Fiorello, Davide; El Beyrouty, Kareen; u. a. (2019): Handbook on the external costs of transport, Version 2019 – 1.1. European Commission. Website.

Etzold, Sophia; Waldner, Peter; Thimonier, Anne; u. a. (2014): Tree growth in Swiss forests between 1995 and 2010 in relation to climate and stand conditions: Recent disturbances matter. In: *Forest Ecology and Management*, 311, 41–55.

European Commission (2019): Handbook on the external costs of transport: version 2019. URL http://publications.europa.eu/publication/manifestation_identifier/PUB_MI0518051ENN, abgerufen am 9. Juli 2020.

- European Commission (2020): Handbook on the external costs of transport: version 2019 – 1.1. LU, Publications Office.
- EXIOPOL (2011): A new environmental accounting framework using externality data and input-output tools for policy analysis.
- Fuhrer, Jürg (2009): Ozone risk for crops and pastures in present and future climates. In: Naturwissenschaften, 96, 2, 173–194.
- Galli, Francesco; Rohrmann, Sabine und Lorez, Matthias (2019): Lung cancer survival in Switzerland by histology, TNM stage and age at diagnosis. Schweizer Krebsbulletin, Nr. 1/2019, S. 69-73.
- Garcia, Leandro; Pearce, Matthew; Abbas, Ali; u. a. (2023): Non-occupational physical activity and risk of cardiovascular disease, cancer and mortality outcomes: a dose–response meta-analysis of large prospective studies. In: British Journal of Sports Medicine.
- Garcia, Leandro und Woodcock, James (2023): Meta-Analyses Physical Activity, University of Cambridge, MRC Epidemiology Unit. URL <https://shiny.mrc-epid.cam.ac.uk/meta-analyses-physical-activity/>, abgerufen am 13. Juni 2023.
- Harmens, Harry und Mills, Gina (2012): Ozone Pollution: Impacts on carbon sequestration in Europe.
- HEIMTSA (2011a): Monetary values for health end-points used in the HEIMTSA / INTARESE Common Case Study. HEIMTSA (Health and Environment Integrated Methodology and Toolbox for Scenario Assessment) Deliverable 4.1.2.
- HEIMTSA (2011b): Presentation of unit values for health end-points: country-specific and pooled. HEIMTSA (Health and Environment Integrated Methodology and Toolbox for Scenario Assessment) Deliverable 4.1.3.
- Heutschi, K. und Locher, Barbara (2018): sonROAD18. Berechnungsmodell für Strassenlärm. Empa, 09.07.2018. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt. Dübendorf.
- Holland, Mike; Mills, Gina; Hayes, Felicity; u. a. (2002): Economic Assessment of Crop Yield Losses from Ozone Exposure.
- Hvidtfeldt, Ulla Arthur; Chen, Jie; Andersen, Zorana Jovanovic; u. a. (2021): Long-term exposure to fine particle elemental components and lung cancer incidence in the ELAPSE pooled cohort. In: Environmental Research, 193, 110568.
- IAP (2013): Wie geht es unserem Wald? – 29 Jahre Walddauerbeobachtung.
- IAP; Flückiger, W und Braun, Sabine (2004): Wie geht es unserem Wald? Ergebnisse aus Dauerbeobachtungsflächen von 1984 bis 2004. Bericht 2.
- IER, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart (2012): Sachstandspapier zu klassische Luftschadstoffe. Unveröffentlichte Studie für die UBA Methodenkonvention 2.0: Schätzung externer Umweltkosten und Vorschläge zur Kosteninternalisierung in ausgewählten Politikfeldern.
- IHME (2020): GBD 2019 Results Tool.
- IIASA International Institute for Applied Systems Analysis; Umweltbundesamt Österreich; EMRC; u. a. (2022): Support to the development of the third Clean Air Outlook. Annex to the Final Report. Specific Agreement 13 under Framework Contract ENV.C.3/FRA/2017/0012.

- INFRAS (2022): Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs HBEFA, Version 4.2. Berechnungstool im Auftrag der Schweiz, Deutschlands, Österreichs, Schwedens, Frankreichs und Norwegens. Bern.
- INFRAS und Climate Analytics (2021): Climate cost modelling – analysis of damage and mitigation frameworks and guidance for political use. UBA.
- INFRAS und EBP (2022): Kosten der Überlastung der Transportinfrastruktur (KÜTI). Grundlagenstudie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung.
- INFRAS und Ecoplan (2012a): Integration des Luftverkehrs in die Transportrechnung. Zürich und Bern, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Statistik und des Bundesamtes für Raumentwicklung. Schlussbericht.
- INFRAS und Ecoplan (2012b): Integration des Luftverkehrs in die Transportrechnung. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Statistik und des Bundesamtes für Raumentwicklung.
- INFRAS und Ecoplan (2019): Externe Kosten des Verkehrs 2015: Aktualisierung der Berechnungen von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten des Strassen-, schienen-, Luft- und Schiffsverkehrs 2010 bis 2015. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung.
- INFRAS und EMPA (2023): Batterien für Elektrofahrzeuge, Grundlagendokument, im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE).
- INFRAS und Meteotest (2020a): Immissionen Schweiz und Liechtenstein Modellresultate NO₂, PM₁₀, PM_{2.5} für 2015, 2020, 2030 Schlussbericht zu den Resultaten.
- INFRAS und Meteotest (2020b): NO₂-, PM₁₀- und PM_{2.5}-Immissionen Schweiz / Liechtenstein. Aktualisierung des PolluMap Modells für 2015, 2020 und 2030. Technischer Bericht.
- INFRAS und Planco (2017): Statistik der Kosten und Finanzierung des Verkehrs (KFV-Statistik) für den Teil Schiffsverkehr. Bundesamt für Statistik.
- INFRAS; SNZ; und Ecoplan (2013): Aktualisierte Schätzung zum schwerverkehrsbedingten Anteil an den Strassenkosten. . Synthesebericht.
- INFRAS und Wüest & Partner (2004): Verkehrsbedingte Gebäudeschäden in der Schweiz. Aktualisierung der externen Kosten. Zürich, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, des Bundesamtes für Energie sowie des Bundesamtes für Statistik.
- IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
- IPCC (2022a): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC (2022b): Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. 1. Aufl., Cambridge University Press.
- IRENE und Ecosys (2013a): L'imputation de la TVA dans le compte des transports. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Statistik.
- IRENE und Ecosys (2013b): L'integration de la navigation dans le compte des transports. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Statistik und des Bundesamtes für Raumentwicklung. IRENE (Institut de recherches économiques, Université de Neuchâtel).

- ISPM (Institut für Sozial- und Präventivmedizin am Schweizerischen Tropeninstitut Basel); Eco-plan; und Lungenliga Schweiz (2009): Gesundheitskosten des Passivrauchens in der Schweiz. Studie im Auftrag des Tabakpräventionsfonds.
- IVE mbH; ifeu; INFRAS; u. a. (2019): EcoTransit World.
- Karlsson, Per Erik; Pleijel, Håkan; Belhaj, Mohammed; u. a. (2005): Economic Assessment of the Negative Impacts of Ozone on Crop Yields and Forest Production. A Case Study of the Estate Östads Säteri in Southwestern Sweden. In: *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 34, 1, 32–40.
- König, Zweifel und Zweifel, Peter (2004): Willingness-to-pay Against Dementia: Effects of Altruism in Between Patients and Theirs Spouse Caregivers. Sozialökonomisches Institut, Universität Zürich. Working Paper No. 0410.
- Lee, D.S.; Fahey, D.W.; Skowron, A.; u. a. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. In: *Atmospheric Environment*, 244, 117834.
- Leeuw, Frank de und Horálek, Jan (2016): Quantifying the health impacts of ambient air pollution: methodology and input data ETC/ACM Technical Paper 2016/5. European Topic Centre on Air Pollution and Climate Change Mitigation (ETC/ACM).
- Liang, Chih-Sung; Li, Dian-Jeng; Yang, Fu-Chi; u. a. (2021): Mortality rates in Alzheimer's disease and non-Alzheimer's dementias: a systematic review and meta-analysis. In: *The Lancet Healthy Longevity*, 8, 2, E479–E488.
- Liu, Cong; Chen, Renjie; Sera, Francesco; u. a. (2019): Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. In: *New England Journal of Medicine*, 381, 8, 705–715.
- Liu, Shuo; Jørgensen, Jeanette T.; Ljungman, Petter; u. a. (2021): Long-term exposure to low-level air pollution and incidence of chronic obstructive pulmonary disease: The ELAPSE project. In: *Environment International*, 146, 106267.
- Mayer, Philipp; Brang, Peter; Dobbertin, Matthias; u. a. (2005): Forest storm damage is more frequent on acidic soils. In: *Annals of Forest Science*, 62, 4, 303–311.
- Metroeconomica Limited (2001): Monetary valuation of noise effects. Study prepared for the EC UNITE Project, sub-contracted to IER, Germany.
- Mills, G.; Buse, A.; Gimeno, B.; u. a. (2007): A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops. In: *Atmospheric Environment*, 41, 12, 2630–2643.
- National Academies of Sciences, et al. (2017): Valuing climate damages: Updating estimation of the social cost of carbon dioxide. In: National Academies Press.
- NEEDS (2008): Report on the procedure and data to generate averaged/aggregated data. RS (Research Stream) 3a, Deliverable D1.1. Excel-Tool mit Kostensätzen zu Luftschadstoffemissionen (u.a. Biodiversitätsverlusten) je Land.
- NKRS (2022): Die Statistiken zur nationalen Krebsinzidenz. Krebsinzidenz 1989-2019.
- OECD (2012): Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies. OECD.
- OECD (2023): Valuing a reduction in the risk of asthma. A large scale multi-country stated preference approach. OECD Environmental Working Papers No. 218.

- Ökoskop (1998): Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft. Gelterkinden/Bern. Vorstudie I, GVF-Auftrag Nr. 322.
- Orellano, Pablo; Reynoso, Julieta und Quaranta, Nancy (2023): Effects of air pollution on restricted activity days: systematic review and meta-analysis. In: *Environmental Health*, 22, 1, 31.
- Ostro, Bart D. und Rothschild, Susy (1989): Air pollution and acute respiratory morbidity: An observational study of multiple pollutants. In: *Environmental Research*, 50, 2, 238–247.
- Ott, W; Baur, M; Kaufmann, Y; u. a. (2006): Assessment of biodiversity losses. Deliverable D4.2 of the NEEDS project (NEEDS: New energy externalities development for sustainability). In: RS 1b/WP4.
- Pearce, Matthew; Garcia, Leandro; Abbas, Ali; u. a. (2022): Association Between Physical Activity and Risk of Depression: A Systematic Review and Meta-analysis. In: *JAMA Psychiatry*, 79, 6, 550–559.
- Physical Activity Guidelines Advisory Committee (2018): 2018 Physical Activity Guidelines Advisory Committee Scientific Report. Washington DC, U.S. Department of Health and Human Services.
- Prest, Brian C.; Rennels, Lisa; Errickson, Frank; u. a. (2024): Equity weighting increases the social cost of carbon. In: *Science*, 385, 6710, 715–717.
- Public Health England (2018): Estimation of costs to the NHS and social care due to the health impacts of air pollution.
- Sacchi, Romain und Bauer, Christian (2023): Life-cycle inventories for on-road vehicles.
- Schmidt, Marion; Brunner, Beatrice; Wieser, Simon; u. a. (2018): Assessing epidemiology and costs of asthma and COPD in Switzerland with health insurance data.
- Schmitt-Koopmann, Irmgard; Schwenkglenks, Matthias; Spinass, Giatgen A.; u. a. (2004): Direct medical costs of type 2 diabetes and its complications in Switzerland. *European Journal of Public Health* 14, S. 3–9.
- Schuler, Martin; Dessemontet, Pierre und Joye, Dominique (2005): Die Raumgliederungen der Schweiz. Eidg. Volkszählung 2000. Neuchâtel., Bundesamt für Statistik.
- Seco Staatssekretariat für Wirtschaft (2023): Szenarien zur BIP-Entwicklung der Schweiz.
- SIA (2020): Merkblatt 2032: Graue Energie - Ökobilanzierung für die Erstellung von Gebäuden.
- SN 641 820 (2018): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Grundnorm. Schweizer Norm des VSS (Forschung und Normierung im Strassen- und Verkehrswesen).
- Soares, Joana; Ortiz, Alberto González; Gsell, Artur; u. a. (2022): Health Risk Assessment of Air Pollution and the Impact of the New WHO Guidelines. European Topic Centre on Human Health and the Environment (ETC-HE).
- Sommer, Heini; Seethaler, Rita; Chancel, Olivier; u. a. (1999): Health Costs due to Road Traffic-related Air Pollution. Technical Report on Economy.
- Suter, Stefan; Sommer, Heini; Marti, Michael; u. a. (2002): The Pilot Accounts for Switzerland - Deliverable 5, Annex 2. UNITE (UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency) Working Funded by 5th Framework RTD Programme. ITS, University of Leeds, Leeds.

- swisstopo (2023): Das Topografische Landschaftsmodell TLM. URL <https://www.swisstopo.admin.ch/de/wissen-fakten/topografisches-landschaftsmodell.html>.
- Thayer, Mark A.; Chestnut, Lauraine G.; Lazo, Jeffrey K.; u. a. (2003): The Economic Valuation of Respiratory and Cardiovascular Hospitalizations. Studie im Auftrag des California Air Resources Board und der California Environmental Protection Agency. Contract Nr. 99-329.
- Tomonaga Y.; Haettenschwiler J.; Hatzinger M.; u. a. (2013): The Economic Burden of Depression in Switzerland. In: *Pharmacoeconomics*, 31, 237–250.
- UBA (2019): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze. Stand 02/19. URL <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-30-zur-ermittlung-von>, abgerufen am 17. August 2020.
- UBA (2020): Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze. Stand 02/20. URL <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten>, abgerufen am 17. August 2020.
- UBA Umweltbundesamt (2019): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten - Kostensätze. Stand 02/19. URL <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-30-zur-ermittlung-von>, abgerufen am 17. August 2020.
- UK-Department für Environment, Food & Rural Affairs (2023): Guidance: Air quality appraisal: impact pathways approach.
- UVEK Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation; ARE Bundesamt für Raumentwicklung; ASTRA Bundesamt für Strassen; u. a. (2021): Mobilität und Raum 2050. Sachplan Verkehr. Teil Programm.
- VSS 41 821 (2006): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Diskontsatz. Schweizer Norm des VSS (Forschung und Normierung im Strassen- und Verkehrswesen).
- VSS 41 824 (2013): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Unfallraten und Unfallkostensätze. Schweizer Norm des VSS (Forschung und Normierung im Strassen- und Verkehrswesen).
- VSS 41 828 (2022): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Externe Effekte im Bereich Umwelt und Gesundheit. Schweizer Norm des VSS (Forschung und Normierung im Strassen- und Verkehrswesen).
- Wernet, G; Bauer, Christian; Steubing, B.; u. a. (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology.
- WHO (2013): Health risks of air pollution in Europe - HRAPIE project recommendations for concentration–response functions for cost–benefit analysis of particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. World Health Organization (WHO). Regional Office for Europe.
- WHO (2021): WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization (WHO).
- WHO World Health Organisation (2018): Environmental noise guidelines for the European Region. URL http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/383921/noise-guidelines-eng.pdf?ua=1, abgerufen am 9. Juli 2020.
- Wieser, Simon; Tomonaga, Yuki; Riguzzi, Marco; u. a. (2014): Die Kosten der nichtübertragbaren Krankheiten in der Schweiz. Studie im Auftrag des Bundesamts für Gesundheit.

- Wilker, Elissa H.; Osman, Marwa und Weisskopf, Marc G. (2023): Ambient air pollution and clinical dementia: systematic review and meta-analysis. In: *BMJ*, 381, e071620.
- Woodruff, Tracey J.; Darrow, Lyndsey A. und Parker, Jennifer D. (2008): Air Pollution and Post-neonatal Infant Mortality in the United States, 1999–2002. In: *Environmental Health Perspectives*, 116, 1, 110–115.
- Work Loss Data Institute (2013): Official Disability Guideline.
- World Health Organization. Regional Office for Europe (2013): Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP project: technical report. World Health Organization. Regional Office for Europe.
- World Health Organization Regional Office for Europe (2024): Development of the health economic assessment tool (HEAT) for walking and cycling: seventh consensus meeting: meeting report: 8 March and 5 April 2023.
- Yang, Bo-Yi; Fan, Shujun; Thiering, Elisabeth; u. a. (2020): Ambient air pollution and diabetes: A systematic review and meta-analysis. In: *Environmental Research*, 180, 108817.
- Zarogoulidou, Vasiliki; Panagopoulou, Efharis; Papakosta, Despina; u. a. (2015): Estimating the direct and indirect costs of lung cancer: a prospective analysis in a Greek University Pulmonary Department. *Journal of Thoracic Disease* 7(S1): S12-S19.