

SCHLUSSBERICHT

Neuberechnung Staukosten Schweiz 2010-2014

von Mario Keller und Philipp Wüthrich



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Raumentwicklung ARE
Office fédéral du développement territorial ARE
Ufficio federale dello sviluppo territoriale ARE
Uffizi federal da svilup dal territori ARE

IMPRESSUM

Auftraggeber

Bundesamt für Raumentwicklung ARE

Bundesamt für Strassen ASTRA

Projektleitung

Franziska Borer Blindenbacher (ARE)

Autoren dieser Publikation

Mario Keller (MK Consulting)

Philipp Wüthrich (Infras)

Begleitgruppe

Franziska Borer Blindenbacher (ARE)

Jörg Dreier (ASTRA)

Nicolas Latuske (ASTRA)

Helmut Honermann (ARE)

Produktion

Rudolf Menzi, Leiter Kommunikation ARE

Herausgeber

Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)

Bezugsquelle

www.are.admin.ch

Inhalt

Abstract	6
Condensé	7
Riassunto	8
Abstract	9
Kurzfassung	10
Résumé	20
Riassunto	31
Summarised Version	42
1. Aufgabenstellung	53
1.1. Ausgangslage	53
1.2. Gliederung des Berichts	54
Teil A: Stauzeitkosten	55
2. Berechnung der Stauzeitkosten	55
2.1. Zum Begriff ‚Stau‘	55
2.2. Fragestellungen	58
2.3. Datengrundlagen	60
2.3.1. Daten zum Verkehrsfluss	60
2.3.2. Verkehrsnachfrage	63
2.3.3. Datenaufbereitung	64
2.3.4. Die Datensätze im Einzelnen	66
2.3.5. Mengengerüste	74
2.4. Staudauer und Fahrzeugstautunden	76
2.4.1. Staudauer 2013	76
2.4.2. Fahrzeugstautunden 2013	81
2.4.3. Entwicklung von Staudauer und Fahrzeugstautunden	89
2.5. Stauzeitkosten	93
2.5.1. Kostensätze	93
2.5.2. Stauzeitkosten 2013 und ihre Entwicklung	95
2.6. Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten	96
2.6.1. Methodik	96
2.6.2. Umsetzung	102
2.6.3. Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeiten und –kosten und ihre Entwicklung	104
2.7. Würdigung der Ergebnisse	106
2.7.1. Kernpunkte der Aktualisierung	106

2.7.2.	Vergleich der Ergebnisse mit früheren Studien (1998, 2007)	108
Teil B: Staubbedingte Umwelt- und Unfallkosten 2010		111
3.	Staubbedingte Umwelt-, Klima- und Energiekosten 2010	111
3.1.	Ausgangslage, Fragestellung	111
3.2.	Methodik, Definitions- und Abgrenzungsfragen (Umwelt, Klima, Energie)	111
3.2.1.	Gesamte Kosten Umwelt und Klima	111
3.2.2.	Staubbedingte Umwelt-, Klima- und Energiekosten	115
3.3.	Mengen- und Wertgerüst	118
3.3.1.	Umwelt- und Klimakosten	118
3.3.2.	Energiekosten	122
3.4.	Ergebnis: Staubbedingte Umwelt-, Klima- und Energiekosten	123
3.4.1.	Umwelt- und Klimakosten	123
3.4.2.	Energiekosten	124
3.5.	Interpretation	124
3.5.1.	Sensitivitäten	124
3.5.2.	Vergleich mit Gesamtumwelt-, Klima- und Energiekosten	126
3.5.3.	Vergleich mit früheren Ergebnissen	127
4.	Staubbedingte Unfallkosten 2010	129
4.1.	Ausgangslage, Fragestellung	129
4.2.	Definition staubbedingter Unfälle	129
4.3.	Mengengerüst	131
4.3.1.	Staubbedingte Unfälle	131
4.3.2.	Dunkelziffer	132
4.4.	Wertgerüst: Kostensätze	133
4.5.	Ergebnisse für die staubbedingten Unfallkosten 2010	133
Teil C: Übersicht über Gesamtstaukosten		136
5.	Gesamtstaukosten – Vergleich mit früheren Studien	136
Annex A		138
Annex A1:	Netzlängen und Fahrleistungen 2013	138
Annex A2:	Sensitivitätsrechnung 1: Fahrzeugstaukunden/a	139
Annex A3:	Herleitung der Entwicklung von Staudauer und Fahrzeugstaukunden	140
Annex A4:	Entwicklung der Fahrzeugstaukunden	141
Annex A5:	Kenngrossen zur Herleitung der Kostensätze	142
Annex A6:	Entwicklung der Stauzeitkosten	144
Annex A7:	Datengrundlagen INRIX: der Einfluss von „Scores“	145
Annex A8:	Erläuterungen zum Schwerverkehrsgewichtungsfaktor	146

Annex A9: Abschätzung von Zeitverlusten und Stauzeitkosten gemäss verschiedenen Untersuchungen _____	148
Annex B _____	149
Annex B1: Grundlagen Umweltkosten _____	149
Annex B2: Eckwerte Verkehrs- und Emissionsmengengerüst _____	150
Annex B3: Ergebnisse Umwelt-, Klima- und Energiekosten _____	152
Annex B4: Detaillierte Ergebnisse zu den Unfallkosten _____	153
Annex C _____	158
Annex C1: Abschätzung von Gesamtstaukosten in verschiedenen Untersuchungen _____	158
Abkürzungsverzeichnis _____	159
Literatur _____	161

Abstract

In dieser Studie werden die Staukosten für die Schweiz neu berechnet. Diese umfassen einerseits die Stauzeitkosten und andererseits den Anteil der staubedingten Umwelt- und Unfallkosten. Die Stauzeitkosten werden für die Jahre 2009 bis 2014 ermittelt, die übrigen staubedingten Kostenkomponenten für das Jahr 2010. Die Berechnungen stützen sich auf aktualisierte und neue Datengrundlagen ab, welche auch methodische Weiterentwicklungen ermöglichen.

Bei den Stauzeitkosten werden einerseits die Gesamtstauzeitkosten neu u.a. auf der Basis von Floating Car Data und Floating Phone Data ermittelt, andererseits werden die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten wiederum gemäss den vom Bundesgericht gemachten Vorgaben berechnet. Die Gesamtstauzeitkosten für 2010 werden auf 1.1 Mrd. CHF geschätzt und steigen bis 2014 auf 1.25 Mrd. CHF an. Die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten für 2010 werden auf 380 Mio. CHF veranschlagt und steigen bis 2014 auf 420 Mio. CHF an.

Die staubedingten Umwelt-, Klima- und Energiekosten werden für 2010 mit 30 Mio. CHF (Umwelt- und Klimakosten) bzw. 105 Mio. CHF (Energiekosten) ausgewiesen oder rund 1 % der entsprechenden gesamten Kosten. Die staubedingten Unfallkosten liegen für 2010 bei 330 Mio. CHF.

Condensé

La présente étude détaille le nouveau calcul des coûts des embouteillages en Suisse. Ces coûts comprennent d'une part le temps perdu dans les embouteillages et d'autre part les coûts environnementaux et les coûts liés aux accidents imputables aux embouteillages. Les coûts liés au temps perdu ont été calculés pour les années 2009 à 2014; les autres composantes de coûts dus aux embouteillages portent sur l'année 2010. Les calculs se fondent sur des bases de données, actualisées ou nouvelles, qui autorisent des évolutions méthodologiques.

Les coûts globaux liés au temps perdu sont désormais calculés à partir de données de véhicule circulant, ou floating car data, et de données du réseau mobile (floating phone data); par ailleurs, les coûts du temps perdu induits par le trafic poids lourds ont été recalculés conformément aux directives du Tribunal fédéral.

L'ensemble des coûts liés au temps perdu a été estimé à 1,1 milliard de francs pour l'année 2010, un chiffre qui croît à 1,25 milliard de francs pour 2014. Les coûts liés au temps perdu du trafic poids lourds sont estimés à 380 millions de francs pour 2010 et grimpent à 420 millions de francs en 2014.

Au chapitre de l'environnement, du climat et de l'énergie, les coûts se montent en 2010 à 30 millions de francs pour l'environnement et le climat et à 105 millions de francs pour l'énergie, soit approximativement 1 % de leur coûts totaux. Les accidents dus aux embouteillages ont coûté quant à eux dans les 330 millions de francs en 2010.

Riassunto

Nel presente studio vengono aggiornati i calcoli relativi ai costi delle code per la Svizzera. Tali costi comprendono i costi dei tempi di attesa dovuti alle code e la parte dei costi delle code associati all'ambiente e agli incidenti. I costi dei tempi di attesa dovuti alle code sono stati rilevati per gli anni dal 2009 al 2014, mentre i costi causati dalle code per le restanti componenti solo per l'anno 2010. I calcoli si basano su fonti di dati nuove e aggiornate che permettono inoltre ulteriori sviluppi metodologici.

Per i costi risultanti dai tempi di attesa sono stati rilevati i costi complessivi sulla base dei Floating Car Data e Floating Phone Data, e sono stati ricalcolati i costi causati dal traffico pesante secondo le indicazioni del Tribunale federale. Per il 2010, i costi complessivi dei tempi di attesa dovuti alle code sono stimati a 1,1 miliardo di franchi e per il 2014 salgono a 1,25 miliardi. La stima dei costi dei tempi di attesa riconducibili al traffico pesante per il 2010 ammonta a 380 milioni di franchi e sale a 420 milioni per il 2014.

I costi delle code associati a ambiente, clima ed energia per il 2010 ammontano a 30 milioni di franchi (ambiente e clima) e 105 milioni di franchi (energia), ossia a circa l'1 per cento dei costi complessivi. I costi delle code riconducibili agli incidenti per il 2010 ammontano a 330 milioni.

Abstract

This study recalculates traffic congestion costs for Switzerland. These comprise traffic delay costs, as well as the proportion of environmental and accident costs accounted for by congestion. Traffic delay costs are calculated for the period from 2009 to 2014, and the other congestion-related cost components for 2010. The calculations are based on new and updated data, which also allow the methodology to evolve.

Aggregate traffic delay costs, for example, are now determined with the inclusion of floating car data and floating phone data, while the traffic delay costs caused by heavy vehicles are calculated in accordance with the requirements laid down by the Federal Supreme Court. Aggregate traffic delay costs for 2010 are estimated at CHF 1.1 billion, and rise to CHF 1.25 billion in 2014. The traffic delay costs caused by heavy vehicles are assessed as CHF 380 million for 2010, rising to CHF 420 million in 2014.

Congestion-related environmental, climate and energy costs are reported as CHF 30 million (environmental and climate) and CHF 105 million (energy), or around 1 % of their respective totals, for 2010. Congestion-related accident costs for the same year are put at CHF 330 million.

Kurzfassung

Zielsetzung

Das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) publiziert seit 2005 jährlich Zahlen zu den externen Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs in der Schweiz. Diese spielen u.a. im Kontext der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) eine wichtige Rolle. Die Frage, ob auch Staukosten als Teil der externen Kosten zu betrachten sind, ist inzwischen durch das Bundesgericht beantwortet. Es hat gleichzeitig auch Vorgaben gemacht, wie diese zu ermitteln sind. Die neueste Studie zu den externen Kosten hat das ARE im Juli 2014 publiziert – allerdings ohne die Staukosten miteinzubeziehen. Die vorliegende Untersuchung macht diese Ergänzung. Sie umfasst zwei Teile: Teil A behandelt die Stauzeitkosten, Teil B fragt nach den staubedingten Anteilen der in der erwähnten Studie zu den externen Kosten bereits bezifferten Umwelt- und Unfallkosten.

Teil A: Stauzeitkosten

Bei der Berechnung der Stauzeitkosten geht es im Wesentlichen um zwei Aufgaben: der Ermittlung der Staukosten insgesamt sowie um die Abschätzung des Anteils der durch den Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten. Das sind methodisch zwei unterschiedliche Aufgaben:

- Die erste Aufgabe besteht darin, die Verlustzeiten der durch Stau Betroffenen zu ermitteln. Das Ergebnis lässt sich ausdrücken in Fahrzeug-Staustunden. Das ist nicht zu verwechseln mit der oft zitierten ‚Staudauer‘, welche lediglich die Anzahl Stunden mit Stau meint, ohne auszusagen, wie viele Strassenbenutzer davon betroffen sind. Mit Hilfe von Kostensätzen (z.B. gemäss VSS-Normen) lassen sich die Fahrzeug-Staustunden in Frankenbeträge transformieren.
- Bei der zweiten Aufgabe geht es um den Anteil der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten. Das Bundesgericht hat dazu Vorgaben formuliert, wie dies zu erfolgen hat. Demnach ist die sogenannte Sichtweise „Verkehrsart“ anzuwenden. Für die Quantifizierung bedeutet dies, dass die reale heutige Situation unter Einbezug des Schwerverkehrs verglichen werden soll mit einer fiktiven Situation der Strassenbenutzung ohne Schwerverkehr. Aus diesem Vergleich „real“ versus „fiktiv“ lässt sich der Anteil der dem Schwerverkehr anrechenbaren Stauzeitkosten ableiten.

Beide Aufgaben wurden bereits in einer Vorgängerstudie (ARE 2012) behandelt. Ziel war es deshalb, jene Ergebnisse für die Bezugsjahre 2009 und 2010 zu konsolidieren und gleichzeitig für die Jahre bis 2014 neu zu ermitteln. Besonderes Augenmerk sollte auf den Nicht-Autobahnbereich gelegt werden, welcher in der Studie 2012 nur rudimentär abgedeckt werden konnte.

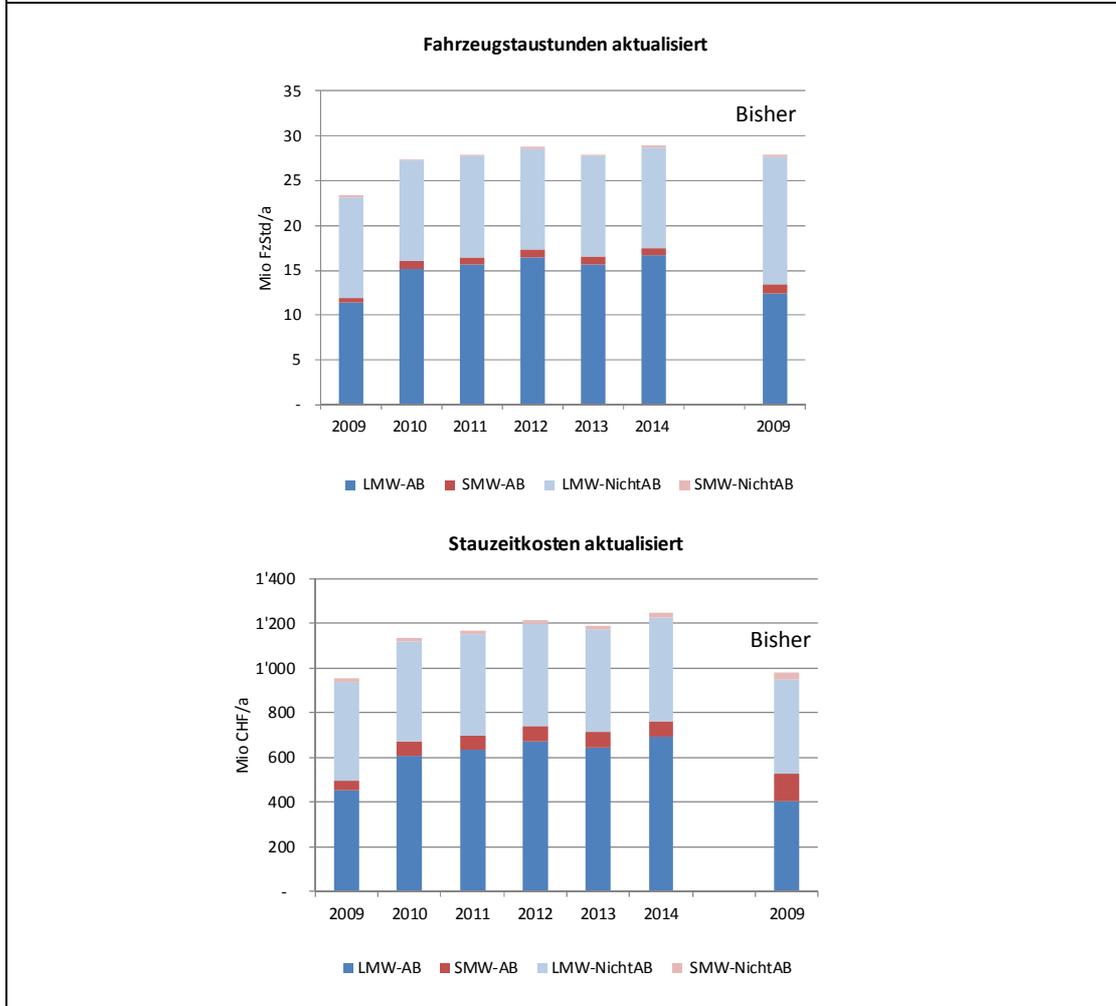
Gesamtstauzeitkosten

Wenn in der vorliegenden Untersuchung von Stauzeitkosten die Rede ist, sind damit effektiv erlittene Verlustzeiten gemeint. Verkehrszusammenbrüche oder auch regelmässig auftretende Phasen von stockendem Verkehr führen bei den Verkehrsteilnehmern aber oft zu Verhaltensänderungen, indem sie für ihre Fahrten vorsorglich Reservezeiten einbauen, um gewisse zeitkritische Termine (wie etwa das Erreichen einer Flugabfahrt oder wichtiger Sitzungstermine) verlässlich einhalten zu können. Solche Aspekte der Zuverlässigkeit (oder „sekundäre“ Wirkungen von Stauphasen) werden hier nicht weiter in Rechnung gestellt, eben so wenig wie weitere Folgekosten – etwa Effekte verzögerter Anlieferungen von Produkten bei Produktionsprozessen etc. Zum einen sind dazu kaum quantitative Grundlagen verfügbar, zum andern interessieren hier die Stauzeitkosten vor allem auch im Kontext der Internalisierung der vom Schwerverkehr verursachten externen Kosten. Dabei ist der sogenannte „At least“-Ansatz zu beachten; dieser bedeutet, dass bei Unsicherheiten vorsichtige Annahmen getroffen werden sollen, die eher zu einer Unter- als einer Überschätzung der tatsächlichen Kosten führen. Ein Verzicht auf die erwähnten Elemente der Zuverlässigkeit und weiteren Folgekosten bedeutet, dass die effektiven Staukosten höher liegen als die, welche in dieser Untersuchung mit den effektiv erlittenen Verlustzeiten erfasst werden.

Die Berechnung von Stauzeitkosten ist einerseits angewiesen auf Daten zum Verkehrsfluss zur Identifikation von Stau, andererseits auf Daten zur Verkehrsnachfrage zur Ermittlung der Anzahl davon Betroffener. Zum Verkehrsfluss existieren heute im Wesentlichen drei Datensätze: die Staustatistik von Viasuisse, die automatischen Verkehrszählungen einschliesslich Geschwindigkeitsmessungen des Bundesamts für Strassen (ASTRA) sowie – neuerdings – Floating Car Data (FCD) und Floating Phone Data (FPD), d.h. Daten, die aus Fahrzeugen heraus generiert werden, welche aktuell am Verkehrsgeschehen teilnehmen. In Absprache mit dem Auftraggeber wurde beschlossen, die Berechnungen auf der Basis von FCD/FPD zu ermitteln. Dazu wurde ein Datensatz des Providers INRIX erworben, der für alle Strecken des schweizerischen TMC-Strassennetzes (Traffic Message Channel) für alle Minuten der 365 Tage des Jahres 2013 eine mittlere Geschwindigkeit enthielt. Diesem musste noch die Verkehrsnachfrage hinzugefügt werden. Die Nachfragezahlen (als durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV) pro Strecke, differenziert nach Personen-, Liefer- und Lastwagen) wurden vom nationalen Personenverkehrsmo- dell (NPVM) bezogen und über eine spezielle Prozedur („Conflation“) auf das TMC-Netz (Traffic Message Channel) übertragen. Anschliessend wurden die Tagesverkehrszahlen anhand von typischen Jahres-, Wochen- und Tagesganglinien „minutenscharf“ den Verkehrsflussdaten zugeordnet. So liessen sich die Verlustzeiten je Minute und Streckenabschnitt berechnen (aus dem Vergleich von effektiv benötigter Zeit mit dem Zeitbedarf einer unbehinderten Fahrt). Als „Staukriterium“ wurde das von INRIX üblicherweise verwendete Geschwindigkeitsverhältnis

verwendet, d.h. nur Fahrten mit einer Geschwindigkeit $< 65\%$ der Referenzgeschwindigkeit (= unbehinderter Fahrt) wurden als staurelevant betrachtet. Eine genauere Analyse der Daten hat dann allerdings gezeigt, dass die Daten nicht unesehen übernommen werden konnten, da z.B. die Streckenabschnitte v.a. im Nicht-Autobahnbereich zuweilen so lang waren, dass Stauereignisse durch die Mittelwert-Bildung über die Abschnittslänge „wegaggregiert“ werden. Zudem sind die Geschwindigkeitsangaben auf die Nutzung für die Verkehrsinformation (z.B. Routing) ausgerichtet, d.h. sie geben die schnellste Fahrtmöglichkeit an. Auch kommen keine Datensätze (d.h. Minuten) vor, deren mittlere Geschwindigkeit null wäre, was z.B. im Falle von Unfällen oder Pannen durchaus zuweilen vorkommt. Entsprechend wurden die Daten neu interpretiert, dies auch vor dem Hintergrund, dass INRIX selber ab 2014 das Streckennetz feiner aufgliedert und auch die Aufbereitung der Daten namentlich im tiefen Geschwindigkeitsbereich überarbeitet hat. Gleichzeitig wurden Vergleiche mit andern erwähnten Datenquellen gemacht (z.B. anhand des Indikators Staudauer). Diese zeigten zum Teil markante Abweichungen, ohne dass systematische Abweichungen des einen oder andern Datensatzes im Sinne der Über- oder Unterschätzung festgestellt werden konnten. Die so ermittelten Verlustzeiten konnten anschliessend mit Kostensätzen (CHF/Fahrzeug-Stunde) monetarisiert werden. Dabei wurden neu die Kostensätze von aktuellen VSS-Normen aus dem Kontext von Projektevaluationen verwendet. Die „Basisrechnung“ wurde für das Jahr 2013 durchgeführt, da lediglich für dieses Jahr der entsprechende INRIX-Verkehrsfluss-Datensatz verfügbar war. Für die Ermittlung der Verlustzeiten bzw. Stauzeitkosten für die andern Jahre (2009 bis 2014) wurde deshalb auf die Online-Daten der ASTRA-Zählstellen zurückgegriffen; dabei wurden je Zählstelle die spezifischen Verlustzeiten ermittelt und daraus eine relative Entwicklung der Stausituation abgeleitet. Analoges wurde auch für die Stauzeitkostenentwicklung durchgeführt. Abbildung Z-1 zeigt die aktualisierten Ergebnisse (Verlustzeiten und Stauzeitkosten) sowie auch die entsprechenden Werte der früheren Studie 2012.

Abbildung Z-1: Entwicklung der Fahrzeugstautunden und Stauzeitkosten, differenziert nach Leichten Motorwagen (LMW = Personen- + Lieferwagen) sowie SMW (Schwere Motorwagen), und nach Autobahnen (AB) und Nicht-Autobahnen. Die bisherigen Werte gemäss der Studie 2012 sind rechts aussen eingetragen.



Die Stauzeitkosten für die leichten Motorwagen (LMW) für das Jahr 2009 bleiben in der gleichen Grössenordnung wie in der früheren Studie ausgewiesen (aktualisiert 896 Mio. CHF, bisher 824 Mio. CHF). Darin spiegeln sich kompensatorische Effekte wieder: einerseits leicht tiefere Stauzeiten, andererseits höhere Kostensätze. Die grösste Veränderung bzw. Reduktion ist beim Schwerverkehr (SMW) festzustellen: die Stauzeiten liegen um rund die Hälfte tiefer, und die Kosten sind um rund zwei Drittel geringer aufgrund der rund 30% tieferen Kostensätze. Insgesamt steigen die Stauzeitkosten von 2009 (aktualisiert auf rund 0.95 Mrd. CHF veranschlagt, bisher 0.98 Mrd. CHF) bis ins Jahr 2014 auf rund 1.25 Mrd. CHF an, wobei der Grossteil beim Nicht-Schwerverkehr anfällt.

Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten

Die Abschätzung der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten erfolgt gemäss den vom Bundesgericht gemachten Vorgaben. Demnach werden die Stauzeitkosten einmal für einen Zustand MIT und einmal für einen Zustand OHNE Schwerverkehr ermittelt. Die Differenz entspricht dem gesuchten Wert der dem Schwerverkehr anzulastenden Stauzeitkosten. Die in der Studie 2012 bereits applizierte Methodik wurde dabei aufgenommen und weiter entwickelt. Als Datenbasis wurden hier die Online-Daten der ASTRA-Zählstellen verwendet, weil hier die Angaben zum Verkehrsfluss und der Nachfrage gleichzeitig und ohne nachträgliche modellmässige Zuordnung verfügbar sind. Daraus wurden je Zählstelle Fundamentaldiagramme entwickelt (Darstellung der Geschwindigkeit in Funktion der Nachfrage). Anhand dieser Diagramme konnten CR-Funktionen (Capacity Restraint) abgeleitet werden, welche aussagen, wie gross der zusätzliche Zeitverlust bei zunehmender Nachfrage ist. Dieser Ansatz ist bis zur Kapazitätsgrenze tauglich. Typischerweise bricht bei der Kapazitätsgrenze die Geschwindigkeit aber ein. Für diesen Punkt wurde deshalb je Zählstelle eine „Grenzgeschwindigkeit“ ermittelt. Gleichzeitig liess sich für den unteren Geschwindigkeitsbereich auch eine entsprechende Wahrscheinlichkeitsfunktion ableiten, welche aussagt, bei welcher Nachfrage die Geschwindigkeit einbricht (pE-Funktion) und zu Stau führt. Mit diesem Ansatz kann man somit die beiden Geschwindigkeitsbereiche im Fundamentaldiagramm behandeln: oberhalb der Grenzgeschwindigkeit mit der CR-Funktion, unterhalb der Grenzgeschwindigkeit mit der pE-Funktion. Mit diesen beiden Funktionen wurden dann die Verlustzeiten – einmal MIT und einmal OHNE Schwerverkehr – ermittelt. Ein nicht unwesentlicher Faktor ist dabei die Konversion von Schwere Motorwagen in Personewageneinheiten (PWE). In Abweichung zur früheren Studie wurde neu ein Faktor 2.0 (statt 2.5) verwendet – im Sinne des oben erwähnten „At least“-Ansatzes. Tabelle Z-1 zeigt die entsprechenden Ergebnisse. Demnach sind für 2014 rund 420 Mio. CHF als vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten zu bezeichnen. Im Vergleich zu den in der Studie 2012 veranschlagten Werten bestätigt die Aktualisierung den Wert für das Jahr 2009 weitgehend (300 statt 291 Mio. CHF). Für das Jahr 2010 liegt die neue Zahl (378 Mio. CHF) etwas unter dem damals geschätzten Wert von 401 Mio. CHF.

Tabelle Z-1: Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten (aktualisiert; Werte gerundet)				
		Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten (Mio CHF/a)		
		Autobahnen	Nicht- Autobahnen	total
aktualisiert	2009	221	79	300
"	2010	297	80	378
"	2011	310	81	391
"	2012	328	82	411
"	2013	316	83	398
"	2014	337	83	421
bisher	2009	225	66	291

Die unter „bisher“ aufgeführten Werte stammen aus der Studie ARE (2012).

Teil B: Staubedingte Umwelt- und Unfallkosten 2010

Grundsätzlich sind die staubedingten Umwelt- und Unfallkosten bereits in den externen Kosten in der vom ARE im Juli 2014 publizierten Studie enthalten. An dieser Stelle interessiert primär, wie viel dieser Kosten als staubedingt bezeichnet werden können. Diese Analysen wurden für das Jahr 2010 durchgeführt, entsprechend den Angaben in der erwähnten Studie.

Staubedingte Umwelt-, Klima- und Energiekosten 2010

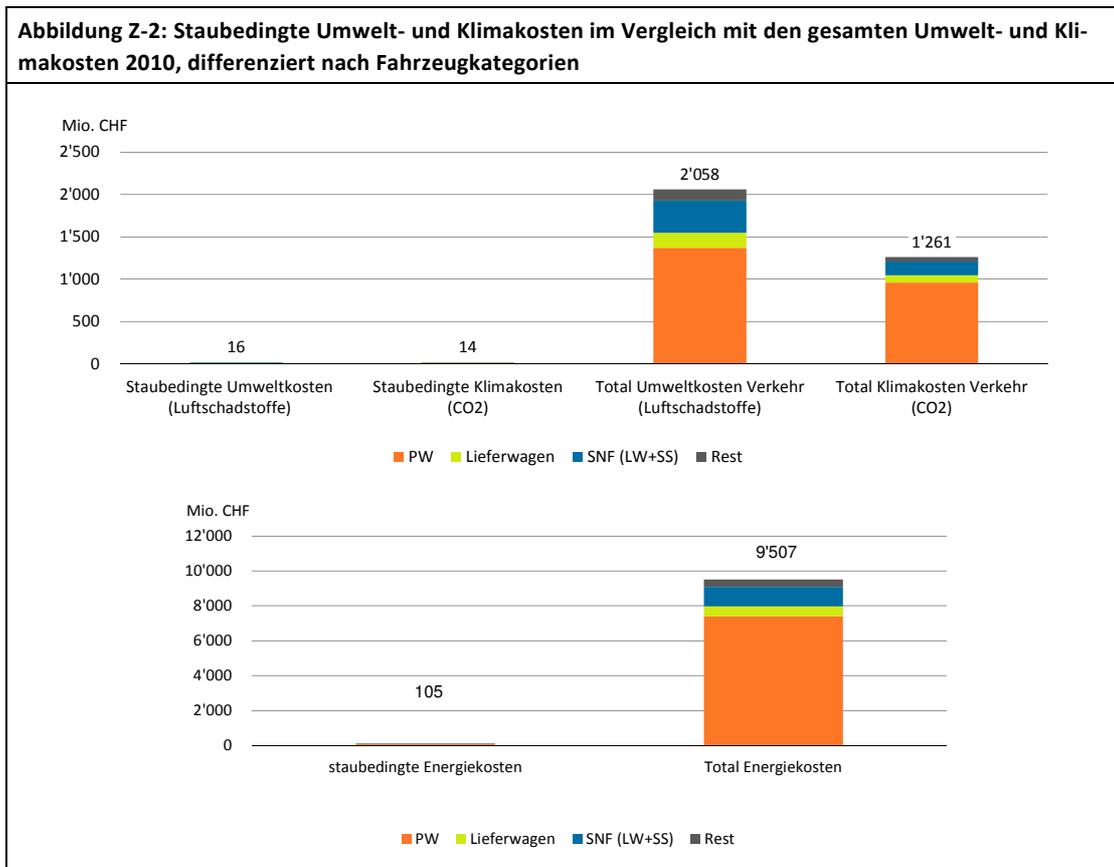
Die Umwelt- und Klimakosten stellen aus Verkehrsträgersicht externe Kosten dar, denn sie werden nicht von den Verkehrsteilnehmern selbst getragen, sondern von der Allgemeinheit. Ein Sonderfall sind die Energiekosten z.B. infolge ineffizienterer Fahrweise in Stausituationen: diese werden von den Verkehrsteilnehmern selbst getragen und sind daher aus Verkehrsträgersicht interne Kosten. Sie werden hier gleichwohl ausgewiesen.

Die Ermittlung der staubedingten Umweltkosten folgt entlang der Wirkungskette Luftschadstoffemissionen → Immissionen → Schäden → Kosten, analog zur Ermittlung der gesamten externen Umweltkosten. Vereinfachend wird PM10 als Leitschadstoff verwendet, innerhalb des Leitschadstoffs PM10 wird weiter differenziert nach primärem und sekundärem PM10. Kernpunkt der Methodik ist die Ermittlung staubedingter PM10-Emissionen im Vergleich zu einer fiktiven, staufreien Situation. Die Differenz bzw. das Verhältnis zwischen Referenzrechnung und staufreier Situation entspricht dann dem Stau-Anteil der Emissionen. Abbildung Z-2 zeigt die entsprechenden Ergebnisse, und zwar dargestellt im Verhältnis zu den gesamten Umwelt- und Klima- bzw. Energiekosten. Demnach ist die Bedeutung der staubedingten Anteile gering.

In beiden Teilbereichen machen diese lediglich rund 1 % der gesamten Umwelt- und Klimakosten bzw. Energiekosten aus.

Vergleich zur bisherigen Staukosten-Studie (ARE 2007)

Die staubedingten Umwelt-, Klima- und Energiekosten wurden letztmals in einer ARE-Studie (2007) berechnet. Die Umwelt- und Klimakosten wurden damals auf rund 15 bis 20 Mio. CHF für das Jahr 2005 geschätzt (je nachdem ob „kleine Zeitverluste“ auch mit berücksichtigt wurden), die Energiekosten auf 55 bis 84 Mio. CHF. Die aktualisierten Ergebnisse veranschlagen diese Kosten neu für das Jahr 2010 auf 30 Mio. CHF (Umwelt- und Klimakosten) bzw. 105 Mio. CHF (Energiekosten), also deutlich höher, da sie mit den untern Werten der früheren Studie zu vergleichen sind. Zurückzuführen sind diese höheren Werte für 2010 auf die Zunahme der Fahrleistungen insgesamt, vor allem aber auf die etwas höheren Stauanteile. Allerdings sind diese Differenzen gemessen an den gesamten Umwelt-, Klima- und Energiekosten fast vernachlässigbar klein.



Fahrzeugkategorien: Personenwagen [PW], Lieferwagen, Schwere Nutzfahrzeuge [SNF], bestehend aus Lastwagen [LW] und Sattelschleppern [SS]. Motorräder und Busse sind unter ‚Rest‘ subsummiert.

Staubedingte Unfallkosten 2010

Bei den Unfallkosten lautet die Frage analog: wie gross ist der Anteil staubedingter Unfallkosten, nachdem die gesamten Unfallkosten in der Studie ARE 2007 ermittelt wurden. Wie gross dieser Anteil ist, hängt stark von der Definition ab, was als „staubedingt“ gelten soll. In der bisherigen Studie zu den Staukosten des Strassenverkehrs in der Schweiz (ARE 2007) wurden die staubedingten Unfälle wie folgt definiert:

- Auffahrunfälle auf Autobahnen und Autostrassen
 - auf stehende Fahrzeuge = untere Grenze
 - inklusive auf fahrende Fahrzeuge = obere Grenze
- Auffahrunfälle auf anderen Strassen wurden ausgeblendet, da sie mutmasslich grösstenteils andere Ursachen haben (z.B. Linksabbiegen des vorausfahrenden Fahrzeuges).

Die neuen Datengrundlagen des ASTRA erlauben eine neue Vorgehensweise. Insbesondere werden ab 2011 bei jedem Unfall die sogenannten Verkehrsbedingungen erfasst. So könnten auch Unfälle im „starken“ Verkehr als staubedingt betrachtet werden. Für die Ermittlung der staubedingten Unfallkosten wurde auf der Basis der Unfalldatenbank des ASTRA ein entsprechendes Mengengerüst ermittelt. Das Wertgerüst (Kostensätze) wurde aus der erwähnten Studie übernommen.

Die nachstehende Tabelle zeigt das Ergebnis für die sozialen Kosten im Jahr 2010. Insgesamt treten staubedingte Unfallkosten von 329 Mio. CHF auf. Hinter dieser Zahl stehen folgende Annahmen:

Mio CHF/a	AB/AS	übrige Strassen	Total	%
Auffahrunfall	132.4	99.9	232.3	71%
übrige Arten	57.6	38.8	96.3	29%
Total	190.0	138.6	328.6	100%
%	58%	42%	100%	

AB: Autobahnen, AS: Autostrassen

- Auf Autobahnen und Autostrassen werden alle Unfallarten bei stehenden oder stockenden Kolonnen sowie 50% der Unfälle bei starkem Verkehr als staubedingt betrachtet.
- Auf den übrigen Strassen werden Auffahrunfälle zu 50% berücksichtigt; von den übrigen Unfallarten werden 50% der Unfälle bei stehendem oder stockendem Kolonnenverkehr ebenfalls als staubedingt gezählt.

Somit sind 58% der staubedingten Unfallkosten auf Unfälle auf Autobahnen und Autostrassen zurückzuführen, 42% auf Unfälle auf den übrigen Strassen. 71% sind Auffahrunfälle, der Rest entfällt auf verschiedene weitere Arten wie Schleuderunfälle, Überholunfälle oder Fahrstreifenwechsel. Wie gross der Anteil der staubedingten Kosten letztlich ist, hängt weitgehend von den oben erwähnten Annahmen ab. Würden die Unfälle im starken Verkehr nicht als staubedingt angesehen, so würden die staubedingten Unfallkosten auf 301 Mio. CHF sinken. Würden hingegen alle Unfälle im starken Verkehr als staubedingt betrachtet, so würden die Unfallkosten auf 862 Mio. CHF steigen.

Vergleich zur bisherigen Staukosten-Studie (ARE 2007)

In der letzten Staukosten-Studie, in der auch Unfallkosten als Teil der Staukosten abgeschätzt wurden, wurden nur Auffahrunfälle auf Autobahnen und Autostrassen miteinbezogen. Dies ergab für 2005 soziale Kosten von 121 Mio. CHF. Der am ehesten vergleichbare aktualisierte Wert liegt bei 132 Mio. CHF. Allerdings zeigt Tabelle Z-2, dass durchaus ein grösserer Anteil der Unfälle der Kategorie „staubedingt“ zugewiesen werden kann.

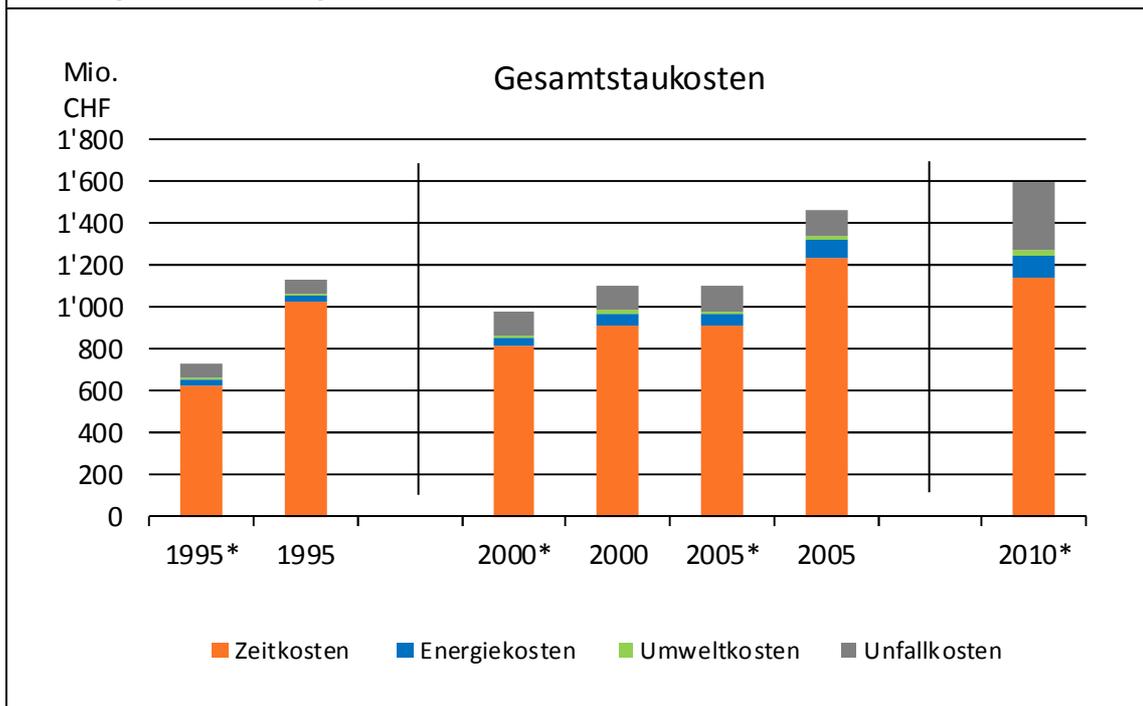
Teil C: Übersicht über Gesamtstaukosten

Mittlerweile liegt eine Reihe von Untersuchungen zu den Staukosten vor: die erste Untersuchung datiert aus dem Jahr 1998 mit Fokus auf das Bezugsjahr 1995 (ASTRA 1998). Eine Aktualisierung wurde im Jahr 2007 durchgeführt mit Blick auf die Jahre 2000 und 2005. Die vorliegende Untersuchung macht Aussagen zum Bezugsjahr 2010. Abbildung Z-3 zeigt die entsprechenden Ergebnisse, wobei für die Jahre 1995, 2000 und 2005 jeweils zwei Werte angegeben sind, einmal eine „Sensitivitätsbetrachtung“ ohne Einbezug kleiner Zeitverluste im Nicht-Autobahnbereich (in der Abbildung markiert mit einem Stern nach der Jahreszahl) und einmal eine „Basisrechnung“ unter Einbezug auch kleiner Zeitverluste. Für das Jahr 2010 wird der Schwerpunkt bewusst auf die Version „ohne Einbezug kleiner Zeitverluste“ gelegt, um dem „At least“-Ansatz Rechnung zu tragen; deshalb erscheint in der Abbildung nur eine Zahl.

Grundsätzlich zeigt die Abbildung einen kontinuierlichen Anstieg der Staukosten über die Zeitspanne seit 1995. Weil die Datengrundlagen wie auch die Berechnungsmethoden aber teilweise signifikant geändert haben, können die Ergebnisse nur bedingt als Zeitreihe betrachtet werden. Vielmehr hängen die Differenzen zwischen den Jahren stark vom Wechsel von Methodik und Datengrundlagen in den verschiedenen Studien ab, so dass die Abbildung nicht zwangsläufig die effektive zeitliche Entwicklung abbildet. Die Differenzen betreffen die Ermittlung der Mengengerüste wie die Verlustzeiten, aber auch andere Elemente wie etwa ein Wechsel der Kostensätze (z.B. eine Reduktion von 30% bei den Kostensätzen für die Schweren Motorwagen in dieser Studie im Vergleich zur letzten Untersuchung).

Auffallend ist, dass andere Komponenten – vor allem die Unfallkosten und teilweise auch die Energiekosten – neu stärker ins Gewicht fallen (der Vergleich wird anhand der Versionen „ohne Einbezug kleiner Zeitverluste“ gemacht, wobei die Unfallkosten in beiden Versionen gleich sind, da diese unabhängig sind von der Differenzierung der Zeitverluste). Die Zeitkosten machten in der letzten Untersuchung rund 80% bis 85% der Gesamtstaukosten aus. Neu ist ihr Anteil von rund 70% zwar noch immer die Hauptkomponente, aber namentlich die Unfall- und in geringerem Umfang die Energiekosten schlagen aus heutiger Sicht stärker zu Buche schlagen als es vor knapp 10 Jahren noch der Fall war. Letztlich sind es methodische und inputdaten-spezifische Gründe, welche zu diesen Änderungen führen.

Abbildung Z-3: Abschätzungen von Staukosten für verschiedene Jahre gemäss verschiedenen Studien: ASTRA 1998 für 1995, ARE 2007 für die Jahre 2000 und 2005, die vorliegende Untersuchung ARE/ASTRA für das Jahr 2010.



Die Kolonnen mit dem Zusatz „*“ blenden kleine Zeitverzögerungen aus.

Résumé

Objectif

Depuis 2005, l'Office fédéral du développement territorial (ARE) publie chaque année des chiffres sur les coûts externes de la circulation routière et ferroviaire en Suisse. Ces chiffres jouent un rôle important entre autres dans le contexte de la redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations (RPLP). Le Tribunal fédéral a récemment tranché la question de savoir si le coût des embouteillages était à considérer comme faisant partie des coûts externes. En même temps, il a édicté des directives concernant la manière de déterminer ces coûts. La dernière étude concernant les coûts externes a été publiée par l'ARE en juillet 2014 – néanmoins sans prise en compte du coût des embouteillages. La présente étude fait ce complément. Elle comprend deux parties : la partie A porte sur les coûts du temps perdu dans les embouteillages et la partie B examine les éléments des coûts externes (environnement et accidents) dus aux embouteillages et qui sont déjà chiffrés dans l'étude mentionnée.

Partie A : coûts du temps perdu dans les embouteillages

Le calcul des coûts du temps perdu dans les embouteillages se décompose en deux opérations : la détermination du coût global des embouteillages et l'estimation de la proportion de ces coûts imputable aux poids lourds. Sous l'angle de la méthode, les deux opérations sont bien distinctes.

- La première opération consiste à déterminer le coût du temps perdu dans les embouteillages par les personnes concernées. Le résultat peut être exprimé en heures-véhicules, qu'il ne faut pas confondre avec la notion plus courante de durée d'embouteillage, qui recouvre uniquement le nombre d'heures d'embouteillage, sans prise en compte du nombre d'utilisateurs de la route concernés. La méthode des coûts unitaires (p. ex. selon les normes VSS) permet de convertir les heures-véhicules en francs.
- Dans la deuxième opération, il s'agit de calculer la part du coût des embouteillages causée par les poids lourds. Le Tribunal fédéral a formulé deux directives sur le mode de calcul et recommande de suivre l'approche « catégorie trafic poids lourds ». Concernant la quantification, cela signifie que la situation réelle d'aujourd'hui est comparée avec une situation fictive de circulation routière sans les poids lourds. De cette comparaison entre le réel et le fictif, on peut déduire la part des coûts du temps perdu représentée par les poids lourds.

Les deux opérations ont déjà été traitées dans une étude précédente (ARE, 2012). L'objectif est donc maintenant de consolider les résultats des années de référence 2009 et 2010 tout en poursuivant les calculs jusqu'à 2014. Une attention particulière a été portée au réseau non autoroutier, traité de manière rudimentaire dans l'étude de 2012.

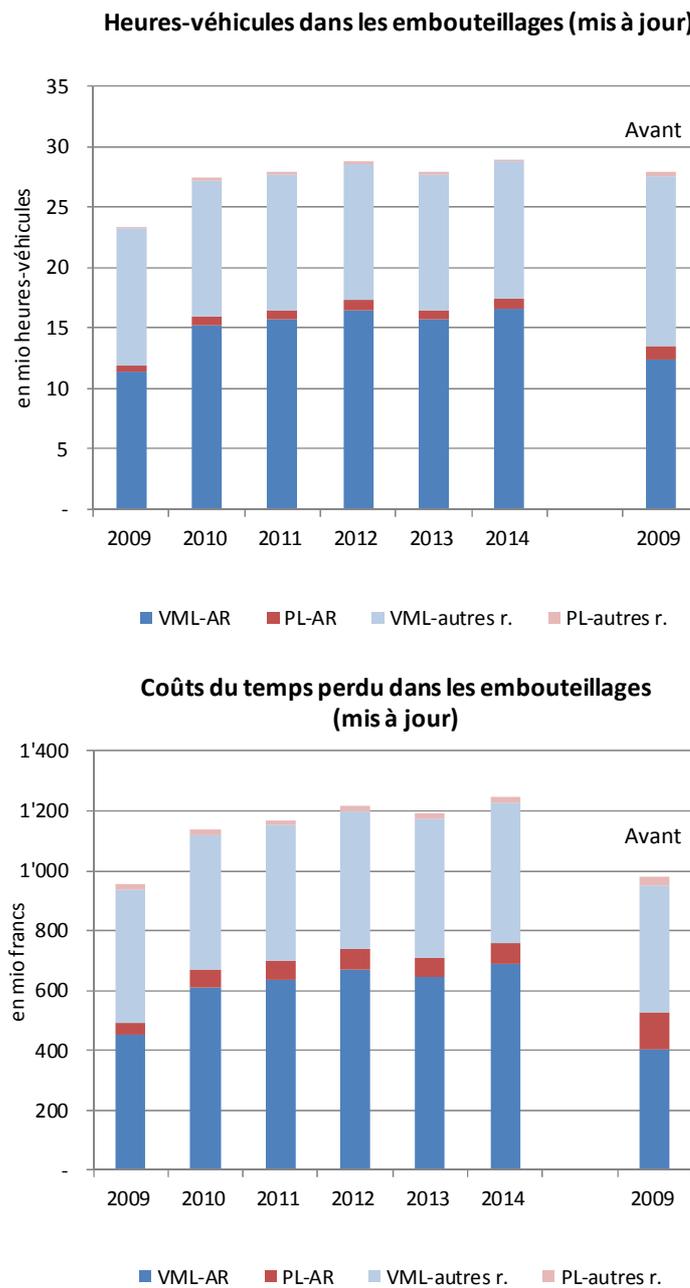
Coûts globaux du temps perdu dans les embouteillages

Dans la présente enquête, la mention des coûts du temps perdu dans les embouteillages fait référence aux pertes de temps effectivement subies. Toutefois, les défaillances du trafic ou la fréquence des périodes de trafic en accordéon mènent souvent les usagers à ajuster leur comportement et à prévoir une marge de temps supplémentaire pour être sûrs d'arriver à temps (en cas de rendez-vous important, d'avion à prendre, etc.). Ces aspects de ponctualité (que l'on peut aussi appeler « effets secondaires » des embouteillages) ne sont pas pris en compte ici, pas davantage que les autres coûts incidents – par exemple les conséquences des retards de livraison dans les processus de production. D'une part, ces aspects sont difficilement quantifiables, par manque de données disponibles. D'autre part, le coût du temps perdu dans les embouteillages est surtout pertinent ici dans le contexte de l'internalisation des coûts externes causés par le trafic poids lourds. A cet égard, il faut adopter une approche « minimaliste », dans laquelle les incertitudes se traduisent par des hypothèses prudentes où les coûts seront plus volontiers sous-estimés que surestimés. Renoncer aux points mentionnés sur la ponctualité et les autres coûts incidents signifie que le coût effectif des bouchons dépasse celui des pertes de temps effectivement subies telles que déterminées dans la présente étude.

Le calcul des coûts du temps perdu dans les embouteillages nécessite d'une part des données sur la fluidité de la circulation pour l'identification des embouteillages, et d'autre part des données sur la demande de transport pour l'identification du nombre de personnes concernées. Trois jeux de données principaux existent aujourd'hui sur la fluidité du trafic : les statistiques d'embouteillage de Viasuisse, les comptages automatiques de la circulation de l'OFROU, comprenant des mesures de vitesse, ainsi que – depuis peu – les données de véhicule circulant, ou *floating car data*, et les données du réseau mobile (*floating phone data, FPD*), c'est-à-dire des données générées par les véhicules intégrés au flux de la circulation. En coordination avec le mandant, il a été décidé de fonder les calculs sur les données de véhicule circulant ou de réseau mobile, d'où l'acquisition d'un jeu de données du prestataire INRIX. Ce jeu de données indique la vitesse moyenne pour toutes les sections du réseau suisse TMC (Traffic Message Channel), minute par minute, sur les 365 jours de l'année 2013. Il a fallu répercuter également la demande de transports. Les chiffres nécessaires (tels que le TJM par tronçon, avec précision du type de véhicule – véhicules de tourisme, camionnettes, poids lourds) ont été fournis par le Modèle national de trafic voyageurs (MNTP) et transposés sur le réseau TMC par une procédure spéciale qui consiste à faire converger les données. Ensuite, les chiffres journaliers de la circulation routière ont été distribués à la minute près sur les courbes typiques de variation annuelle, hebdomadaire et journalière représentant les données de fluidité de la circulation. Ainsi, il a été possible de calculer les temps perdus par minute et par section de tronçon (en comparant les durées de trajet effectifs et les durées sur un trajet non encombré). Le rapport de vitesse normalement

utilisé par l'INRIX a été repris comme « critère d'embouteillage », c'est-à-dire que seuls les déplacements effectués à moins de 65 % de la vitesse de référence (= déplacement non encombré) étaient considérés comme touchés par un embouteillage. Toutefois, une analyse plus précise des données a montré que celles-ci ne pouvaient pas être directement transposées, car certaines sections, notamment sur le réseau non autoroutier, étaient si longues que des cas d'embouteillage disparaissaient lors de l'agrégation par calcul de la moyenne. De plus, les données de vitesse sont destinées à fournir des informations relatives à la circulation (p. ex. routage), ce qui signifie qu'elles proposent le trajet le plus rapide possible. Enfin, aucun jeu de données (c'est-à-dire par minute) n'affiche de valeur dont la vitesse moyenne serait nulle, ce qui peut pourtant survenir occasionnellement en cas d'accidents ou de pannes. Les données ont donc été réinterprétées, dans un contexte où l'INRIX a pris l'initiative de segmenter le réseau routier de manière plus précise à partir de 2014 et d'affiner le traitement des données, notamment pour les faibles vitesses. Parallèlement, des comparaisons ont été faites avec les autres sources de données mentionnées (p. ex. au moyen de l'indicateur de la durée d'embouteillage). Celles-ci affichaient certaines différences marquantes sans que des écarts systématiques (surestimation ou sous-estimation) aient pu être mis en évidence pour l'un ou l'autre jeu de données. Les temps perdus ainsi déterminés ont pu être convertis en montants grâce aux coûts unitaires (francs/heure-véhicule). Cela s'est fait en recourant pour la première fois à la méthode des coûts unitaires des normes VSS actuelles, utilisée jusque-là dans un contexte d'évaluations de projet. Le « calcul de base » a été effectué pour l'année 2013, la seule pour laquelle les données INRIX sur la fluidité de la circulation étaient disponibles. La détermination du temps perdu dans les embouteillages et de son coût pour les autres années (2009 à 2014) a été effectuée avec les données en ligne des postes de comptage de l'OFROU. Le temps perdu spécifique de chaque poste de comptage a alors été déterminé et il en a été déduit une évolution de la situation en valeur relative. Le coût des embouteillages a été déterminé de manière analogue. Le graphique Z-1 montre les résultats mis à jour (temps perdu dans les embouteillages et son coût) et les valeurs correspondantes de l'étude publiée en 2012.

Graphique Z-1 : évolution des heures-véhicules dans les embouteillages et des coûts du temps perdu dans les embouteillages, avec distinction entre véhicules motorisés légers (VML = véhicules de tourisme + camionnettes) et poids lourds (PL), ainsi qu'entre autoroutes (AR) et autres routes. Les chiffres de la ligne « Avant » sont tirés de l'étude 2012 et sont indiqués en marge, à droite.



Sur l'année 2009, le coût du temps perdu dans les embouteillages pour les véhicules motorisés légers reste du même ordre de grandeur que selon les études précédentes (896 millions de

francs, contre 824 millions de francs auparavant). Cela reflète des effets compensatoires : temps d'embouteillage légèrement plus faibles d'un côté, coûts unitaires plus élevés de l'autre. La principale différence, à la baisse, concerne les poids lourds : le temps perdu dans les embouteillages est tombé d'environ 50 %, pour un coût inférieur de deux tiers environ, en raison de coûts unitaires inférieurs de quelque 30 %. Au total, le coût du temps perdu augmente depuis 2009 (0,95 milliard de francs en valeur actualisée, 0,98 milliard de francs dans les estimations précédentes) pour atteindre 1,25 milliard de francs en 2014, un montant dont la part essentielle relève des véhicules légers.

Temps perdu causé par le trafic poids lourds

Les coûts liés au temps perdu dans les embouteillages à cause du trafic poids lourds sont estimés conformément aux directives du Tribunal fédéral, ce qui implique de calculer les coûts liés au temps perdu, d'abord AVEC le trafic poids lourds et ensuite SANS le trafic poids lourds. L'écart correspond à la valeur qu'il convient d'attribuer au temps perdu dû au trafic poids lourds. La méthode appliquée à l'étude publiée en 2012 a été reprise et développée. Elle se fonde sur les données en ligne des postes de comptage de l'OFROU, parce qu'elles mettent simultanément à disposition en ligne les informations relatives au trafic et celles relatives à la demande, sans qu'il faille recourir après coup à des modèles de classification des données.

Pour chaque poste de comptage, il est établi un diagramme fondamental du trafic (représentation de la vitesse en fonction de la demande). Puis l'ensemble des diagrammes est utilisé pour déduire les fonctions CR (pour *capacity restraint*, capacité restreinte), qui signalent l'importance des pertes de temps supplémentaires en cas d'augmentation de la demande. Cette approche est applicable jusqu'au seuil de capacité, au-delà duquel, dans un schéma typique, la vitesse chute. Il a donc été déterminé pour ce point une « vitesse seuil » par poste de comptage. Il faut préciser qu'une fonction de probabilité a également pu être définie pour les vitesses inférieures au seuil afin de savoir à partir de quel niveau de demande la vitesse chute (fonction pE) jusqu'à causer un embouteillage. Cette approche permet de traiter les deux phases de vitesse du diagramme fondamental, avec la fonction CR au-delà de la vitesse seuil et avec la fonction pE en deçà. Les pertes de temps ont été calculées à partir de ces deux fonctions – une fois AVEC et une fois SANS le trafic poids lourds. La conversion des camionnettes en unités de véhicules motorisés légers est ici un facteur non négligeable. Contrairement à ce qui a été fait dans l'étude précédente, un facteur de 2,0 (au lieu de 2,5) a été appliqué au sens de l'approche « minimaliste » susmentionnée. Le tableau Z-1 montre les résultats correspondants. Ainsi, pour l'année 2014, le temps perdu dans les embouteillages peut être imputé au trafic poids lourds pour un montant d'environ 420 millions de francs. Une comparaison avec les

chiffres de l'étude de 2012 montre que les différences sont minimes pour l'année 2009 prise comme année de référence (300 au lieu de 291 millions de francs). L'écart est légèrement plus marqué pour l'année 2010, la valeur déterminée en 2012 (401 millions de francs) dépassant de quelque 25 millions de francs celle de l'étude actualisée (378 millions de francs).

Tableau Z-1 : Coût du temps perdu dans les embouteillages causé par le trafic poids lourds (chiffres actualisés)				
		Coût du temps perdu dans les embouteillages imputable au trafic poids lourds (mio CHF/a)		
		Autoroutes	Autres routes	total
Mis à jour	2009	221	79	300
"	2010	297	80	378
"	2011	310	81	391
"	2012	328	82	411
"	2013	316	83	398
"	2014	337	83	421
Avant	2009	225	66	291

Les chiffres de la ligne « Avant » sont tirés de l'étude publiée par l'ARE en 2012.

Partie B : coût des embouteillages liés à l'environnement et aux accidents en 2010

Les coûts dus aux embouteillages et liés à l'environnement et aux accidents sont déjà inclus en principe dans les coûts externes calculés par l'ARE en juillet 2014. A présent, il s'agit surtout de savoir quelle part de ces coûts est imputable aux embouteillages. Les analyses ont été réalisées pour l'année 2010 sur la base des données de l'étude mentionnée.

Coûts des embouteillages pour l'environnement, le climat et l'énergie en 2010

Les coûts liés à l'environnement et au climat sont des coûts externes du point de vue des transports, car ils ne sont pas assumés par les usagers de la route, mais par la collectivité. Les coûts énergétiques constituent un cas particulier lorsqu'ils découlent notamment d'une conduite inefficace due aux embouteillages : ils sont assumés par les usagers de la route et constituent donc des coûts internes du point de vue des transports. Ils sont néanmoins traités dans cette partie.

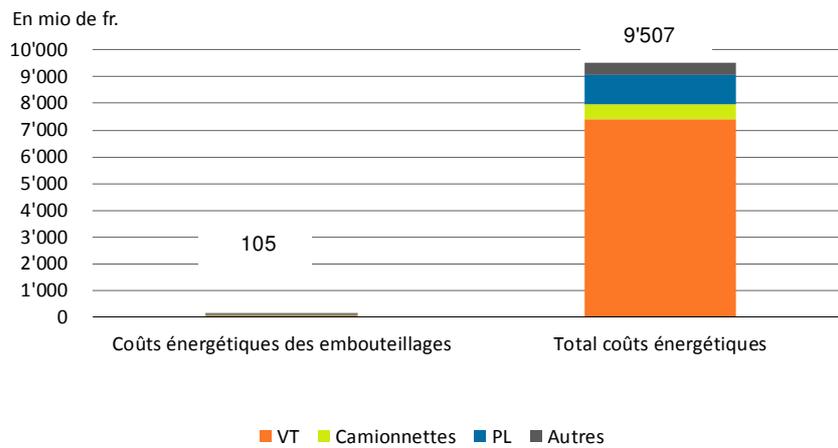
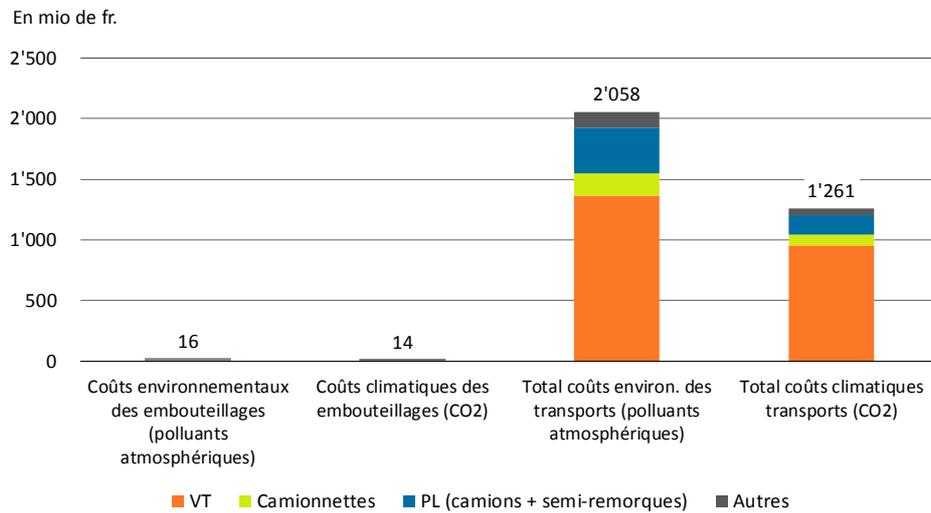
La détermination du coût des embouteillages pour l'environnement se déroule selon la chaîne de causalité suivante : émissions de polluants atmosphériques → immissions → dommages → coûts, comme pour celle des coûts externes globaux pour l'environnement. Afin de simplifier les choses, les particules en suspension (PM 10) sont retenues comme polluant principal, puis

une deuxième distinction est opérée entre particules primaires et particules secondaires. La méthode se fonde sur la détermination des émissions de PM 10 en embouteillages par comparaison avec une situation fictive de circulation fluide. L'écart, ou le rapport entre le calcul de référence et la situation en circulation fluide, correspond à la part des émissions imputable aux embouteillages. Le graphique Z-2 illustre les résultats obtenus et la comparaison avec l'ensemble des coûts environnementaux et climatiques et des coûts énergétique. Il en ressort que les embouteillages n'ont qu'une faible part dans ces coûts. En effet, dans ces deux catégories, les coûts causés par les embouteillages ne représentent que 1 % de l'ensemble des coûts qui pèsent sur l'environnement, le climat et l'énergie.

Comparaison avec l'étude précédente sur le coût des embouteillages (ARE, 2007)

Les coûts environnementaux, climatiques et énergétiques dus aux embouteillages ont été déterminés pour la dernière fois dans une étude de l'ARE (2007). Les coûts environnementaux et climatiques pour 2005 avaient été estimés à l'époque à quelque 15 à 20 millions de francs (selon que l'on intègre ou non les « faibles pertes de temps ») ; ceux liés à l'énergie se situaient dans une fourchette de 55 à 84 millions de francs. Les résultats mis à jour indiquent désormais des coûts estimés respectivement à 30 millions (environnement et climat) et 105 millions de francs (énergie) pour 2010, soit nettement plus élevés, puisqu'ils sont à mettre en regard des valeurs les plus basses de l'étude précédente. La cause de ces valeurs plus élevées pour 2010 réside notamment dans la progression globale des prestations kilométriques, mais surtout dans la proportion plus élevée d'embouteillages. En tout état de cause, ces écarts sont quasiment négligeables au vu de l'ensemble des coûts pour le climat, l'environnement et l'énergie.

Graphique Z-2 : coûts des embouteillages sur l'environnement et le climat par rapport à l'ensemble des coûts pour l'environnement et le climat en 2010



VT: véhicules de tourisme; PL: poids lourds.

Coût des accidents dus aux embouteillages en 2010

La question se pose de manière analogue pour le coût des embouteillages en termes d'accidents : quelle part les accidents spécifiquement dus aux embouteillages ont-ils dans les coûts globaux des accidents, qui ont été déterminés dans l'étude de 2007 ? La réponse est fortement liée à ce qu'on entend par « dû aux embouteillages ». Dans l'étude de l'ARE sur le coût des embouteillages en Suisse (« Staukosten des Strassenverkehrs in der Schweiz », ARE, 2007), la définition était la suivante :

- cas de véhicules emboutis sur les autoroutes et les voies rapides :
 - véhicules immobilisés = seuil inférieur,
 - en intégrant les véhicules en mouvement = seuil supérieur.
- Les cas de véhicules emboutis sur d'autres routes ont été écartés, car on peut supposer que la plupart de ces accidents avaient d'autres causes (p. ex. virage à gauche du véhicule circulant devant).

Les nouvelles bases de données de l'OFROU autorisent une nouvelle approche : depuis 2011, les conditions de circulation sont consignées pour chaque accident, de sorte que les conditions de « circulation dense » dans lesquelles certains accidents surviennent peuvent être tenues pour des embouteillages. Le coût des accidents dus à des embouteillages a pu être déterminé au moyen d'une grille quantitative élaborée à partir de la base de données de l'OFROU sur les accidents. Ce tableau (avec coûts unitaires) a été repris de l'étude mentionnée.

Le tableau suivant récapitule les coûts des accidents pour la société en 2010. Au total, les embouteillages ont causé des accidents coûtant 329 millions de francs. Ce chiffre recouvre les hypothèses suivantes :

Mio CHF/a	AR/v. rapides	Autres routes	Total	%
Cas de véhicules emboutis	132.4	99.9	232.3	71%
Autres types d'accidents	57.6	38.8	96.3	29%
Total	190.0	138.6	328.6	100%
%	58%	42%	100%	

- sur les autoroutes et les voies rapides, tous les types d'accidents survenus sur des files immobilisées ou circulant par à-coups et 50 % des accidents survenus en trafic très dense peuvent être considérés comme dus aux embouteillages ;

- sur les autres routes, 50 % des cas de véhicules emboutis sont pris en compte ; pour les autres types d'accidents, la moitié de ceux survenus sur des files immobilisées ou circulant par à-coups sont eux aussi comptés comme imputables aux embouteillages.

Il en découle que 58 % du coût des accidents dus aux embouteillages sont la conséquence d'accidents qui se produisent sur les autoroutes et les voies rapides, et 42 % sur les autres routes. Les cas de véhicules emboutis représentent 71 % des coûts, le reste relève de différentes causes d'accidents : dérapages, dépassements, changements de voie, etc. La proportion exacte de coûts dus aux embouteillages dépend en fin de compte des hypothèses susmentionnées. Si les situations de circulation dense n'étaient pas considérées comme des embouteillages pour le comptage des accidents, les coûts afférents tomberaient à 301 millions de francs. En revanche, si tous les accidents survenus lorsque la circulation est dense étaient considérés comme imputables aux embouteillages, les coûts de ce volet grimperaient à 862 millions de francs.

Comparaison avec la précédente étude sur les embouteillages (ARE 2007)

L'étude de 2007 sur cette thématique, dans laquelle des coûts d'accidents étaient aussi traités parmi les coûts des embouteillages, ne prenait en compte que les emboutissements survenus sur autoroutes et voies rapides. Pour 2005, les coûts pour la société étaient ainsi estimés à 121 millions de francs. La valeur actualisée la mieux comparable se situe à 132 millions de francs. Le tableau Z-2 montre toutefois qu'une plus grande part des accidents doit être classée comme étant « due aux embouteillages ».

Partie C : aperçu du coût global des embouteillages

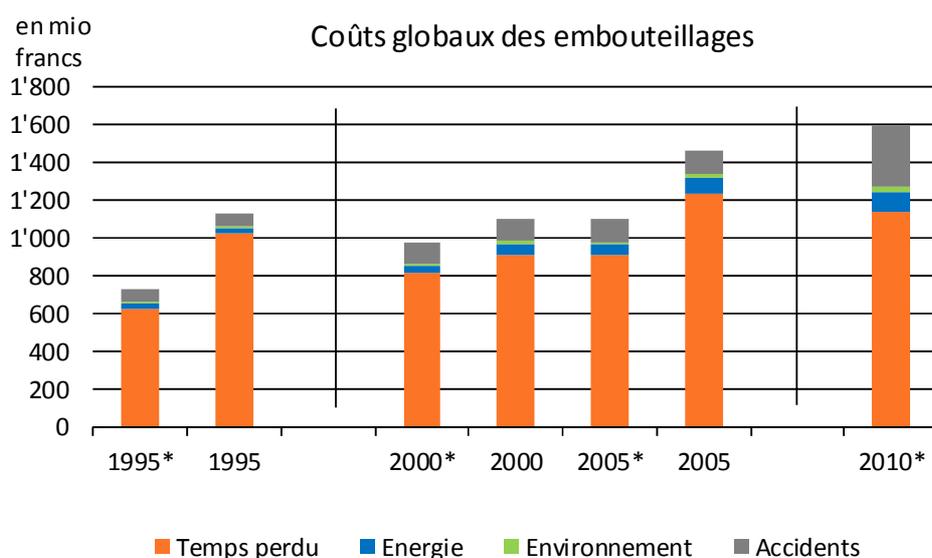
Il existe aujourd'hui toute une série d'enquêtes sur le coût des embouteillages : la première date de 1998 et prend pour référence l'année 1995 (OFROU 1998). Une mise à jour a été réalisée en 2007 pour les années 2000 et 2005. La présente étude établit des constats sur l'année de référence 2010. Le graphique Z-3 en illustre les résultats ; pour les années 1995, 2000 et 2005, deux valeurs sont données à chaque fois : la première est une « observation de la sensibilité », sans prise en compte des pertes de temps minimales sur le réseau non autoroutier (années marquées d'un astérisque) ; la seconde est un « calcul de base » qui intègre également ces pertes de temps minimales. Pour 2010, l'accent est volontairement mis sur la version « sans prise en compte des pertes de temps minimales » afin de rester dans l'approche « minimaliste » ; c'est pourquoi un seul chiffre apparaît dans le graphique.

De fait, ce graphique met en évidence une évolution constante du coût des embouteillages depuis 1995. Cependant, les bases de données et les méthodes de calcul ayant changé de manière significative dans certains cas, la lecture chronologique des résultats est soumise à des

restrictions. Les écarts entre les années relèvent bien plus de ce changement de paradigme dans les différentes études que d'une évolution réelle dans le temps, de sorte que le graphique ne rend pas nécessairement compte de l'évolution chronologique réelle. Ces écarts portent sur l'établissement des grilles quantitatives, comme celles des pertes de temps, mais aussi sur d'autres éléments, comme un changement dans les coûts unitaires (p. ex. un recul de 30 % dans les coûts unitaires pour les poids lourds dans la présente étude, par rapport à la précédente).

Il est frappant de constater que d'autres composants – en particulier le coût des accidents et, partiellement, le coût énergétique – pèsent désormais plus lourd dans la balance (la comparaison a été opérée au moyen des variantes « sans prise en compte des pertes de temps minimales », tandis que le coût des accidents est identique dans les deux variantes, puisque celui-ci est indépendant de la distinction par rapport aux pertes de temps) : dans la dernière enquête, le coût du temps perdu représentait entre 80 et 85 % du coût global des embouteillages ; avec désormais 70 % environ, il reste l'élément de coût le plus important, mais le coût des accidents et – dans une plus faible mesure – les coûts en énergie semblent aujourd'hui alourdir la facture nettement plus qu'il y a dix années. En fin de compte, cette évolution s'explique aussi par des raisons relevant de la méthode et des données chiffrées.

Graphique Z-3 : estimation du coût des accidents sur différentes années à partir des études suivantes : OFROU 1998 pour 1995, ARE 2007 pour 2000 et 2005, présente enquête pour 2010.



Les barres marquées d'un astérisque (*) ne prennent pas en compte les pertes de temps minimales.

Riassunto

Obiettivi

Dal 2005, l'Ufficio federale dello sviluppo territoriale (ARE) pubblica annualmente le cifre relative ai costi esterni del traffico stradale e ferroviario in Svizzera. Questi dati hanno un ruolo importante ad esempio nel contesto della tassa sul traffico pesante commisurata alle prestazioni (TTPCP). La questione se considerare o meno anche i costi delle code nei costi esterni è nel frattempo stata risolta dal Tribunale federale che ha inoltre fornito indicazioni sul metodo di calcolo. Lo studio sui costi esterni più recente è stato pubblicato dall'ARE in luglio 2014 ma non include i costi delle code. La presente analisi vuole colmare tale lacuna ed è composta da due parti: la parte A tratta i costi dei tempi di attesa dovuti alle code, la parte B analizza la parte dei costi associati all'ambiente e agli incidenti relativa alle code, già calcolati nello studio sui costi esterni di cui sopra.

Parte A: costi dei tempi di attesa dovuti alle code

Il calcolo dei costi dei tempi di attesa dovuti alle code è diviso fondamentalmente in due parti: il rilevamento dei costi complessivi delle code e la stima della quota di costi risultanti dalle perdite di tempo generata dai mezzi pesanti. Dal punto di vista della metodologia, i due incarichi sono differenti:

- il primo incarico consiste nel calcolare le perdite di tempo per le persone interessate dalla coda. Il risultato può essere espresso in veicolo/ore di coda da non fraintendere con il tanto diffuso "durata della coda" che indica semplicemente il numero di ore di coda senza menzionare quanti utenti della strada sono interessati dalla stessa. Mediante indici di costo (p. es. secondo le norme VSS) è possibile trasformare il valore veicolo/ore di coda in un ammontare in franchi.
- Il secondo incarico consiste nell'analisi della quota di costi dei tempi di attesa dovuti alle code generata dai mezzi pesanti. Il Tribunale federale ha fornito indicazioni per il calcolo di tali quote secondo le quali deve essere utilizzato il parametro della "tipologia di trasporto". In termini quantitativi significa che la situazione attuale reale, che comprende anche il traffico lento, deve essere comparata con una situazione fittizia di utilizzo della strada senza mezzi pesanti. Dalla comparazione dello scenario "reale" con quello "fittizio" è possibile dedurre la quota di costi risultanti dalle perdite di tempo riconducibile ai mezzi pesanti.

Entrambe le parti sono state trattate nello studio precedente (ARE 2012). L'obiettivo era quindi di verificare i risultati per gli anni di riferimento 2009 e 2010 e al contempo effettuare nuovi rilevamenti per gli anni fino al 2014. L'analisi del settore non autostradale è inoltre di particolare interesse poiché nello studio 2012 è stato trattato solo in maniera superficiale.

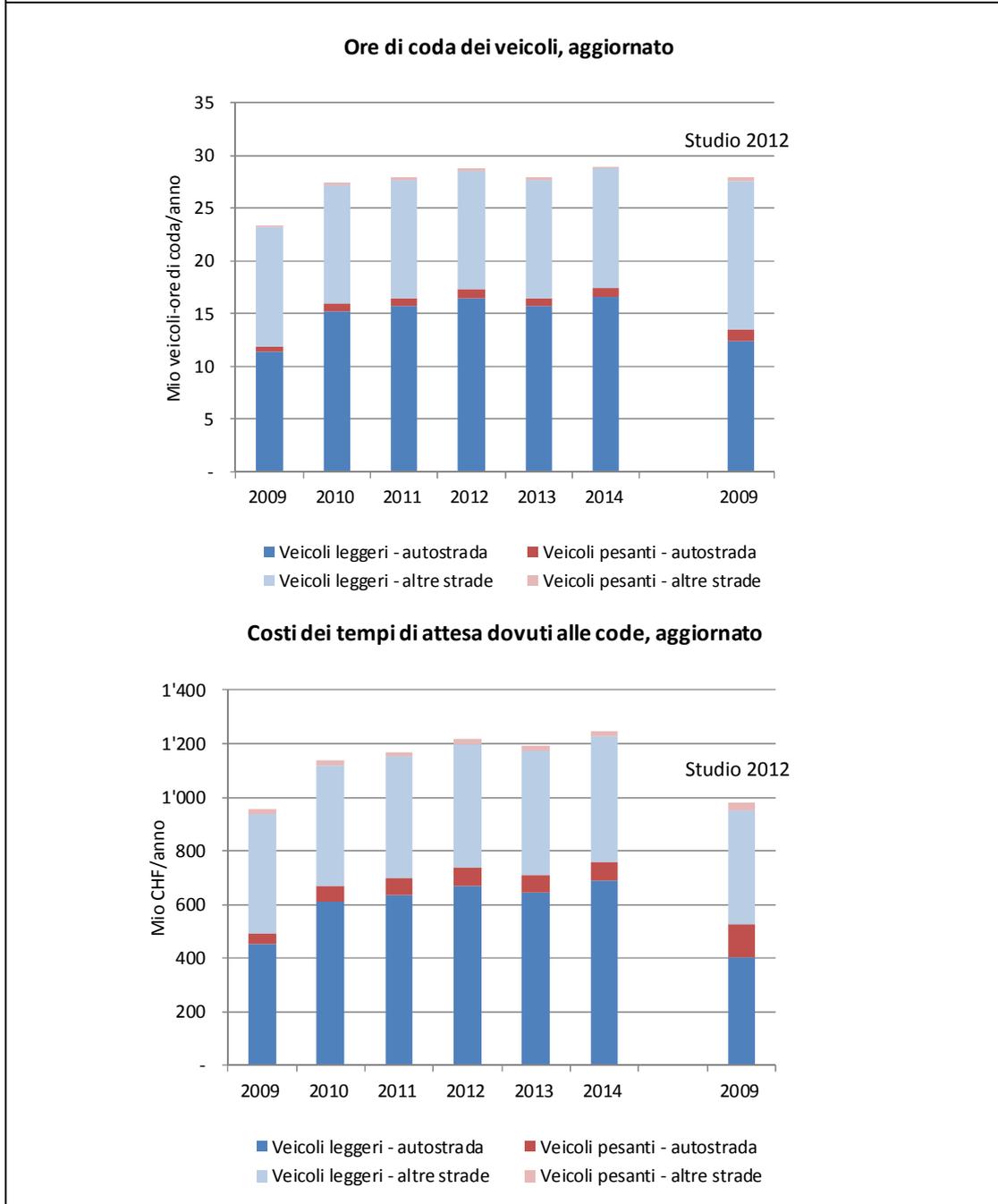
Costi complessivi dei tempi di attesa dovuti alle code

Nel presente studio sui costi dei tempi di attesa dovuti alle code, la questione principale è: vengono davvero analizzate le perdite di tempo effettivamente subite dagli utenti? I congestionamenti del traffico e le fasi di traffico fortemente rallentato portano spesso gli utenti della strada a modificare il loro comportamento calcolando, per i propri viaggi, riserve di tempo preventive per gli appuntamenti importanti (come ad esempio la partenza di un volo o una riunione importante) per essere sicuri di arrivare in tempo. Gli aspetti relativi a tale prudenza (o effetti "secondari" delle fasi di traffico) non verranno considerati nei presenti calcoli al pari di altri costi secondari come gli effetti dei ritardi nella consegna di prodotti nei processi di produzione, ecc. Per il primo aspetto non sono disponibili basi di dati quantitativi; per il secondo, l'interesse per i costi dei tempi di attesa dovuti alle code è innanzitutto relativo al contesto dell'internalizzazione dei costi esterni causati dai mezzi pesanti. Viene quindi utilizzato il cosiddetto approccio "at least": in caso di incertezza dei dati, sono state formulate ipotesi improntate piuttosto a una sottovalutazione che a una sopravvalutazione dei costi effettivi. La rinuncia a includere nei calcoli gli elementi poco sicuri e ulteriori costi correlati ha come conseguenza che i costi effettivi risultanti dalle perdite di tempo imputabili alle code sono più elevati di quanto sarebbero stati se il presente studio avesse tenuto in considerazione tutte le perdite di tempo effettivamente subite.

Il calcolo dei costi dei tempi di attesa dovuti alle code si basa su dati relativi al flusso del traffico, per identificare le code, e su dati relativi alla domanda di trasporti, per rilevare il numero di utenti interessati. Principalmente, esistono attualmente tre set di dati relativi al flusso del traffico: la statistica delle code rilevata da viasuisse, il censimento automatico del traffico che include i rilevamenti della velocità dell'USTRA e, introdotti di recente, il Floating Car Data (FCD) e il Floating Phone Data (FPD) ossia dati generati dai veicoli in circolazione. In accordo con il mandante, è stato stabilito di effettuare i calcoli sulla base dei dati FCD/FPD. A tale scopo è stato impiegato un set di dati del provider INRIX che ogni minuto, per tutti i 365 giorni dell'anno 2013, ha misurato la velocità media per tutte le tratte della rete stradale TMC (Traffic Message Channel) in Svizzera. Ai risultati è stato tuttavia necessario aggiungere i dati relativi alla domanda di trasporti. Le cifre relative alla domanda (sotto forma di TGM per tratto, differenziato per automobili, furgoni e camion) sono state ricavate dal modello del traffico viaggiatori a livello nazionale (MTVN) e applicate alla rete TMC mediante una procedura particolare ("Conflation"). Infine, le cifre relative al traffico giornaliero, sulla base di modelli di diagrammi di carico annuale, mensile e giornaliero, sono state correlate minuto per minuto ai dati relativi al flusso del traffico. In questo modo è stato possibile calcolare le perdite di tempo in minuti e per tratto (comparando il tempo effettivamente impiegato con il tempo necessario in caso di viaggio senza impedimenti). Come "criterio di coda" è stato utilizzato il parametro di

velocità normalmente impiegato da INRIX: solo i tragitti percorsi a una velocità inferiore al 65 per cento della velocità di riferimento (=viaggio senza impedimenti) sono considerati rilevanti dal punto di vista delle code. Un'analisi più precisa dei dati ha mostrato che questi ultimi non possono tuttavia essere ripresi direttamente. Ad esempio i tratti non autostradali presi in considerazione erano talvolta così estesi che i dati relativi alle code presenti, nel calcolo della media, venivano "cancellati" dalla quantità totale di dati. Inoltre, le informazioni relative alla velocità sono allestite per essere utilizzate in relazione alle informazioni sul traffico (p. es. routing) e indicano quindi la velocità massima. Non esistono nemmeno set di dati (ossia minuti) in cui la velocità media sia zero, come succede talvolta ad esempio in caso di incidenti o panne. I dati sono stati reinterpretati anche alla luce della migliore classificazione della rete stradale effettuata nel 2014 da INRIX e di una rielaborazione dei dati che tiene in considerazione le velocità ridotte. Al contempo sono stati effettuati confronti con le altre fonti di dati di cui sopra (p. es. mediante gli indicatori relativi alla durata della coda). Tali confronti mostrano divergenze notevoli ma permettono di verificare l'assenza, in tutti i set di dati, di sovrastime o sottostime sistematiche. I dati relativi alle perdite di tempo così ottenuti hanno potuto infine essere monetizzati mediante indici di costo (CHF/veicolo-ore). Sono stati utilizzati gli indici delle attuali norme VSS per le valutazioni di progetti. Il "calcolo di base" è stato effettuato per l'anno 2013 poiché il relativo set di dati INRIX sul flusso del traffico era disponibile solo per tale anno. Per il calcolo delle perdite di tempo e dei costi dei tempi di attesa dovuti alle code per gli altri anni (2009 - 2014) sono stati quindi utilizzati i dati online della rete di contatori dell'USTRA. Sono state calcolate le perdite di tempo relative a ogni contatore per derivarne il corrispondente sviluppo della situazione delle code. Anche per l'evoluzione dei costi delle code si è proceduto in modo analogo. La figura Z-1 mostra i risultati aggiornati (perdite di tempo e costi dei tempi di attesa dovuti alle code) e i valori corrispondenti rilevati nel precedente studio 2012.

Figura Z-1: sviluppo delle ore di coda dei veicoli e dei costi dei tempi di attesa dovuti alle code, suddiviso in veicoli a motore leggeri (automobili e furgoni) e pesanti, e in autostrada e altre strade. I valori calcolati nello studio 2012 sono rappresentati sulla destra.



I costi dei tempi di attesa dovuti alle code per i veicoli leggeri per l'anno 2009 corrispondono in ordine di grandezza a quelli rilevati nello studio precedente (aggiornato: 896 mio. CHF, studio precedente: 824 mio. CHF). In questi dati si riflette un effetto di compensazione: da un lato

tempi di coda leggermente inferiori e, dall'altro, indici di costo più elevati. La variazione, e in questo caso riduzione, più significativa è stata riscontrata per i mezzi pesanti: le perdite di tempo si sono ridotte di circa la metà e i costi di circa due terzi grazie agli indici di costo inferiori di circa il 30 per cento. Complessivamente, i costi dei tempi di attesa dovuti alle code sono aumentati dal 2009 (previsione per i dati aggiornati: circa 0,95 miliardi di franchi; studio precedente 0,98 miliardi) al 2014 di circa 1,25 miliardi di franchi. La maggior parte dei costi è riconducibile ai veicoli leggeri.

Costi risultanti dalle perdite di tempo causati dai mezzi pesanti

Il calcolo dei costi risultanti dalle perdite di tempo causati dai mezzi pesanti è stato effettuato secondo le indicazioni fornite dal Tribunale federale. I costi sono quindi stati calcolati prima per uno scenario CON traffico pesante e in seguito per uno scenario SENZA traffico pesante. La differenza tra i due scenari corrisponde ai costi risultanti dai tempi di attesa dovuti ai mezzi pesanti. Per tali calcoli è stata ripresa e ulteriormente sviluppata la metodica utilizzata nello studio 2012. Nel presente studio, come basi di dati sono stati utilizzati i dati online della rete di contatori dell'USTRA poiché le indicazioni relative al flusso del traffico e alla domanda di trasporti sono disponibili contemporaneamente (e senza classificazione supplementare in base al modello). Per ogni contatore sono stati elaborati diagrammi fondamentali (rappresentazione della velocità in funzione della domanda). Mediante tali diagrammi è stato possibile dedurre le funzioni capacity restraint le quali mostrano come aumentano le perdite di tempo in caso di domanda crescente. Un simile approccio è adeguato fino al raggiungimento del limite della capacità. Generalmente, al raggiungimento di tale limite, la velocità diminuisce in maniera significativa. Per questo punto è stata calcolata una "velocità limite" per ogni contatore. Al contempo, per le fasce di velocità inferiori è stato possibile elaborare una relativa funzione di probabilità che mostra il punto in cui la domanda fa crollare la velocità e causa la formazione di code (funzione pE). Grazie a tale approccio è possibile analizzare entrambe le fasce di velocità nel diagramma di riferimento: la metà superiore alla velocità limite utilizzando la funzione capacity restraint e quella inferiore utilizzando la funzione pE. Le due funzioni hanno permesso di calcolare le perdite di tempo CON e SENZA mezzi pesanti. Un fattore da non sottovalutare è la conversione dei veicoli pesanti in automobili. Contrariamente allo studio precedente è stato utilizzato un nuovo fattore 2.0 (invece di 2.5) secondo l'approccio "at least" menzionato in precedenza. La tabella Z-1 mostra i risultati corrispondenti. Per l'anno 2014, i mezzi pesanti sono all'origine di costi dovuti ai tempi di attesa di circa 420 milioni di franchi. Se confrontato con i valori calcolati dello studio 2012, il valore aggiornato calcolato per l'anno 2009 è simile (300 contro 291 mio. CHF). Per l'anno 2010 il valore calcolato nello studio 2012 ammonta a 401 milioni di franchi e supera di circa 25 milioni il nuovo valore per il 2010 di 378 milioni.

		Costi dei tempi di attesa dovuti alle code riconducibili ai mezzi pesanti (mio. CHF/anno)		
		Autostrada	Altre strade	Totale
Aggiornato	2009	221	79	300
"	2010	297	80	378
"	2011	310	81	391
"	2012	328	82	411
"	2013	316	83	398
"	2014	337	83	421
Studi precedenti	2009	225	66	291

I valori menzionati come "studi precedenti" derivano dallo studio ARE (2012).

Parte B: costi associati all'ambiente e agli incidenti relativi alle code 2010

Fondamentalmente, i costi associati all'ambiente e agli incidenti relativi alle code sono già stati rilevati tra i costi esterni nello studio pubblicato dall'ARE in luglio 2014. Nel presente studio, l'interesse primario è rilevare in quale misura tali costi possono essere riconducibili alle code. Le presenti analisi sono state effettuate per l'anno 2010 secondo le indicazioni dello studio di cui sopra.

Costi associati all'ambiente, al clima e all'energia relativi alle code 2010

Dal punto di vista dei vettori di trasporto, i costi associati all'ambiente e al clima rappresentano costi esterni poiché non sono sopportati solo dagli utenti della strada ma da tutta la comunità. I costi dell'energia rappresentano un caso particolare. Se ad esempio in caso di code viene adottato un tipo di guida inefficiente, i costi vengono sopportati dagli utenti e sono quindi, dal punto di vista dei vettori di trasporto, dei costi interni. Nel presente studio saranno tuttavia presi in considerazione.

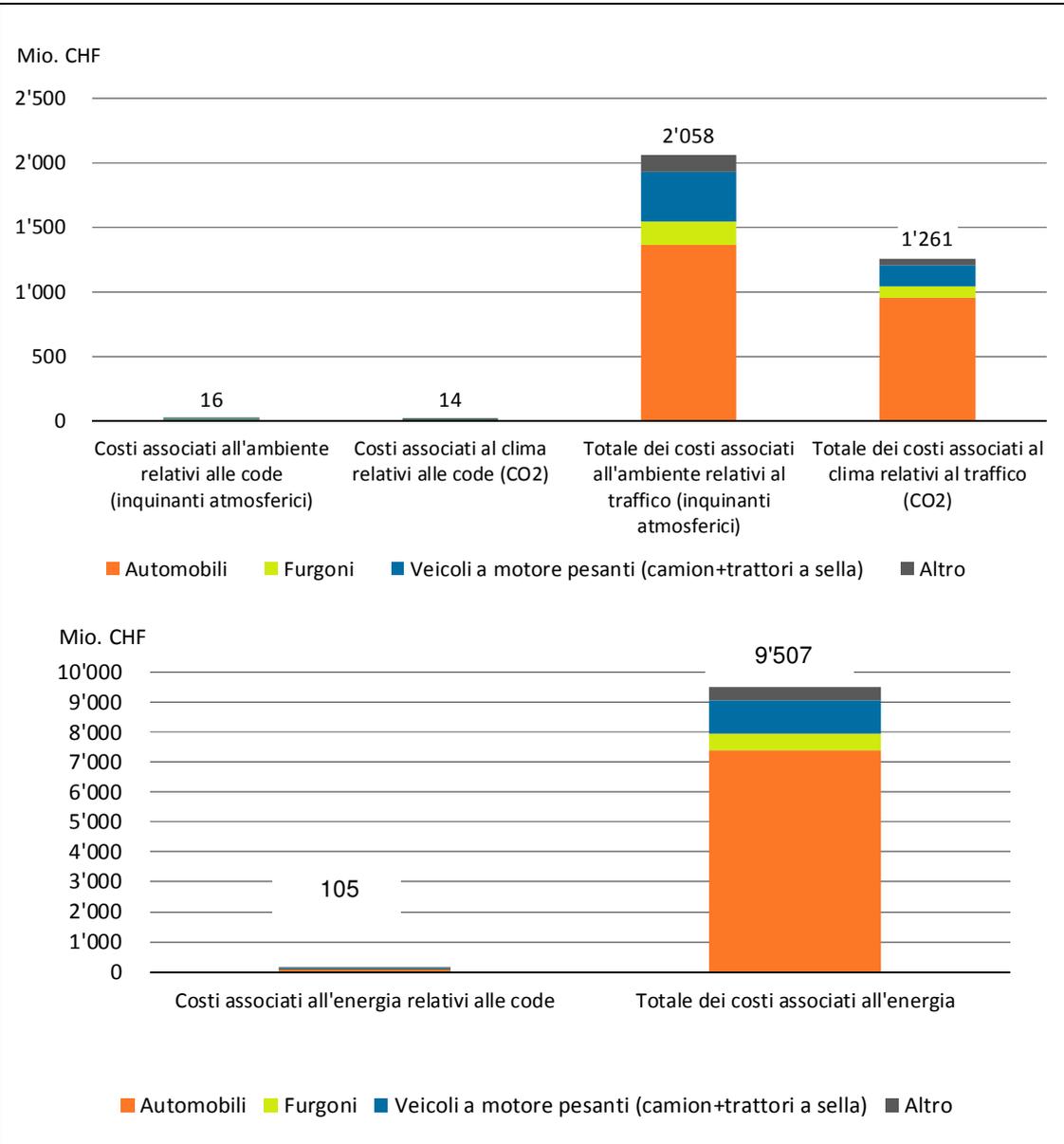
Il rilevamento dei costi associati all'ambiente relativi alle code segue la catena degli effetti "emissione di inquinanti atmosferici → immissioni → danni → costi", analogamente al rilevamento dei costi esterni complessivi associati all'ambiente. Per semplificare, le PM10 sono state considerate come inquinanti atmosferici all'interno dei quali vengono ulteriormente classificate in PM10 primarie e secondarie. Il punto centrale della metodica utilizzata è il rilevamento delle emissioni di PM10 relative alle code rispetto a una situazione fittizia senza code. La differenza tra il rilevamento di riferimento e la situazione senza code corrisponde alla

parte di emissioni imputabile alle code. La figura Z-2 mostra i relativi risultati rispetto ai costi complessivi associati all'ambiente, al clima e all'energia: l'importanza dei costi delle code associati alle tre componenti è comparativamente ridotta. In entrambi i settori, i costi relativi alle code ammontano solamente a circa l'1 per cento dei costi complessivi associati all'ambiente, al clima e all'energia.

Confronto con lo studio precedente sui costi delle code (ARE 2007)

I costi associati all'ambiente, al clima e all'energia sono stati calcolati l'ultima volta in uno studio dell'ARE (2007). I costi associati all'ambiente e al clima erano stimati circa tra i 15 e i 20 milioni di franchi per il 2005 (a seconda che siano considerate anche le "piccole perdite di tempo"), i costi associati all'energia tra i 55 e gli 84 milioni. I risultati aggiornati valutano i costi per il 2010 a circa 30 milioni di franchi (ambiente e clima) e 105 milioni (energia), quindi nettamente più elevati se comparati ai valori minimi calcolati nello studio precedente. Tali valori più elevati per il 2010 possono essere ricondotti in generale all'aumento delle prestazioni chilometriche ma in particolare sono dovuti all'aumento della quota di code. Tuttavia le differenze, se rapportate ai costi complessivi associati all'ambiente, al clima e all'energia, risultano trascurabili.

Figura Z-2: costi associati all'ambiente e al clima relativi alle code rispetto ai costi complessivi 2010



Costi associati agli incidenti relativi alle code 2010

La stessa questione si pone per quanto riguarda i costi associati agli incidenti: quanto incidono i costi associati agli incidenti relativi alle code sui costi totali associati agli incidenti calcolati nello studio ARE 2007? L'incidenza di tali costi dipende fortemente da quali incidenti debbano essere considerati "relativi alle code". Nello studio precedente sui costi delle code del traffico stradale in Svizzera (ARE 2007), gli incidenti relativi alle code sono definiti come segue:

- tamponamenti su autostrade e semiautostrade
 - tra veicoli fermi = limite inferiore
 - inclusi i veicoli in movimento = limite superiore
- i tamponamenti su altre strade non sono stati considerati poiché, per la maggior parte, hanno presumibilmente altre cause (p. es. svolta a sinistra del veicolo di testa).

Le nuove basi di dati dell'USTRA permettono di utilizzare una nuova procedura. In particolare, dal 2011 per ogni incidente vengono rilevate le cosiddette condizioni del traffico in modo che anche gli incidenti nelle fasi di traffico "intenso" possano essere considerati come relativi alle code. Per il calcolo dei costi associati agli incidenti relativi alle code è stata elaborata una corrispondente struttura quantitativa sulla base della banca dati sugli incidenti dell'USTRA. La struttura qualitativa (indici di costo) è stata ripresa dallo studio di cui sopra.

La tabella seguente mostra i risultati relativi ai costi sociali per il 2010. Complessivamente, i costi associati agli incidenti relativi alle code ammontano a 329 milioni di franchi. Le cifre risultanti poggiano sulle seguenti premesse:

Mio CHF/anno	Autostrade/ semiautostrade	Altre strade	Totale	%
Tamponamenti	132.4	99.9	232.3	71%
Altri incidenti	57.6	38.8	96.3	29%
Totale	190.0	138.6	328.6	100%
%	58%	42%	100%	

- su autostrade e semiautostrade, sono considerati come relativi alle code tutti i tipi di incidente che avvengono nel corso di colonne ferme o molto lente come pure il 50 per cento degli incidenti in caso di traffico intenso.
- Sulle altre strade vengono tenuti in considerazione il 50 per cento dei tamponamenti. Per quanto riguarda gli altri tipi di incidente, sono inoltre considerati come relativi alle code il 50 per cento degli incidenti che avvengono nel corso di colonne ferme o molto lente.

Il 58 per cento dei costi associati agli incidenti relativi alle code sono quindi riconducibili a incidenti su autostrade e semiautostrade mentre il 42 per cento a incidenti sulle altre strade. Per il 71 per cento si tratta di tamponamenti mentre la restante percentuale riguarda altri tipi di incidente come incidenti di sbandamento, di sorpasso o al cambiamento di corsia. In conclusione, l'importanza dei costi relativi alle code dipende ampiamente dalle premesse di cui sopra. Se gli incidenti che avvengono in caso di traffico intenso non fossero considerati come relativi alle code, i costi associati agli incidenti scenderebbero a 301 milioni di franchi. Se, al contrario, tutti gli incidenti che avvengono in caso di traffico intenso fossero considerati come relativi alle code, i costi salirebbero a 862 milioni.

Confronto con lo studio precedente sui costi delle code (ARE 2007)

Nel precedente studio sui costi delle code, in cui tra i costi relativi alle code sono considerati anche i costi associati agli incidenti, sono stati inclusi solo i tamponamenti su autostrade e semiautostrade. I costi nel 2005 ammontavano quindi a 121 milioni di franchi. Il più recente valore aggiornato comparabile ammonta a 132 milioni di franchi. La tabella Z-2 mostra tuttavia che un numero maggiore di incidenti può essere assegnato alla categoria "relativi alle code".

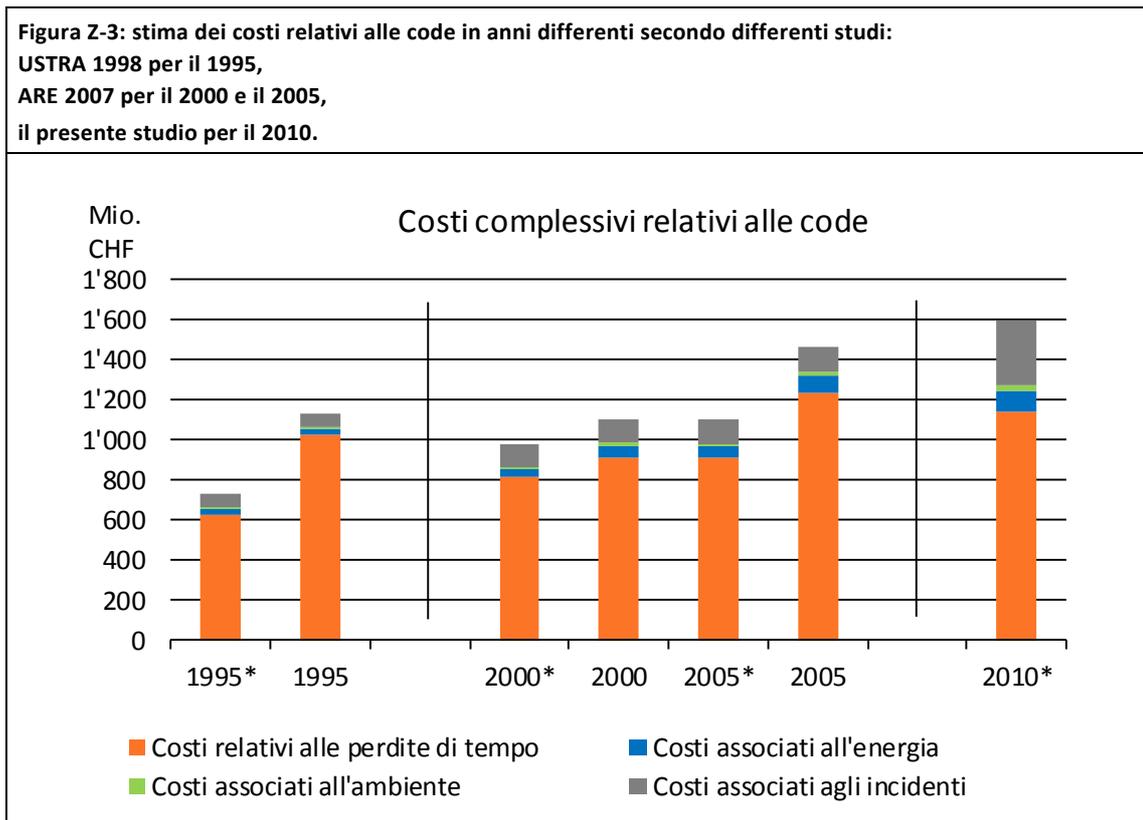
Parte C: panoramica dei costi complessivi relativi alle code

Nel frattempo sono stati presentati numerosi altri studi relativi ai costi delle code: il primo è datato 1998 ed era incentrato sull'anno di riferimento 1995 (ASTRA 1998) e nel 2007 è stato realizzato un aggiornamento in riferimento agli anni 2000 e 2005. Il presente studio analizza l'anno 2010. La figura Z-3 mostra i risultati ottenuti. Per gli anni 1995, 2000 e 2005 sono rappresentati due valori: il primo è un "esame della sensitività" che non considera l'influsso delle piccole perdite di tempo sulle tratte non autostradali (contrassegnate con un asterisco accanto all'anno nella figura), mentre il secondo è un "calcolo di base" che tiene in considerazione le piccole perdite di tempo. Per l'anno 2010 è stato deciso di porre l'accento sulla versione "senza influsso delle piccole perdite di tempo", tenendo conto dell'approccio "at least" (nella figura si trova quindi una sola colonna).

In generale, la figura mostra un aumento continuo dei costi delle code per il periodo a partire dal 1995. Tuttavia, poiché le basi di dati e i metodi di calcolo differiscono talvolta in maniera significativa, i risultati possono essere considerati come una serie temporale solo con una certa prudenza. Poiché le differenze tra un anno e l'altro sono influenzate in modo rilevante dal cambio di metodologia e dalla base di dati, la figura non rappresenta necessariamente l'effettivo sviluppo temporale. Le differenze non riguardano il rilevamento dei dati di base e le perdite di tempo, ma anche altri elementi: ad esempio sono cambiati gli indici di costo (nel

presente studio gli indici di costo per i veicoli a motore pesanti si sono ridotti del 30% rispetto all'indagine precedente).

Va inoltre sottolineato il fatto che nuove componenti, in particolare i costi associati agli incidenti e in parte anche quelli legati all'energia, risultano più significative (nonostante i costi associati agli incidenti siano uguali in entrambe le versioni, il confronto è stato effettuato tra le versioni "senza l'influsso delle piccole perdite di tempo" poiché queste non dipendono dalla differenziazione delle perdite di tempo): nello studio precedente, i costi dei tempi di attesa rappresentavano circa l'80-85 per cento dei costi complessivi. Ora, la quota è circa del 70 per cento ma, nonostante sia ancora la componente principale, i costi associati agli incidenti e, in misura minore, all'energia incidono in misura molto più significativa al giorno d'oggi rispetto a meno di dieci anni fa. Tali differenze sono da imputare in gran parte alle basi metodologiche e ai dati.



Le colonne con un asterisco non considerano l'influsso delle piccole perdite di tempo.

Summarised Version

Objectives

The Federal Office for Spatial Development (ARE) has published annual figures on the external costs of road and rail transport in Switzerland since 2005. These play an important role in the context of the performance-related Heavy Vehicle Fee (HVF), for example. The question as to whether or not traffic congestion costs should be regarded as an element of these external costs has now been decided by the Federal Supreme Court, which also set out criteria for how they are to be calculated. The ARE published its most recent study on external costs in July 2014, although this did not cover congestion costs. The present study closes this gap. It comprises two parts: Part A examines the costs associated with traffic delays, while Part B looks in to what proportion of the environmental and accident costs quantified in the 2014 study can be attributed to congestion.

Part A: Traffic delay costs

There are two key tasks involved in calculating traffic delay costs: working out traffic overall, and estimating the proportion of traffic delay costs caused by heavy vehicles. These two tasks require two different methodologies:

- The first task involves calculating the time lost by those affected by congestion. The result can be expressed as vehicle hours of delay. This should not be confused with 'duration of congestion', which refers simply to the number of hours of congestion, without providing any information on the number of affected road-users. By applying tariffs, such as those stated in VSS standards, vehicle hours of delay can be converted into amounts in Swiss francs.
- The second task is to determine the proportion of traffic delay costs caused by heavy vehicles. The Federal Supreme Court has laid down requirements for how this is to be done. These state that the "transport type" perspective must be applied. Quantification involves comparing the real-life situation today, including heavy vehicles, with a fictitious scenario of road use that excludes them. This comparison between "real" and "fictitious" enables the proportion of traffic delay costs attributable to heavy vehicles to be derived.

Both tasks have been the subject of a previous study (ARE 2012). The aim was therefore to consolidate the results for the 2009 and 2010 reference years, while producing a new set of figures for the years up to 2014. Particular attention was to be paid to non-motorway traffic, which was covered on only a rudimentary basis in the 2012 study.

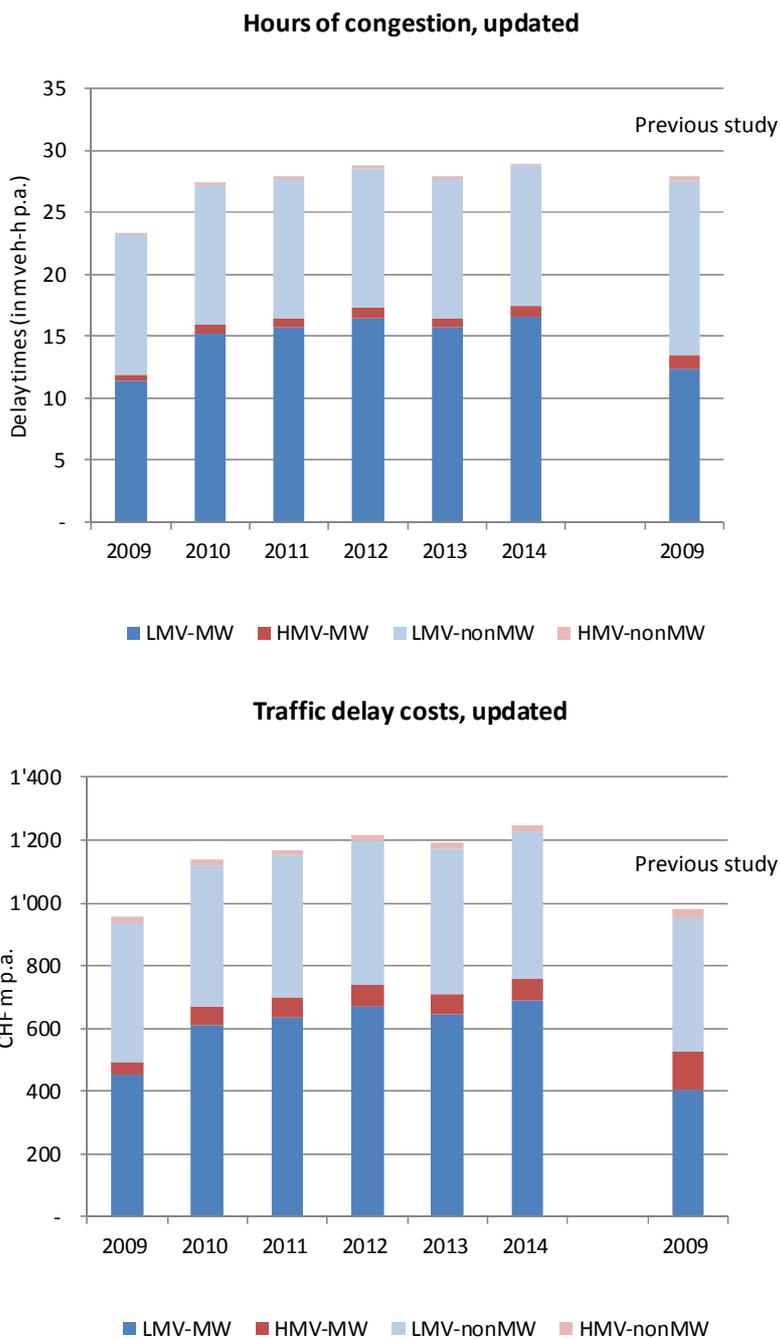
Aggregate traffic delay costs

Where this analysis mentions traffic delay costs, it is referring to the time that is actually lost. However, traffic jams, as well as regular phases of traffic tailbacks, often lead to a change in road users' behaviour, by allowing extra time for their journeys so that they can still be sure of keeping certain critical appointments, such as a flight, or an important meeting. Such reliability aspects – the secondary effects of phases of congestion – are not charged on here. The same is true of other consequential costs, such as the effects of the delayed delivery of inputs to production processes, etc. The problem here is that, on the one hand, there is scarcely any suitable quantitative data, and on the other, traffic delay costs are of interest primarily in the context of internalising those external costs caused by heavy vehicles. Here, the 'at least'- approach must be taken. This means that deliberately cautious estimates should be made where uncertainty exists. These tend to understate rather than overstate the actual costs. The decision not to include the aforementioned elements of reliability and other consequential costs means that actual congestion costs are higher than captured in this study in terms of actual time lost in congestion.

The calculation of traffic delay costs relies on two groups of data: on traffic flows, to identify where congestion occurs, and on traffic demand, to work out the number of people affected. There are currently three main sets of data on traffic flows: the congestion statistics from Viasuisse, the automatic traffic censuses, including speed measurements that are conducted by FEDRO, and – a recent addition – floating car data (FCD) and floating phone data (FPD), i.e. data that is generated from vehicles as they are actually being driven on the roads. In consultation with our principal, the decision was taken to base the calculations in this study on FCD/FPD. A data set was acquired from INRIX that included a mean speed for every minute of the 365 days of 2013 on every route covered by the Swiss TMC (Traffic Message Channel) network. This information then had to be combined with figures on transport demand, however. The figures for demand (expressed as average daily traffic (ADT) per route, and divided into cars, light goods vehicles and heavy goods vehicles) are drawn from the National Passenger Transport Model (NPTM) and overlaid on to the TMC network using a special process known as conflation. The daily traffic figures were then aligned with up-to-the-minute accuracy with the data on traffic flows, using typical patterns for annual, weekly and daily volumes. This allows the time lost per minute and section of route to be calculated by comparing the time actually required to travel that section with the time taken where there is no delay. The "jam point" at which congestion is said to exist was determined by the speed ratio commonly used by INRIX, i.e. only journeys at a speed of less than 65% of the reference speed (the free-flow speed) were regarded as relevant to congestion. Closer analysis of the data nonetheless revealed that it could not be adopted as it stood, because the non-motorway routes in particular were so long

that the mean figures for the distance concerned all but eliminated any evidence of congestion. Furthermore, data on speed was based on applications, which provide traffic information (e.g. routings for satnavs). In other words, it refers to the fastest possible route. In addition, this data does not include any data sets (i.e. minutes), which have a mean speed of zero, which certainly happens from time to time in the event of accidents or breakdowns. The data has therefore been reinterpreted accordingly, remembering that INRIX itself began breaking the road network down into greater detail in 2014, and has also revised the way it presents data on low-speed traffic in particular. This INRIX data was also compared with the sources referred to above, taking the duration of congestion indicator, for example. This revealed significant deviation in some areas, although it did not identify any systematic discrepancies in any specific data set in terms of over or underestimation. The lost time calculated in this way was then put into monetary terms using a tariff system, i.e. CHF per vehicle-hour. This study adopted the tariffs from the latest VSS standards in the context of project evaluations. The base scenario was drawn up for 2013, as this was the only year for which the relevant INRIX traffic flow data was available. The online data from FEDRO's counting stations was therefore used to calculate time lost and traffic delay costs for the other years (2009 to 2014). For each counting station, the specific time lost was determined and a relative congestion trend derived from this. A similar process was used to calculate how traffic delay costs have developed. Figure Z-1 shows the updated results (time lost and traffic delay costs) along with the corresponding figures from the earlier study from 2012.

Figure Z-1: Changes in hours of congestion per vehicle and traffic delay costs, broken down into light motor vehicles (LMV = cars and light goods vehicles) and heavy motor vehicles (HMV), as well as by motorway (MW) and non-motorway (non-MW) traffic. Previous figures from the 2012 study are shown to the far right.



Traffic delay costs for light motor vehicles (LMV) in 2009 remain on the same scale as shown in the previous study: an updated figure of CHF 896 million, compared with CHF 824 million originally. This figure reflects certain compensatory effects, i.e. a slight reduction in hours of congestion, but higher tariffs. The greatest change (reduction) affects heavy vehicles, for which hours of congestion are almost halved, and costs are two-thirds lower owing to a 30% cut in tariffs. On aggregate, traffic delay costs rise from approximately CHF 0.95 billion (estimated; revised from the CHF 0.98 bn previously) in 2009 to around CHF 1.25 bn in 2014, with light motor vehicles accounting for the lion's share of the increase.

Traffic delay costs caused by heavy vehicles

The traffic delay costs caused by heavy vehicles were estimated in accordance with the procedure laid down by the Federal Supreme Court. This requires traffic delay costs to be determined twice: once *including* heavy vehicles, and once *excluding* them. The difference corresponds to the target figure for traffic delay costs attributable to heavy vehicles. To achieve this, the methodology used in the 2012 study was adopted and developed a stage further. The online data from FEDRO's counting stations was used as the basis for these calculations, because it simultaneously provides information on the flow of traffic and on demand, without subsequently having to allocate the data according to a set model. Fundamental diagrams – showing speed as a function of demand – were then developed for each counting station. These diagrams were then used to derive capacity restraint (CR) functions, which state the additional time lost as demand increases. This approach works up to the capacity limit of the road network. Typically, however, speed slows considerable when this limit is reached. A 'threshold speed' was therefore determined for each counting station to express this point. A probability function for the lower speed range could be derived at the same time. This states the level of demand at which speed will slow down (the pE function) and result in congestion. This approach can be used to examine both of the speed ranges in the fundamental diagram: the CR function is applied above the threshold speed, and the pE function below it. These functions were then used to determine the time lost to congestion – once *including* and once *excluding* heavy vehicles. The conversion of heavy motor vehicles into passenger vehicle units (PVU) is a not insignificant factor here. Unlike the earlier study, this analysis uses a factor of 2.0 (instead of 2.5) – in the sense of the 'at least'-approach referred to above. Table Z-1 shows the results of these calculations: approximately CHF 420 million in traffic delay costs was determined as originating from heavy vehicles in 2014. The updated figure for the base year of 2009 is marginally higher than the figure estimated in the 2012 study (CHF 300 m rather than CHF 291 m). The difference for 2010 is slightly more marked, with the previous figure of CHF 401 million around CHF 25 million higher than the new figure of CHF 378 million.

		Traffic delay costs caused by heavy vehicles (CHF m p.a.)		
		MW	non-MW	Total
Updated	2009	221	79	300
"	2010	297	80	378
"	2011	310	81	391
"	2012	328	82	411
"	2013	316	83	398
"	2014	337	83	421
Previous figures	2009	225	66	291

The figures shown under 'Previous figures' originate from the ARE study (2012).

Part B: Congestion-related environmental and accident costs for 2010

Environmental and accident costs are covered in the study on external costs published by the ARE in July 2014. This study, meanwhile, is interested primarily in what proportion of these costs can be described as congestion-related. These analyses were made for 2010, corresponding to the information provided in the 2014 report.

Congestion-related environmental, climate and energy costs for 2010

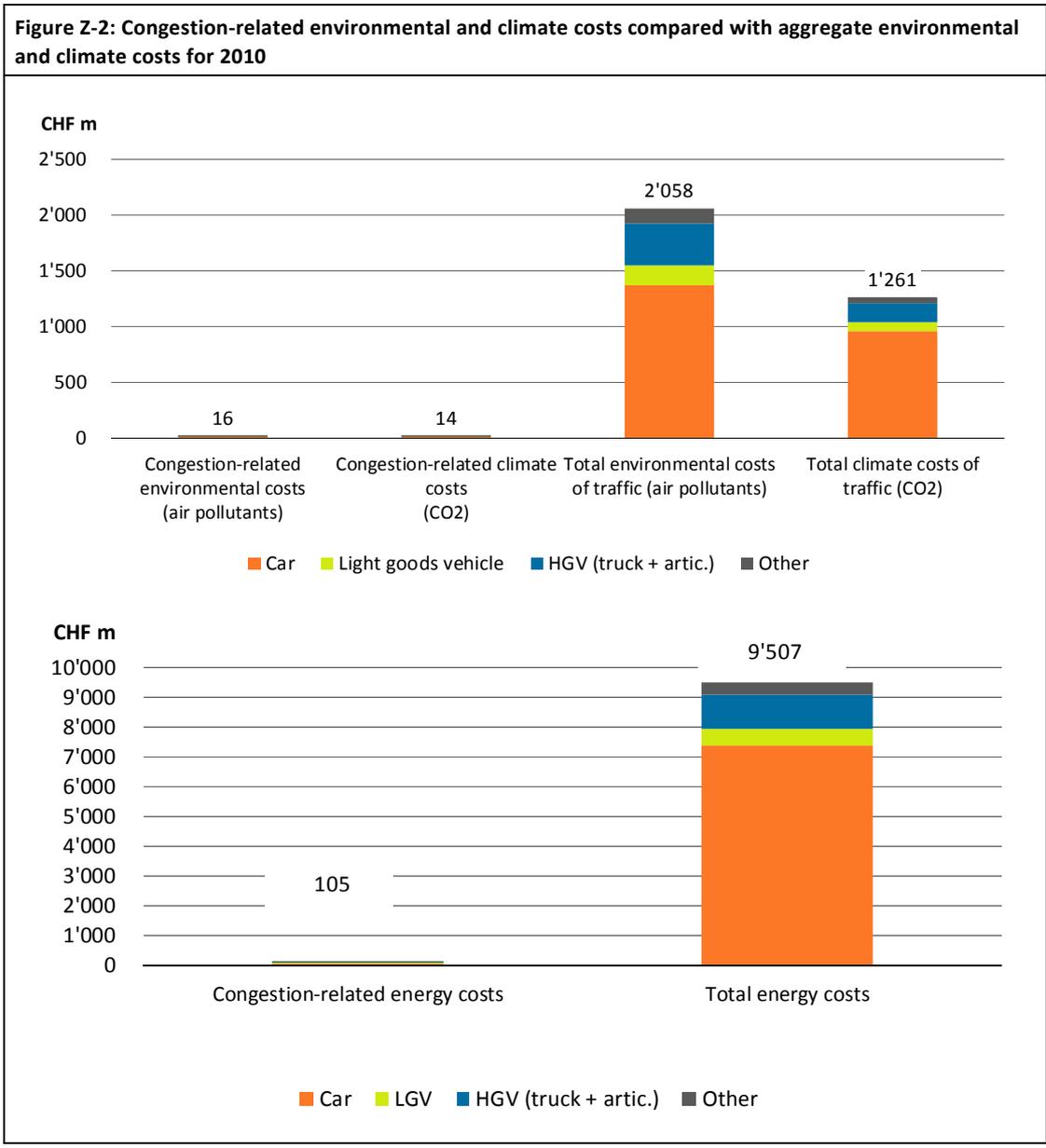
From the mode of transport perspective, environmental and climate-related costs are external in nature, as they are not paid by road-users themselves, but by the general public. Energy costs are a special case, because of the more inefficient way of driving that congestion necessitates. These costs are paid by the road-users themselves, and are thus internal costs from the mode of transport perspective. They are reported here nonetheless.

Congestion-related environmental costs are determined along the chain of effects from air pollutant emissions → immissions → damage → costs, in the same way that aggregate external environmental costs are calculated. In the interests of simplicity, PM10 is taken as the main pollutant, which is then further broken down into primary and secondary PM10. The methodology centres around determining congestion-related PM10 emissions in comparison with a fictitious free-flow situation. The difference – i.e. the relationship between the reference calculation and the congestion-free scenario – then corresponds to the proportion of emissions attributable to congestion. Figure Z-2 illustrates these results in relation to aggregate environmental, climate and energy costs. It shows that the proportion accounted for by congestion is

low, with both sub-areas accounting for only around 1 % of total environmental and climate, as well as energy costs.

Comparison with previous study on congestion costs (ARE 2007)

Congestion-related environmental, climate and energy costs were last calculated in a study by the ARE that was published in 2007. At that time, environmental and climate costs were estimated at around CHF 15 to 20 million for 2005 (depending on whether or not 'minor losses of time' were factored in), while energy costs were put at CHF 55 to 84 million. The updated results now assess these costs at around CHF 30 million (environmental and climate) and CHF 105 million (energy) for 2010, i.e. significantly higher, as they are compared with the lower figures from the previous study. These higher figures for 2010 are attributable to a higher number of kilometres travelled overall, but especially also to the slightly higher proportion of congestion. However, these differences are virtually negligible in terms of aggregate environmental, climate and energy costs.



Congestion-related accident costs for 2010

The question is a similar one for accident costs. Aggregate accident costs were determined in the ARE 2007 study, but what proportion of these is congestion-related? The answer much depends on the definition of 'congestion-related'. The earlier study on the congestion costs of road traffic in Switzerland (ARE 2007) defined congestion-related accidents as follows:

- Rear-impact collisions on motorways and major highways
 - involving stationary vehicles = lower limit
 - including moving vehicles = upper limit
- Rear-impact collisions on other roads were excluded, because they were assumed to have other causes in most cases, such as the car ahead turning left.

The new basis of data provided by FEDRO permits a new approach. Specifically, the traffic conditions have been reported for every accident since 2011. Accidents in 'heavy' traffic might therefore be regarded as congestion-related. To determine congestion-related accident costs, a volume framework was constructed on the basis of the FEDRO accident database. The value structure (tariffs) was adopted from the 2007 study.

The following table shows the social costs calculated for 2010. Congestion-related accident costs total CHF 329 million. This figure is based on the assumptions set out below.

CHF m p.a.	MW / HW	Other roads	Total	%
Rear-impact collision	132.4	99.9	232.3	71%
Other types	57.6	38.8	96.3	29%
Total	190.0	138.6	328.6	100%
%	58%	42%	100%	

- On motorways and major highways, all types of accident in stationary or queuing traffic, as well as 50% of all accidents in heavy traffic, are treated as congestion-related.
- On other roads, this designation is applied to 50% of rear-impact collisions and to 50% of other accidents in stationery and queuing traffic.

This means that 58% of congestion-related accident costs are attributable to accidents on motorways and major highways, and 42% to accidents on other roads. Rear-impact collisions account for 71% of this figure, with the remainder caused by other types of accident such as skids, and those caused by overtaking or changing lane. The proportion of congestion-related costs ultimately depends primarily on the assumptions explained above. If accidents in heavy traffic had not been classified as congestion-related, congestion-related accident costs would

fall to CHF 301 million. However, if all accidents in heavy traffic had been regarded as congestion-related, the corresponding accident costs would rise to CHF 862 million.

Comparison with previous study on congestion costs (ARE 2007)

The last study, which also estimated accident costs as part of aggregate traffic included only rear-impact collisions on motorways and major highways. The calculation put social costs for 2005 at CHF 121 million. The closest comparable updated figure is CHF 132 million. Table Z-2 nonetheless shows that a larger proportion of accidents can easily be classified as 'congestion-related'.

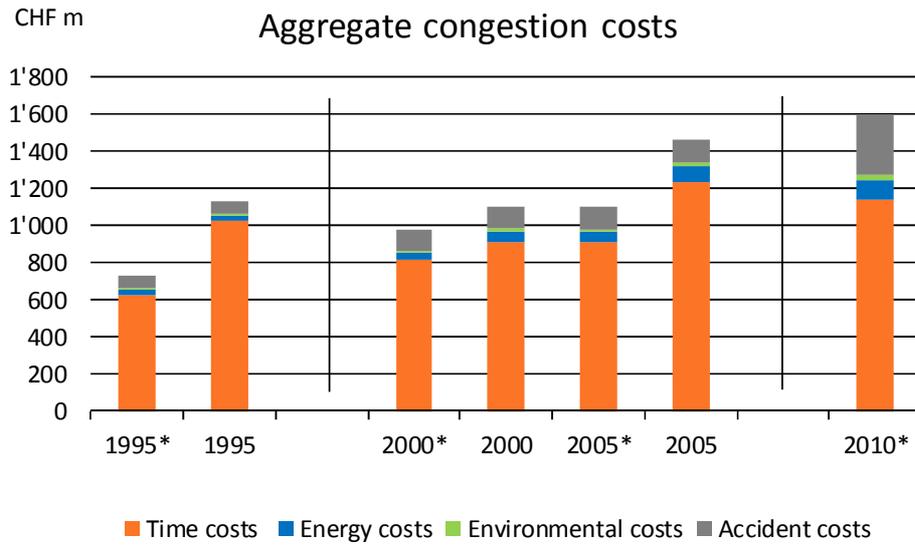
Part C: Overview of aggregate congestion costs

A series of studies into congestion costs is now available. The first dates from 1998, with a focus on the reference year of 1995 (FEDRO 1998). This was updated in 2007 with figures for 2000 and 2005. The present study provides information on 2010. Figure Z-3 shows the results of these studies, although two figures are given for each of 1995, 2000 and 2005. One is a sensitivity analysis, which does not include minor losses of time in non-motorway traffic (marked on the chart with a star after the year), and one is a base calculation which does include minor losses of time. For 2010, the emphasis has been placed deliberately on the 'excluding minor time losses' version, in order to comply with the 'at least'-approach. That is why the chart contains only one figure for this year.

In essence, the chart shows a steady rise in congestion costs over the period since 1995. However, these figures cannot fully be regarded as a time series because both, the basis of data and calculation methods, have changed – in some cases significantly. Rather, the differences between the years are explained to a significant extent by changes to methodology and the basis of data between the various studies. Therefore, the chart does not necessarily show the true trend over time. The differences concern the calculation of variables such as time lost, as well as other elements such as a change in tariffs (e.g. a reduction of 30% in the tariffs for heavy motor vehicles in this study compared with the last review).

It is striking that other components – primarily accident and to some extent also energy costs – now play a greater role. (The comparison has been made using the figures that exclude minor time losses, although accident costs are the same for both versions, as these are unrelated to the differences in time lost.) In the last study, time costs accounted for around 80% to 85% of aggregate congestion costs. At around 70%, they are still the main cost component, but accident and to a lesser extent energy costs are now more significant than they were a decade ago. Ultimately, these shifts are due to methodology and input data.

**Figure Z-3: Estimates of congestion costs over time, in accordance with various studies:
 FEDRO 1998 for 1995,
 ARE 2007 for 2000 and 2005,
 the present study for 2010.**



The bars with a star (*) do not include minor losses of time.

1. Aufgabenstellung

1.1. Ausgangslage

Das Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) publiziert seit 2005 jährlich Zahlen zu den externen Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs in der Schweiz. Diese Angaben fliessen u.a. auch in die Publikation Kosten und Finanzierung des Verkehrs (ehemals Transportrechnung) des Bundesamts für Statistik (BFS) ein. Die neueste Studie zu den externen Kosten hat das ARE im Juli 2014 publiziert (Ecoplan/Infras 2014). Darin wurde die bisher verwendete Methodik zur Ermittlung der externen Kosten einer kritischen Review unterzogen und punktuell angepasst. Anschliessend wurden die externen Kosten für das Bezugsjahr 2010 ermittelt. Die Staukosten wurden dabei explizit ausgenommen.

Die externen Kosten spielen namentlich im Kontext der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) eine wichtige Rolle. Die LSVA soll mithelfen, die vom Schwerverkehr verursachten externen Kosten zu internalisieren. Letztmals wurden die entsprechenden Berechnungen für das Bezugsjahr 2008 durchgeführt. Damals verblieb – auch unter Berücksichtigung der erfolgten Erhöhung der Abgabe – eine Unterdeckung von 38 Mio. CHF. Gegen diese Berechnung, insbesondere gegen den Einbezug der Stauzeitkosten in den Abgabetarif, erhob das Strassentransportgewerbe erfolgreich Beschwerde beim Bundesverwaltungsgericht. Mit Entscheidung vom 19. April 2010 hob das Bundesgericht diesen Entscheid jedoch wieder auf und bestätigte die Rechtmässigkeit des Einbezugs der Stauzeitkosten und damit auch die vom Bundesrat auf den 1.1.2008 vorgenommenen Erhöhung des Abgabetarifs. Das Bundesgericht machte gleichzeitig Vorgaben, wie die Stauzeitkosten zu ermitteln sind. In einem zweiten vom Strassentransportgewerbe angestossenen Verfahren, das sich grundsätzlich gegen diese Vorgaben aussprach, bestätigte das Bundesgericht am 8.8.2013 den ursprünglichen Entscheid.

Der Bund ist verpflichtet, die Berechnung der externen Kosten nach aktuellem Stand der Wissenschaft durchzuführen (vgl. Artikel 7, Abs. 3 des Schwerverkehrsabgabegesetzes [SVAG]). Das gilt auch für die Ermittlung der Staukosten. Diese wurden letztmals im Jahr 2012 für das Bezugsjahr 2009 berechnet (ARE 2012), wobei auch Kosten für das Jahr 2010 abgeschätzt wurden. Damals stand für die Bearbeitung im Rahmen des Rechtsmittelverfahrens ein sehr enger Zeitrahmen zur Verfügung, der keine umfassende Klärung relevanter Aspekte erlaubte. Mit der vorliegenden Untersuchung soll dem entsprechenden Vertiefungsbedarf Rechnung getragen werden.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die Staukosten nach dem aktuellen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis für die Jahre 2010-2014 neu zu ermitteln. Die Arbeiten umfassen verschiedene Schwerpunkte:

- Die Ergebnisse zu den Staukosten für das Bezugsjahr 2010 gemäss Studie 2012 (ARE 2012) sind zu konsolidieren. Das umfasst namentlich:
 - Eine Konsolidierung der gesamten Stauzeitkosten für das Bezugsjahr 2010; dabei ist ein besonderes Augenmerk auf den Nicht-Autobahnbereich zu legen, welcher in der Studie 2012 nur rudimentär abgedeckt werden konnte.
 - Eine Konsolidierung des Anteils der durch den Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten für das Bezugsjahr 2010, berechnet gemäss Vorgaben des Bundesgerichts.
 - Eine Abschätzung der übrigen Staukosten-Komponenten (Unfall-, Umwelt- und Energiekosten) für das Bezugsjahr 2010; dabei ist zu beachten, dass die gesamten externen Kosten dieser Komponenten in der bereits erwähnten jüngsten Aktualisierungsstudie bereits ausgewiesen sind. Es geht demnach vor allem um den Anteil der *staubedingten* externen Kosten.
- Abschätzung der gesamten Stauzeitkosten für die Jahre 2011 bis 2014 sowie auch die jeweils dem Schwerverkehr anrechenbaren Anteile, berechnet gemäss Vorgaben des Bundesgerichts.
- Kommentierung der konsolidierten Ergebnisse 2010 im Vergleich mit den Ergebnissen für die Jahre 1995, 2000 und 2005 gemäss Angaben aus den Vorläuferstudien (ASTRA 1998, ARE 2007).

1.2. Gliederung des Berichts

Der Bericht ist im Wesentlichen in drei Teile gegliedert, wobei der Teil A der Stauzeitkosten den Schwerpunkt der Untersuchung bildet und seinerseits zwei Fragestellungen umfasst, einmal die Ermittlung der Stauzeitkosten insgesamt und dann die vom Schwerverkehr verursachten Kosten. Teil B geht von der neuesten Studie zu den externen Kosten des ARE aus und fragt nach den staubedingten Anteilen der dort bereits bezifferten Umwelt- und Unfallkosten. Teil C schliesslich gibt eine Übersicht der Gesamtstaukosten Schweiz der Jahre 1995, 2000, 2005 und 2010 gemäss den bisher erstellten Untersuchungen.

Teil A: Stauzeitkosten

2. Berechnung der Stauzeitkosten

2.1. Zum Begriff ‚Stau‘

Staus entstehen, wenn die Nachfrage auf einer Verkehrsanlage ihre Kapazität erreicht oder überschreitet. Das äussert sich im Strassenverkehr durch zunehmende gegenseitige Behinderung und letztlich abnehmende Geschwindigkeit – bis hin zum völligen Verkehrszusammenbruch, sprich Stillstand der Fahrzeuge. Die häufigsten Staus resultieren durch Überlastung einer Verkehrsanlage, d.h. einer über der Kapazität liegenden Nachfrage. Allerdings kann die Kapazität auch schlagartig reduziert (z.B. infolge von Unfällen, kurzzeitig bis auf null bei Sperrung einer Achse) oder auch zeitlich begrenzt vermindert werden (z.B. durch Baustellen). Für die Benutzer einer Verkehrsanlage äussert sich dies in jedem Fall gleich, nämlich in Zeitverzögerungen und Zeitverlusten.

Eine Schwierigkeit – insbesondere für die Hochrechnung der Stauzeitkosten über ein gesamtes Verkehrssystem – ergibt sich aus dem Umstand, dass Kapazitäten keine präzisen fixen Grössen sind. Vielmehr handelt es sich um stochastische Grössen. Dies führt zu relativ offenen Formulierungen, etwa, dass die Kapazität beispielsweise einer Autobahnstrecke jener Verkehrsstärke entspricht, welche im fließenden Verkehr abgewickelt werden kann und jenseits derer ein Verkehrszusammenbruch eintritt. Dieser Punkt variiert selbst am gleichen Ort deutlich und lässt sich streng genommen nicht mit einer einzigen Zahl erfassen. Vielmehr bieten sich dafür Verteilungsfunktionen an, was aber die Berechnungen zwangsläufig verkompliziert. Im Weiteren ist nicht a priori klar, ab wann ein Zeitverlust in die Kategorie „Staukosten“ fällt. Ist die Summe von kleinen Zeitverlusten entlang einer Strecke für die Berechnung von Staukosten irrelevant? Können also kleine Zeitverluste völlig ausgeblendet werden?

Im Rahmen von Kosten-Nutzen-Analysen von Neu- oder Ausbau-Projekten werden die Nutzen einer Anlage nicht nur allein anhand der effektiv realisierbaren Zeitgewinne bzw. vermiedenen Zeitverluste in einer Situation „mit Projekt“ im Vergleich zu einer Situation „ohne Projekt“ bestimmt, sondern auch anhand der Zuverlässigkeit. Denn häufig vorkommende Verkehrszusammenbrüche oder auch schon regelmässige Phasen von stockendem Verkehr führen bei den Verkehrsteilnehmern zu Verhaltensänderungen, indem sie für ihre Fahrten vorsorglich Reservezeiten einbauen, um gewisse zeitkritische Termine (wie etwa das Erreichen einer Flugabfahrt oder wichtiger Sitzungstermine) verlässlich einhalten zu können. Man kann dies auch als „sekundäre“ Wirkungen bezeichnen. Dazu gehören auch weitere Folgekosten wie etwa Effekte verzögerter Anlieferungen von Produkten bei Produktionsprozessen etc. Bereits an dieser Stelle sei vermerkt, dass diese Komponenten der Zuverlässigkeit und weiterer Folgewirkungen

im Rahmen dieser Untersuchung nicht weiter behandelt werden. Zum einen, weil die Grundlagen, wie dies quantitativ umzusetzen wäre, noch nicht genügend ausgereift und verfügbar sind, zum andern, weil im Rahmen des speziellen Kontextes dieser Studie (Kontext LSVA und Internalisierung der vom Schwerverkehr verursachten externen Kosten) der sog. „At least“- Ansatz zu beachten ist. Dieser bedeutet, dass bei Unsicherheiten vorsichtige Annahmen getroffen werden, die eher zu einer Unter- als einer Überschätzung der tatsächlichen Kosten führen. Ein Verzicht auf das Element Zuverlässigkeit impliziert damit grundsätzlich, dass die effektiv erlittenen Stauzeitkosten tendenziell höher liegen werden als was mit den „primären“ Stauzeitkosten erfasst wird, welche Hauptthema dieses Berichtes sind.

- Staumasse

Wie Stau gemessen werden soll, ist nicht a priori klar. Offenkundig haben die Masse immer mit zeitlichen Fahrtverzögerungen zu tun. Für die Erfassung von Staus existieren verschiedene Masse, die ihrerseits abhängig sind vom Kontext, wofür sie gebraucht werden. Brilon/Estel (2008) diskutieren eine Reihe von Bewertungskriterien zur Charakterisierung von Überlastungssituationen, namentlich

- Verlustzeiten,
- Geschwindigkeiten in verschiedenen Ausprägungen,
- Wartezeiten,
- Überlastungsdauer,
- Überlastungswahrscheinlichkeit in verschiedenen Ausprägungen wie sie etwa in den USA vor allem benutzt werden, insbesondere die Häufigkeit von Überlastungen, das 95-Perzentil der Reisezeit, ein Bufferindex [Zeitzuschlag zur zeitgerechten Erreichung eines Fahrtziels], ein Reisezeitindex [Vergleich der Reisezeit zwischen frei fließendem Verkehr und stark überlastetem Verkehr],
- Ganzjahresanalysen zur Ermittlung verschiedener Indikatoren wie die Staudauer, die Anzahl Überlastungsereignisse, die mittlere und maximale Staudauer, die Zeitverluste insgesamt pro Jahr, dadurch verursachte volkswirtschaftliche Kosten pro Jahr, Anteil der Fahrten im Stau, betroffene Verkehrsleistung,
- Weitere Kriterien wie Erreichbarkeit, oder Verkehrsarbeit während Überlastungsphasen etc.

Diese Liste zeigt, dass es kaum ein einzelnes Mass gibt, das allen Bedürfnissen gleichzeitig gerecht wird. Im vorliegenden Fall geht es um Stauzeitkosten. Dies setzt die Kenntnis der „Intensität“ voraus, d.h. nicht allein die Staudauer ist von Belang, vielmehr stehen die kumulierten

Zeitverluste – ausgedrückt in Fahrzeug-Stau-Stunden – im Zentrum des Interesses¹. Diesen lassen sich dann spezifische Kostenwerte (in CHF/Personen- oder Fahrzeug-Stunde) zuweisen und können so monetarisiert werden.

▪ Definition von Stau im Sinne der Verkehrsinformation

Bei der Stauerfassung wird in der VSS-Norm SN 671 921 zwischen Verkehrssituationen mit „Stau“ oder „stockendem Verkehr“ unterschieden. „Stau“ im Sinne der Verkehrsinformation ergibt sich²

- Wenn auf Hochleistungsstrassen oder Hauptstrassen ausserorts die stark reduzierte Fahrzeuggeschwindigkeit während mindestens einer Minute unter 10 km/h liegt und es häufig zum Stillstand kommt,
- Wenn auf Hauptstrassen innerorts bei Knoten oder Engpässen die Verlustzeit insgesamt mehr als 5 Minuten beträgt.

„Stockender Verkehr“ im Sinne der Verkehrsinformation ergibt sich,

- wenn ausserorts die stark reduzierte Fahrzeug-Geschwindigkeit während mindestens einer Minute unter 30 km/h liegt und/oder es teilweise zu kurzem Stillstand kommt³.

Diese Definitionen lassen es zumindest als Herausforderung erscheinen, mit den heute verfügbaren Daten diese Masse direkt zu verwenden, setzen sie doch eine extrem feine Granularität an Informationen zum Verkehrsgeschehen räumlicher wie zeitlicher Art voraus, welche – wie noch zu zeigen sein wird – heute noch nicht gegeben ist. Der sog. Verkehrsflussbericht des ASTRA (ASTRA 2015) fokussiert deshalb allein auf das Mass „Stautunden“ (also die Staudauer). Gleichzeitig werden beide erfassten Zustände als „Stau“ bezeichnet, da die für eine genaue Unterscheidung notwendigen netzweiten dynamischen Verkehrs- und Geschwindigkeitsdaten heute noch nicht verfügbar sind. Für die hier angesprochene Fragestellung reicht die Staudauer allerdings nicht aus. Vielmehr interessieren Zeitverluste in Form von „Fahrzeug-Stautunden“. Deshalb werden verschiedene verfügbare Datensätze herangezogen und miteinander verglichen, um Grössenordnungen von Zeitverlusten abzuschätzen.

¹ Genau genommen interessieren im Personenverkehr die Personen-Stunden, welche im Stau verbraucht werden, gemessen wird jedoch in der Regel der Zeitbedarf der Fahrzeuge. Die Einheiten Personen und Fahrzeuge können über den Besetzungsgrad ineinander überführt werden. Aus Vereinfachungsgründen wird in der Folge immer auf Fahrzeugstunden Bezug genommen.

² Stau entspricht der Verkehrsqualitätsstufe F der SN 640 017 „Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Grundlagennorm“.

³ Stockender Verkehr entspricht der Verkehrsqualitätsstufe E der SN 640 017 „Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Grundlagennorm“.

2.2. Fragestellungen

Bei der Neuberechnung der Staukosten geht es im Wesentlichen um zwei Aufgaben: der Ermittlung der Staukosten insgesamt sowie um die Abschätzung des Anteils der durch den Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten. Das sind methodisch zwei grundsätzlich unterschiedliche Aufgaben:

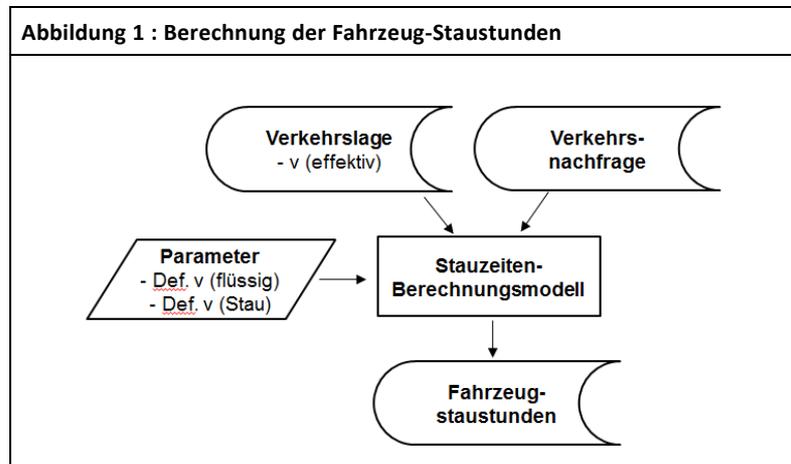
- Fragestellung 1: Stauzeitkosten insgesamt

Die erste Aufgabe lässt sich weiter in 2 Teile aufteilen. In einem ersten Schritt sind die Fahrzeugstaustunden zu ermitteln. Dies lässt sich formelmässig wie folgt ausdrücken:

$$T = n \cdot (t_{\text{Überlast}} - t_{\text{freeflow}})$$

Wobei:	T =	Fahrzeugstaustunden (je Zeiteinheit, z.B. Stunde)
	t_{freeflow} =	Zeitbedarf pro Streckenabschnitt bei freier Fahrt
	$t_{\text{Überlast}}$ =	Zeitbedarf pro Streckenabschnitt bei Überlast
	n =	Verkehrsstärke (Fahrzeuge je entsprechende Zeiteinheit)

Der Wert T (Fahrzeugstaustunden) ist je Zeiteinheit (z.B. je Tagesstunde) und Streckenabschnitt zu ermitteln. Anschliessend ist dieser Wert über alle Tagesstunden und über alle 365 Tage sowie über alle Streckenabschnitte des Strassennetzes aufzusummieren. Diese Berechnungsschritte können schematisch dargestellt werden (Abbildung 1). Daraus geht hervor, dass im Wesentlichen drei Arten von Informationen benötigt werden: Daten zur Verkehrslage, Daten zur Verkehrsnachfrage sowie Konventionen, ab wann eine Verkehrslage als „Stau“ bezeichnet werden kann sowie wie die zugehörige Wunsch- oder Zielverkehrslage zu definieren ist, um daraus Zeitverluste ableiten zu können. Terminologisch verwenden wir im Folgenden weiterhin den Begriff „Staustunden“ bzw. „Fahrzeugstaustunden“, auch wenn der Begriff von ‚Zeitverlusten‘ angemessener wäre, denn solche ergeben sich nicht allein infolge von ‚Staus‘, sondern auch aus der Verkehrslage ‚stockender Kolonnenverkehr‘ im Sinne der Verkehrsinformation.



In einem zweiten Schritt kann dieser Wert mit einem Kostensatz (CHF/Std.) multipliziert werden. Weil diese Kostensätze nach Fahrzeugkategorien (PW, Lieferwagen, Schwere Nutzfahrzeuge, Reiscars) variieren, sind auch die Fahrzeugstaustunden nach Fahrzeugkategorien differenziert zu ermitteln. So ergeben sich letztlich die interessierenden Stauzeitkosten.

▪ Fragestellung 2: Vom Schwerverkehr verursachte Kosten

Bei der zweiten Aufgabe geht es um den Anteil der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten. Das Bundesgericht hat dazu in seinem Urteil des Bundesgerichts vom 17. Dez. 2011 (E.3.) Vorgaben formuliert, wie dieser Anteil zu ermitteln ist. Das BG hat diese Vorgaben im Urteil vom 8. August 2013 bestätigt. Demnach ist die sog. Sichtweise „Verkehrsart“ anzuwenden. Gemäss diesen Vorgaben sind nur jene Stauzeitkosten zu berücksichtigen, welche der Schwerverkehr den übrigen Verkehrsteilnehmern verursacht. Irrelevant ist dabei, wieviel der Nicht-Schwerverkehr dem Schwerverkehr aufbürdet, denn dieser Indikator ist primär im Kontext der LSVA von Belang, wobei es primär um eine Kostenzuteilungsregel geht. Für die Quantifizierung bedeutet dies, dass die reale heutige Situation unter Einbezug des Schwerverkehrs verglichen werden soll mit einer fiktiven Situation der Strassenbenutzung ohne Schwerverkehr. Aus diesem Vergleich „real“ vs. „fiktiv“ lässt sich der Anteil der dem Schwerverkehr anrechenbaren Stauzeitkosten ableiten. Die fiktive Situation muss zwangsläufig „modellmässig“ ermittelt werden, im Kontext beschränkter Daten auch schematisch und approximativ, was laut Bundesgericht auch explizit gerechtfertigt ist. Wie in der ersten Aufgabe sind auch bei der zweiten Fragestellung die ermittelten Stauzeiten anschliessend mit einem Kostensatz (CHF/Stunde) zu verknüpfen. So lassen sich aus den Zeitangaben die entsprechenden Kostenbeträge ableiten.

2.3. Datengrundlagen

Beide oben skizzierten Fragestellungen sind zwangsläufig auf umfangreiche Datengrundlagen angewiesen und betreffen den Verkehrsfluss wie auch die Verkehrsnachfrage, welche vom variierenden Verkehrsfluss betroffen ist.

2.3.1. Daten zum Verkehrsfluss

Zum Verkehrsfluss existieren heute für die Schweiz im Wesentlichen drei weitgehend flächendeckende Datensätze:

Staut Statistik (von Viasuisse):

Diese Quelle liegt, wie oben erwähnt, dem sog. Verkehrsflussbericht des ASTRA (ASTRA 2015) zugrunde. Die über Radio und Internet verbreiteten Verkehrs- und Staumeldungen werden auch statistisch erfasst und abgelegt, sie stehen somit für die Auswertung zur Verfügung. Bei diesem Ansatz sind einzelne Stauereignisse der Ausgangspunkt, mit der Angabe von Start- und Endzeitpunkt eines Ereignisses. Gleichzeitig enthält diese Statistik auch Angaben zum Start- bzw. Endpunkt des Stauereignisses. Allerdings ist gemäss Viasuisse, der Stelle, welche diese Daten registriert, die genaue räumliche Verortung, die sich auf das sog. TMC-Netz (Traffic Message Channel) bezieht, mit gewissen Vorbehalten zu interpretieren. Mit diesem Datensatz ist somit primär die Staudauer bekannt – diese jedoch nur für Autobahn-Abschnitte. Für das Nicht-Autobahn-Netz werden zwar ebenfalls Staumeldungen erfasst, aber – gemäss Viasuisse – nicht systematisch ausgewertet und Dritten verfügbar gemacht. Für eine Berechnung der Fahrzeug-Staustunden wären somit – ergänzend zur Staudauer und der (indikativen) Staulänge – Angaben zur Verkehrsnachfrage aus zusätzlichen Datenquellen zu beschaffen und zeitlich und örtlich den jeweiligen Stausituationen zuzuordnen. Die „Staut Statistik“ liefert also Partialinformationen. Einschränkend muss zudem gesagt werden, dass die Qualität der Angaben unklar ist: *Diese „steht und fällt mit den Möglichkeiten zur verlässlichen Beurteilung des Verkehrsgeschehens auf den Nationalstrassen. Wird eine Verkehrsbehinderung nicht erkannt oder gemeldet, fließt diese auch nicht in die Statistik ein. Im selben Sinn kann eine zu spät erkannte Auflösung eines Staus zu einer Überbewertung der Anzahl Staustunden führen. Trotz fortlaufender Prozessverbesserungen beim ASTRA und bei der Viasuisse ist noch keine lückenlose und automatische Erfassung von Verkehrsbehinderungen auf dem gesamten Nationalstrassennetz möglich. Nach wie vor basiert ein Teil der verwendeten Verkehrsmeldungen auf Beobachtungen der Polizei, der nationalen Verkehrsmanagementzentrale/VMZ in Emmenbrücke und der Verkehrsteilnehmenden. Die Erfassungsmethodik und –systematik ist Gegenstand laufender Verbesserungen aller beteiligten Stellen.“* (ASTRA 2015, Kap. 3.1.1). Einen gewissen Vorteil dieser Datenquelle kann man darin erkennen, dass die Angaben seit mehreren Jahren vorliegen. Allerdings

lassen die laufenden Verbesserungen die Frage offen, wie viele der neu registrierten Stauereignisse auf die verbesserte Erfassung zurückzuführen sind. Dadurch kann die Zeitreihe irreführend sein, weil der Erfassungsanteil tendenziell immer besser wird. Trotz dieser Vorbehalte wird diese Datenquelle im Rahmen dieser Studie herangezogen, wenn auch nicht als primäre Quelle, sondern für einen Quervergleich mit andern Datenquellen und damit im Sinne der Validierung.

Online-Daten (Automatische Zählungen/Messungen des ASTRA):

Das Bundesamt für Strassen (ASTRA) wie auch einige Kantone führen im Rahmen der statistischen Erhebungen des Bundes seit vielen Jahren automatische Dauerzählungen/ Messungen durch (Schweizerische automatische Strassenverkehrszählung [SASVZ]). Dabei werden mittlerweile an rund 360 Streckenabschnitten im übergeordneten Strassennetz Verkehrsmengen erfasst. Bei einem grossen Teil der Messpunkte (ca. 250) wird nicht nur die Menge und der Typ der passierenden Fahrzeuge, sondern auch deren lokale Geschwindigkeit an einem bestimmten Querschnitt registriert. Diese Daten werden dann einzelfahrzeugweise oder auch aggregiert zu Mittelwerten in 1- oder 3-Minuten-Intervallen verfügbar gemacht. Die Angaben von Menge und Durchfahrteschwindigkeit stehen differenziert nach leichten und schweren Motorwagen zur Verfügung⁴. Früher wurden die Messstellen bewusst nicht bei bekannten Staubrennpunkten festgelegt, da die detektierenden Induktionsschleifen lediglich sich bewegendende Fahrzeuge registrieren können. Im Stau still stehende Fahrzeuge können per definitionem nicht gemessen werden, sondern werden erst in fahrendem Zustand registriert. Die Zahl der Messstellen wurde in den letzten Jahren erheblich erhöht (z.B. im Rahmen des Ausbaus der Autobahnen im Raum Zürich [Eröffnung A4 / Üetliberg-Tunnel, 2009]). Diese Daten bilden eine der zentralen Datenquellen für die vorliegende Studie, weil sie simultan Verkehrsmengen und Verkehrsflussinformationen enthalten. Vorteilhaft ist darüber hinaus, dass diese Daten als Zeitreihe mit gleicher Erfassungsmethodik über mehrere Jahre vorliegen. Einschränkend ist zu erwähnen, dass diese Daten sich vorwiegend auf das Nationalstrassennetz beziehen, zum übrigen Hauptverkehrsstrassennetz existieren nur wenige Messpunkte. Zudem liefern die Daten zwar Hinweise auf Stauereignisse (erkennbar durch abgesenkte Querschnittsgeschwindigkeiten), aber per se keine Reisezeiten, welche hier im Zentrum des Interesses stehen. Auf diese Datenquelle wird in Abschnitt 2.3.4 weiter eingegangen.

⁴ Die Fahrzeugklassifizierung erfolgt in der Regel gemäss Swiss10, d.h. der Einteilung in 10 Fahrzeugkategorien. Im vorliegenden Projekt stand ein Datensatz zur Verfügung, in dem diese Kategorien zu den zwei Gruppen PW und LKW aggregiert wurden (vgl. Details in Abschnitt 2.3.4).

Floating Car Data (FCD) und Floating Phone Data (FPD):

Floating Car Data (FCD) bezeichnen Daten, die aus einem Fahrzeug heraus generiert werden, welches aktuell am Verkehrsgeschehen teilnimmt. Das umfasst sowohl Daten über den Zustand des Fahrens als auch Zustandsdaten des Ortes beim Stehen, zum Beispiel im Stau, vor Ampeln oder auf einem Warteplatz. Ein Datensatz beinhaltet den Zeitstempel sowie die aktuellen Ortskoordinaten und ggf. weitere Informationen von Sensoren wie etwa Temperatur. Durch den Einsatz des Floating-Car-Data-Verfahrens (FCD) werden Autos zu mobilen Sensoren. Ein Fahrzeug, das FCD generieren soll, benötigt ein GPS-Gerät, eine Mobilfunkanlage und ein Endgerät für die Kommunikation mit der FCD-Zentrale und die Bildschirmanzeige im Fahrzeug.

Floating Phone Data (FPD, manchmal auch Cellular Floating Vehicle Data genannt) bezeichnen die anbieterseitige Positions- und Bewegungsermittlung von Mobilfunkgeräten und umfassen damit im Wesentlichen die gleiche Information (Ort und Zeitpunkt als Datenstrom) wie FCD. Im Gegensatz zum GPS-Logging von FCD, bei dem die Position je nach eingesetztem Verfahren auf wenige Meter bestimmt werden kann, erfolgt die Positionsbestimmung bei Floating Phone Data anbieterseitig über Kontakte in den Funkzellen und ist daher ungenauer. Gleichwohl eignet sich die Methode zur Verkehrsflussbestimmung. FPD ergänzen FCD kostengünstig, da sie keine Zusatzinvestitionen für Endnutzengeräte verursachen.

Daten zur Verkehrslage, wie sie heute auch auf dem Internet angeboten werden, basieren weitgehend auf FCD und FPD. Prominenteste Daten-Anbieter sind derzeit Google, Here, TomTom und INRIX. Die beiden letztgenannten bieten auch historische Datenarchive an.

FCD und FPD liefern im Prinzip genau die Informationen, die für die Bestimmung von Zeitverlusten nötig sind: Ort und Zeitpunkt von Fahrzeugen oder Mobilgeräten werden in kurzen Zeitabständen (je nach Anbieter in weniger als 1 Minute oder bis zu einigen wenigen Minuten) registriert. Daraus lassen sich der Zeitbedarf und so auch die mittlere Reisegeschwindigkeit für die entsprechende Strecke ableiten. Die Fahrzeit-Differenzen zwischen Haupt- und z.B. Nebenverkehrszeit lassen Rückschlüsse zu auf die gesuchte gesamte Zeitverzögerung. Das lässt sich dann auf die Streckenabschnitte eines Netzes umlegen, so dass pro Streckenabschnitt der mittlere Zeitbedarf je Zeitintervall bekannt wird. So ergeben sich flächendeckende Angaben zum Verkehrsfluss zu verschiedenen Zeitpunkten, praktisch zu jeder Viertelstunde oder gar zu jeder Minute über alle Tage eines bestimmten Analysejahres. Ein zusätzlicher Vorteil liegt (im Prinzip) im Umstand, dass diese Daten nicht nur für Autobahnen, sondern auch für die wichtigsten Hauptverkehrsstrassen verfügbar sind. Aufgrund dieses vielversprechenden Potenzials wurde im Rahmen dieser Untersuchung eigens ein Datensatz von INRIX beschafft (Jahr 2013). Dieser

umfasst für das TMC-Streckennetz mit einem Umfang von rund 19'000 Abschnitten für jede Minute aller 365 Tage des Jahres 2013 jeweils eine Angabe zur mittleren Streckengeschwindigkeit (was einen respektablen Datensatz von rund 10 Mrd. Records⁵ ergibt).

Damit liegen für diese Untersuchung in der Schweiz erstmalig neue Daten vor, welche eine verlässlichere Staukostenermittlung versprechen, und zwar in zweierlei Hinsicht. Zum einen musste in der letzten Studie (ARE 2012) für das Verkehrsgeschehen auf den Autobahnen bisher allein auf die Messungen der Querschnittsgeschwindigkeiten abgestellt werden; ein Schwachpunkt jener Methodik liegt insbesondere in der Notwendigkeit der Hochrechnung von zählstellen-spezifischen Angaben auf die Summe der Stauzeiten im gesamten Autobahn-Netz. Zum andern lagen für das übrige Strassennetz kaum verlässliche Zahlen zum Verkehrsfluss vor. Zwar waren bereits 2012 FCD-Daten für das gesamtschweizerische Netz verfügbar, die sog. speed profiles der Firma TomTom, welche das ARE damals zur Verfügung stellte. Diese Geschwindigkeitsangaben waren aber zu Stundenwerten aggregiert, wodurch prinzipiell ein signifikanter Teil der Stauzeiten entfällt bzw. „wegaggregiert“ wird. Zudem hat man damals aus praktischen Gründen⁶ diese Verkehrsflussdaten mit Nachfragezahlen aus einem kantonalen Verkehrsmodells (Kanton BE) verknüpft, welches bereits das gleiche Streckennetz verwendete (TomTom-Strassennetz); diese Verknüpfung hat sich als nur bedingt tauglich herausgestellt. Die Ergebnisse wurden deshalb als „indikativ“ interpretiert. Daraus leitet sich der spezielle Vertiefungsbedarf für die Nicht-Autobahnen ab.

Vor diesem Hintergrund verspricht der INRIX-Datensatz eine Verbesserung der Datenlage. Er ermöglicht eine neue Berechnungsart und ist deshalb eine zentrale Grundlage für die Staukostenermittlung im Rahmen dieser Untersuchung. Selbstredend ergibt sich daraus ein Methodenwechsel gegenüber früheren Arbeiten (mehr dazu folgt in Abschnitt 2.3.3).

Allerdings umfasst dieser Datensatz noch keine Angaben zur Verkehrsnachfrage. Diese musste deshalb separat beschafft werden und schliesslich in einem zusätzlichen Arbeitsschritt örtlich und zeitlich differenziert den Verkehrsfluss-Datensätzen zugeordnet werden.

2.3.2. Verkehrsnachfrage

Für die Verkehrsnachfrage konnte – ergänzend zu den bereits erwähnten Angaben in den Online-Daten (Automatische Zählungen/Messungen des ASTRA) – auf das nationale Personenverkehrsmodell (NPVM) des UVEK zurückgegriffen werden. Dieses liefert für rund 20'000 Streckenabschnitte des schweizerischen Strassennetzes Angaben zur Verkehrsnachfrage in Form von DTV-Angaben (durchschnittlicher täglicher Verkehr), differenziert nach verschiedenen

⁵ 19'000 Streckenabschnitte * 365 Tage * 24 Std * 60 Min.

⁶ Für die damalige Studie stand nur ein sehr knapper Zeitrahmen zur Verfügung, weil die Studie im Rahmen eines Gerichtsverfahrens erstellt wurde.

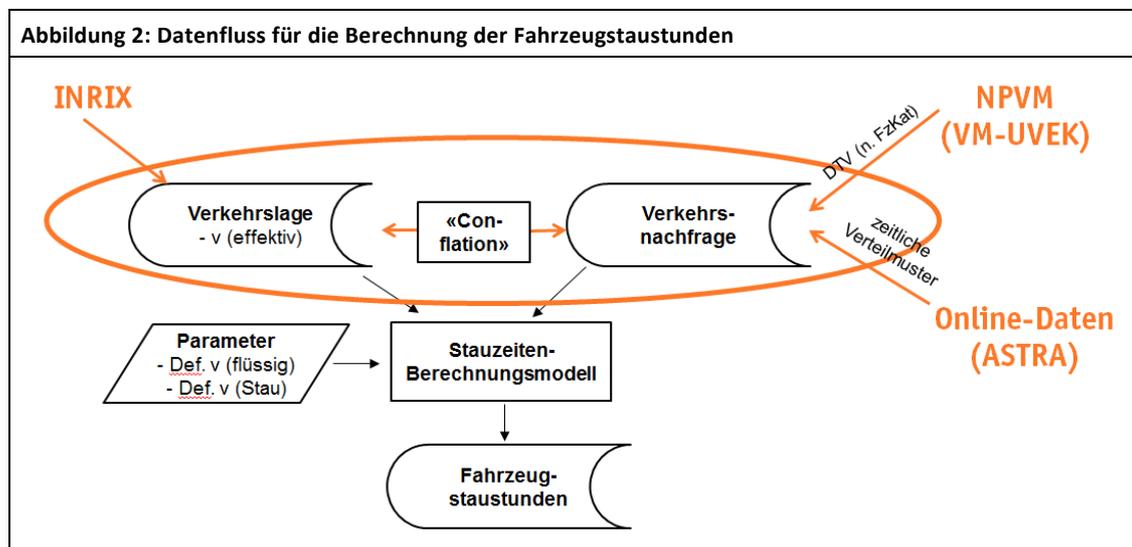
Fahrzeugkategorien (Personenwagen, Lieferwagen, Lastwagen sowie Sattel-/Lastenzüge). Das ARE stellte diesen Datensatz für das Bezugsjahr 2013 zur Verfügung (ARE 2015). Das ist zwar kein direkter statistischer, sondern ein Modell-Datensatz, der aber eigens auf die oben erwähnten Messdaten des ASTRA sowie weitere kantonale Messergebnisse kalibriert wurde.

2.3.3. Datenaufbereitung

Übersicht

Ursprünglich war angedacht, die Staukostenberechnung in erster Linie für das Jahr 2010 durchzuführen, um so kompatibel zu sein mit den übrigen Arbeiten zu den externen Kosten (ARE 2014). Weil mit dem INRIX-Datensatz Verkehrslageinformationen für das Jahr 2013 (nicht aber für 2010) verfügbar waren, wurde beschlossen, das Jahr 2013 zum Bezugsjahr zu machen und Angaben zur Zeitreihe 2010-2014 im Nachgang abzuschätzen. Der erste Arbeitsschritt galt deshalb der Aufbereitung der verschiedenen Datensätze für das Jahr 2013.

Keiner der oben beschriebenen Datensätze enthält für sich allein bereits alle nötigen Angaben um Fahrzeugstauzeiten zu ermitteln. Vielmehr mussten die Datensätze in verschiedener Hinsicht kombiniert werden. Abbildung 2 zeigt die wichtigsten Elemente und Arbeitsschritte, welche nötig waren um Fahrzeugstauzeiten zu ermitteln:



- Ausgangspunkt war der INRIX-Datensatz mit den Informationen zur Verkehrslage bezogen auf das TMC-Netz (Geschwindigkeit je Streckenabschnitt, pro Minute aller 365 Tage des Jahres 2013).

- Diesem Netz wurden die Verkehrsbelastungen (DTV für PW, Lieferwagen und Schwerverkehr) gemäss dem Nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) des UVEK⁷ zugewiesen. Weil das NPVM aber nicht auf dem TMC-Netz, sondern einem eigenständig definierten Streckennetz basiert, musste in einem separaten Arbeitsschritt ein Konversionsfile zwischen den beiden Netzen erstellt werden (sog. „Conflation“, Geologix 2014). Erst so konnten die Verkehrsbelastungen auf das TMC-Netz transferiert werden.
- Die Verkehrsnachfrage lag als DTV (durchschnittlicher täglicher Verkehr) pro Streckenabschnitt vor. Um der zeitlichen Variation des Verkehrsgeschehens Rechnung zu tragen, musste der DTV pro Streckenabschnitt in minutenfeine Angaben transformiert werden – entsprechend den detaillierten Informationen zur Verkehrslage. Dies erfolgte anhand der Daten der Online-Zählstellen, welche für alle 3-Minuten-Abschnitte aller 365 Tage der jeweiligen Jahre an den Zählpunkten aufzeigen, wie viele Fahrzeuge je Richtung passieren (und mit welcher Geschwindigkeit, wobei dies für diesen Arbeitsschritt nicht von Belang war). Diese Daten, die pro Fahrspur vorliegen, wurden zu jeweils einem Wert pro Richtung aggregiert, da auch die Verkehrsflusszahlen lediglich aggregiert pro Richtung vorliegen. Mit solchen „zeitlichen Verteilmustern“ für jede der rund 250 Zählstellen konnte der DTV auf die einzelnen Zeitscheiben verteilt werden⁸. Vorgängig musste jeder Strecke eine entsprechende Zählstelle zugewiesen werden. Dazu wurden die Zählstellen zuerst den effektiv korrespondierenden TMC-Netzabschnitten zugeordnet. Anschliessend wurde das gleiche Muster in Fahrrichtung allen folgenden Netzabschnitten zugeschrieben bis zur nächsten im Netz definierten Zählstelle. Für die Autobahnen konnten so differenzierte Verteilmuster zugeordnet werden, der DTV selber ist aber streckenspezifisch durch das NPVM definiert. Für die Nicht-Autobahnen musste pauschaler vorgegangen werden, da nur wenige Zählstellen als Lieferanten von zeitlichen Verteilmustern vorlagen. Deshalb wurde ein Verteilmuster einer Zählstelle mit einer durchschnittlichen Ausprägung insbesondere bezüglich werktäglicher Morgen- und Abendspitze identifiziert und so generell zugeordnet.
- So lag schliesslich ein Datensatz vor, der für jeden Streckenabschnitt und für jede der 365 x 24 Stunden x 60 Minuten im Jahr 2013 eine Angabe zur mittleren Reisegeschwindigkeit sowie zur Anzahl Fahrzeuge umfasste, letzteres differenziert nach PW, Lieferwagen und Schwere Motorwagen.
- Mit diesem Datensatz konnte die Berechnung der Fahrzeugstautunden gemäss Formel [1], getrennt für PW, Lieferwagen und schwere Motorwagen, durchgeführt werden. Ergänzend

⁷ Das Nationale Personenverkehrsmodell wird von der Verkehrsmodellierung im UVEK (VM-UVEK) betrieben.

⁸ Die Angaben je 3-Minuten gemäss Zähldaten wurden anschliessend weiter uniform auf die 1-Minuten-Intervalle verteilt, um mit den Verkehrslage-Informationen kompatibel zu sein.

zur effektiven Streckengeschwindigkeit pro Minute für jede Strecke musste auch eine Ziel- oder Wunschgeschwindigkeit („v-freeflow“) definieren werden, weil primär die Zeitverluste interessierten.

- Dieser Datensatz erlaubt zusätzliche Berechnungen namentlich zur Plausibilisierung und für den Quervergleich mit Indikatoren, die aus den andern Datensätzen ermittelt werden können:
 - Neben den Fahrzeugstaudunden lässt sich die Staudauer pro Streckenabschnitt ermitteln. Dazu muss allerdings definiert werden, unterhalb welcher Schwellenwerte der Reisegeschwindigkeit eine Situation als „Stau“ gelten soll. Auch der Online-Datensatz erlaubt die Ermittlung von Staudauern – dies allerdings nur punktuell für die Streckenabschnitte mit Zähldaten. Gleichwohl ergibt sich so eine nützliche Vergleichsmöglichkeit.
 - Die Staustatistik von Viasuisse enthält Angaben zur Staudauer. Diese Angabe kann dort direkt und ohne Umweg über Schwellenwerte herausgelesen werden; implizit hat allerdings Viasuisse vorgängig bereits festgelegt, ab welcher Geschwindigkeit eine Verkehrssituation ein „Stau“ bzw. „stockender Kolonnenverkehr“ ist. Die Angaben sind gleichwohl nicht direkt vergleichbar, denn die Viasuisse-Statistik macht ereignis-bezogene Angaben (von wann bis wann und von wo bis wo war ein Stauereignis zu verzeichnen). Für einen Vergleich mit den INRIX-Daten bzw. den Online-Daten musste deshalb jene Statistik zuerst auf das TMC-Netz umgelegt werden, was mit einem speziellen Umlegungsalgorithmus gelöst wurde, da die Statistik zu jedem Stauereignis einen Start- bzw. Endpunkt ausweist. So lassen sich die Staudauern aus drei Datensätzen miteinander vergleichen.
 - Schliesslich ist es mit den Online-Daten ebenfalls möglich, Fahrzeug-Staudunden zu ermitteln, allerdings nicht absolute, sondern spezifische Fahrzeugstaudunden (in Verlustzeiten / km) am jeweiligen Zählstellenquerschnitt. Auch der angereicherte INRIX-Datensatz erlaubt die Berechnung dieses Indikators, so dass hier eine weitere Vergleichsmöglichkeit besteht.

2.3.4. Die Datensätze im Einzelnen

Charakterisierung des INRIX-Datensatzes:

- Dieses Netz wie auch die aktuelle Verkehrslage ist kostenlos zugänglich auf dem Internet (<http://www.inrixtraffic.eu/Traffic.aspx>).
 - Geschwindigkeit pro Netzabschnitt des TMC Netzes (Traffic Message Channel⁹), ca. 19'000 Abschnitte (ca. 9500 x 2 Richtungen)
 - Für alle Minuten des Jahres (365 x 24h x 60 Min.)

⁹ Eine Besonderheit des INRIX-TMC-Netzes besteht darin, dass die offiziellen Abschnitte weiter unterteilt werden in einen ‚external‘ und ‚internal‘ Teil.

- Inputs: 12 Monatsfiles (csv) à ca. 35 GB (total ca. 400 GB)
- Info pro Record: LinkID, DateTimeUTC, v (mph), Score
- Range: 01-Jan-2013 00:00 - 31-Dec-2013 23:59
- Score: 30 = Real Time; 20 = NAS¹⁰; 10 = Free Flow
- Zudem: Liste aller TMC-Abschnitte mit Angaben zum Streckentyp (motorway, 1./2./3.-Class-Road) und der Distanz (km)

Abbildung 3 illustriert das TMC-Netz am Beispiel der Zürcher Nordumfahrung sowie die Information, wie sie im INRIX-Datensatz verfügbar ist¹¹. Es deckt rund 2000 km Autobahnen und Autostrassen ab sowie knapp 21'000 weitere Hauptverkehrsstrassen.

¹⁰ NAS: Nationwide Average Speeds (mix historic/real time)

¹¹ Ab 2014 bietet INRIX eine differenziertere Netz-Version (INRIX-XD) mit räumlich feinerer Gliederung an, die allerdings für diese Arbeit nicht verfügbar war.

Abbildung 3: Illustration des INRIX Verkehrslagesystems und des TMC Netzes

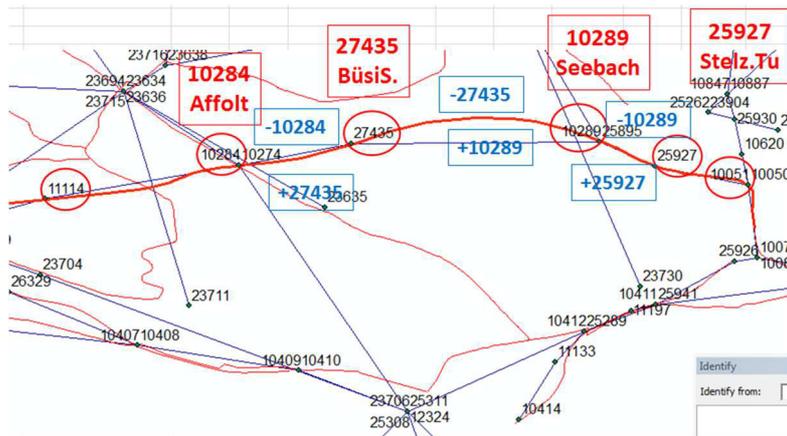
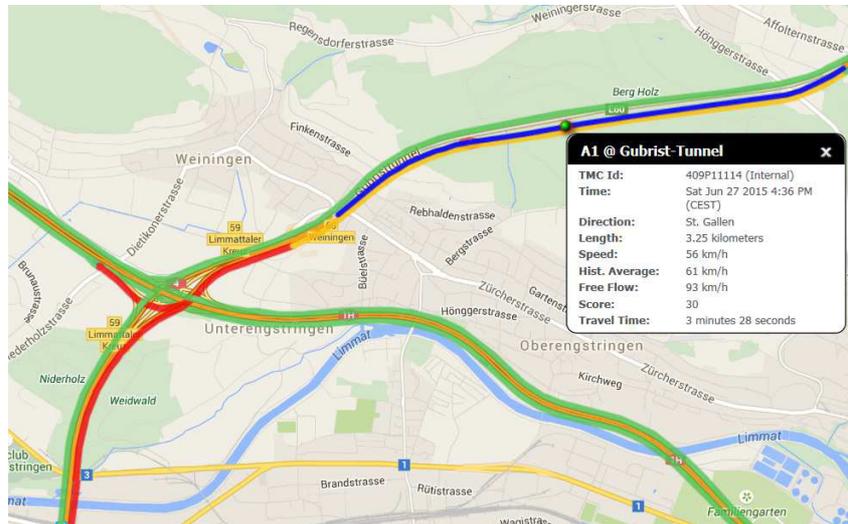
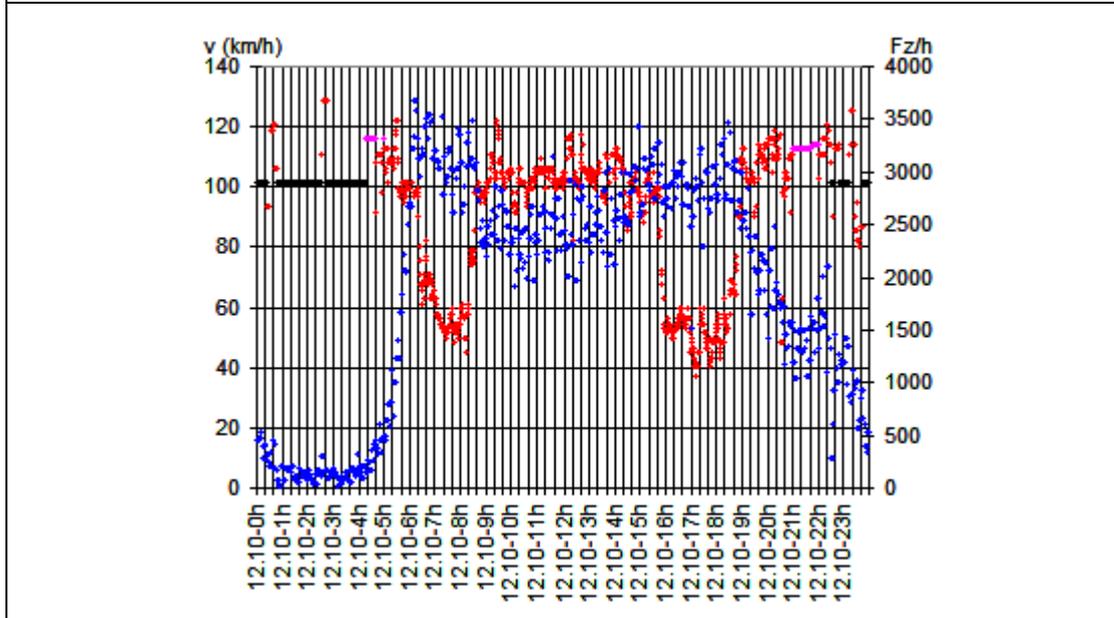


Abbildung 4 zeigt eine Illustration des angereicherten INRIX-Datensatzes. Die Darstellung zeigt die originalen mittleren Streckengeschwindigkeiten sowie die aus dem NPVM stammende durchschnittliche tägliche Verkehrsnachfrage, welche mittels aus den Online-Daten abgeleiteten Verteilmustern auf die einzelnen Tage und Minuten verteilt wurde.

Abbildung 4: Illustration eines angereicherten Tages-Datensatzes (TMC Abschnitt -10284, ZH Nordumfahrung, Richtung Bern, 11.12.2013), Angaben je Min-Abschnitt; Anzahl Fahrzeuge (PW [blau]) und deren mittlere Streckengeschwindigkeit [rot, Score 30; lila Score 20; schwarz Score 10].



Die Geschwindigkeitsangaben sind nach sog. Scores differenziert: je nach Datenverfügbarkeit sind es Real-time-Werte (=Score 30), modellierte Werte (=Score 20, NAS [=Nationwide Average Speeds], einer Modellierung aus historischen und Real-time-Daten), oder „freeflow“-Werte (=Score 10). Eine Analyse hat gezeigt (vgl. Annex A7), dass für die vorliegende Fragestellung Score 30 zu verwenden ist. Score 10 ist für die vorliegende Fragestellung für die Festlegung von v-freeflow relevant, Score 20 zeigte jedoch eine systematische Überschätzung gegenüber Score 30. Allerdings ist der Grossteil der relevanten Staubereiche, namentlich jene an Werktagen auf Autobahnen in Agglomerationen durch Score 30 gut abgedeckt (>90%), vgl. Illustration in Abbildung 5. Auf Nicht-Autobahnen und insbesondere auf weniger stark befahrenen Strecken ist die Abdeckung durch Real-Time-Daten deutlich beschränkter (vgl. Abbildung 6). Insgesamt beträgt der Abdeckungsgrad durch Score 30 auf Autobahnen 76%, auf Nicht-Autobahnen 24% (bezogen auf die Jahresfahrleistung aller drei Fahrzeugkategorien PW, Lieferwagen und Schwerverkehr).

Die Geschwindigkeitsangaben selber stammen aus einem Pool verschiedener Inputs. INRIX selber beschreibt die Quellen wie folgt: „Wichtigste Datenquelle sind Floating-Car-Daten, die von Betreibern kommerzieller Fahrzeugflotten und von privaten Nutzern an INRIX weitergegeben werden. Aber auch Daten von Connected PND (Personal Navigation Devices) und Navigations-Applikationen auf Smartphones sowie sogenannte Floating-Phone-Daten steuern zum INRIX Datenbestand in Echtzeit mit bei. Zusätzlich nutzt INRIX auch Daten aus stationären Messeinrichtungen und verarbeitet ebenfalls auch redaktionelle Meldungen.“ (INRIX 2014).

Abbildung 5: Verteilung der Angaben nach „Scores“, illustriert am Beispiel eines 6-Monat-Datensatzes (2./3. Q. .2013, TMC Abschnitt -10284, A1 Nordumfahrung Zürich). Horizontal sind die Tage, vertikal sind die Minuten von 0.00 bis. 23.59 aufgetragen. Die Farben bezeichnen die Scores.

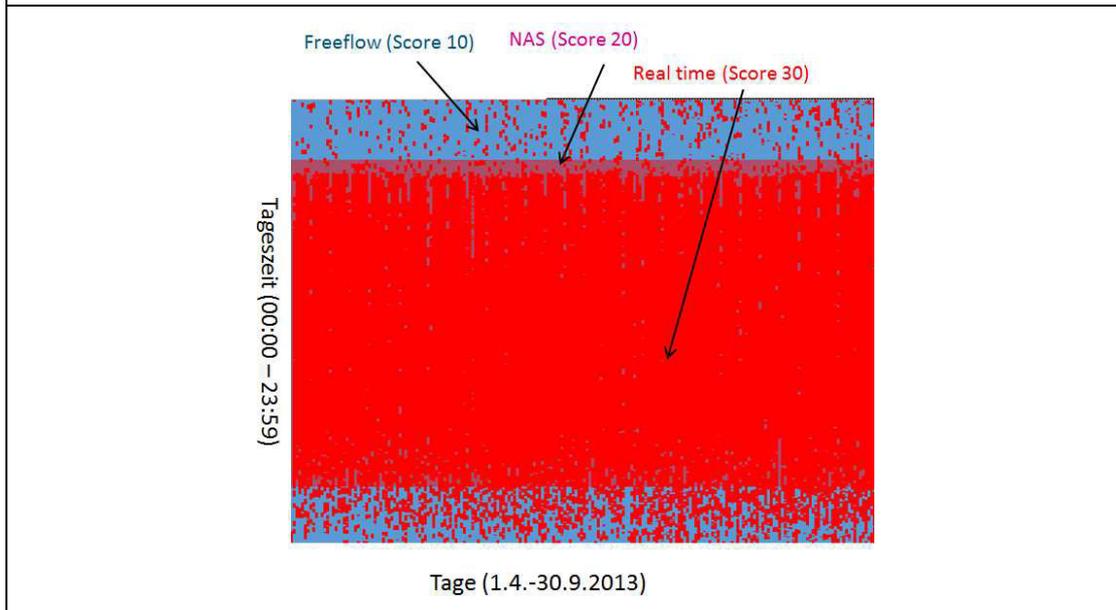
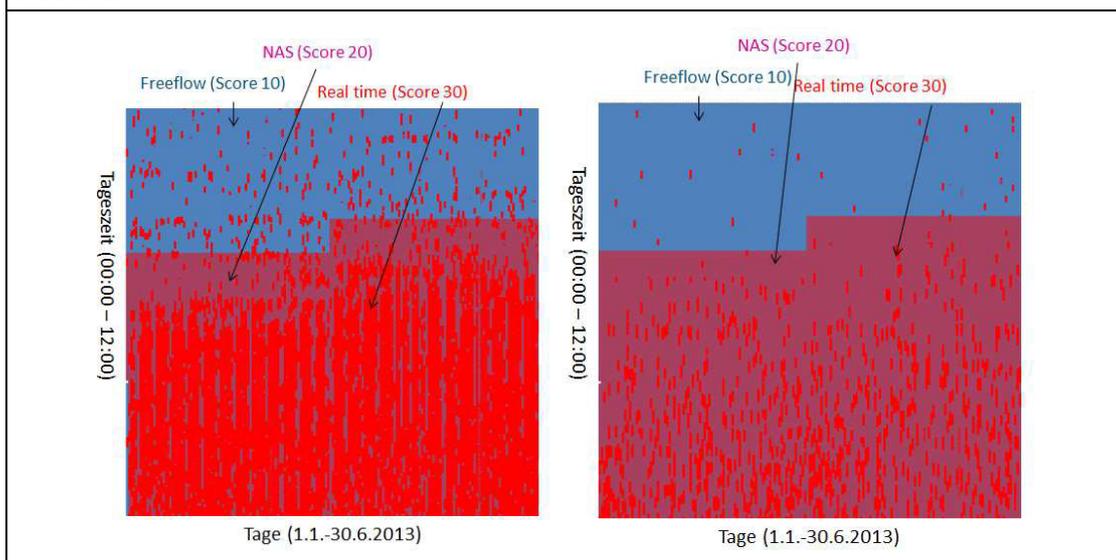
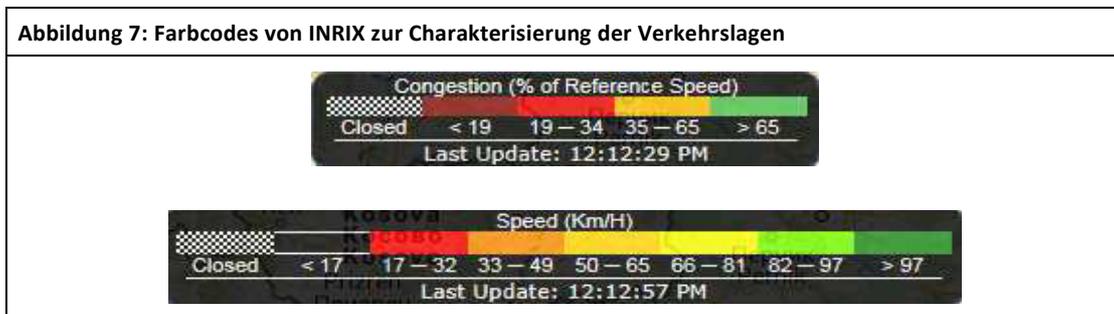


Abbildung 6: Verteilung der Angaben nach „Scores“, illustriert am Beispiel eines 6-Monat-Datensatzes der Rosengartenstrasse in Zürich [links] und der Strecke Frutigen – Reichenbach im Kandertal (Kt. BE) [rechts]. Horizontal sind die Tage, vertikal sind die Minuten von 0.00 bis. 12.00 aufgetragen. Die Farben bezeichnen die Scores.



Zur Charakterisierung der Verkehrslage bietet INRIX eine Legende in Form eines Farbcodes an (Abbildung 7). Dieser übersetzt die Speed-Information in Verkehrslage-Klassen. Diese sind im

Wesentlichen interpretierbar als „stockender Kolonnenverkehr“ [gelb] und „Stau“ [rot], wie dies bei Verkehrsinformationsdiensten üblich ist. Ergänzend ist auch eine korrespondierende Klassierung der Geschwindigkeit beigefügt. Entsprechend lassen sich aus den Geschwindigkeiten im Datensatz die jeweiligen Stauklassen festlegen. Die in den folgenden Abschnitten dargestellte Basisrechnung der Stauzeitkosten orientiert sich an diesen von INRIX genutzten Konventionen, d.h. falls die Geschwindigkeit Verkehrssituation unter 65% der Referenz-Geschwindigkeit liegt (interpretiert als v-freeflow), wird der Verkehrsfluss als gestört interpretiert, d.h. die Situation entspricht „stockendem Kolonnenverkehr“ [gelb] oder „Stau“ [rot]. Für die Berechnung der Verlustzeiten werden in der Basisrechnung die entsprechenden Angaben von INRIX verwendet.



Quelle: Inrix

Eine spezielle Herausforderung war der Umgang mit der Grösse des Datensatzes (rund 400 GB). Um die Daten in vernünftiger Rechenzeit auswertbar zu machen, wurden sie zu 2 Sets aufbereitet und aggregiert¹²: zum einen wurde für jeden Streckenabschnitt ein eigenes File generiert, um die Ergebnisse visualisieren, plausibilisieren und mit den andern Datenquellen vergleichen zu können (vgl. GIS-Darstellungen in den folgenden Abschnitten). Zum andern wurden Histogramme erstellt, welche pro Streckenabschnitt die Anzahl Fahrzeuge in den einzelnen Geschwindigkeitsstufen pro Jahr und Wochentagstyp (Werktag, Samstag, Sonntag, Feiertag) ausweisen; dies vor allem deshalb, weil nicht a priori klar war, wie die Streckengeschwindigkeit zu interpretieren sind bzw. welche Schwellenwerte unterstellt werden sollen. Mit Hilfe dieser Histogramme wurde es möglich, verschiedene Sensitivitätsrechnungen in vernünftigen Rechenzeiten durchzuführen.

¹² Diese umfangreichen Daten wurden weitgehend durch Dr. Daniel Bauer, Birmensdorf ZH, aufbereitet.

VM-UVEK Datensatz (Verkehrsnachfrage)

Mit dem nationalen Personenverkehrsmodell (NPVM) stehen für den durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) Belastungswerte für den Personenverkehr, den Lieferwagenverkehr, den Lastwagenverkehr und den Lastzügen/Sattelschleppern zur Verfügung (ARE 2015). Das UVEK-Verkehrsmodell verwendet eine leicht aggregiertere Kategorisierung der Fahrzeugtypen als der Online-Datensatz des ASTRA, aus dem die zeitlichen Verteilmuster generiert wurden: Die Zuordnung von PW, Liefer- und Lastwagen ist deckungsgleich, Reisebusse gemäss Online-Datensatz werden im UVEK-Modell in der Kategorie LW subsummiert, Motorräder in der Kategorie PW. Das NPVM deckt ein Netz von knapp 21'000 km ab (1'900 km Autobahnen und Autostrassen, sowie ca. 19'000 km übrige Hauptverkehrsstrassen), ist also bezüglich Netz-Feinheit dem TMC-Netz vergleichbar. Allerdings sind die Kodierungen der beiden Netze (TMC und VM-UVEK) vollständig unabhängig entstanden. Weil es hier darum ging, Informationen vom einen Netz auf das andere zu übertragen, mussten zuerst Konversionsfiles erstellt werden. Dieser Arbeitsschritt („Conflation“) wurde durch die Firma Geologix, Bern, durchgeführt (Geologix 2014). Diese Überführung war in der Regel erfolgreich; einzelne wichtige Netzabschnitte (insbesondere wo das offizielle TMC und das „INRIX-TMC“ voneinander abweichen), mussten manuell nachgebessert werden. Konversionslücken bei Strecken mit geringer Stauerwartung wurden nicht weiter bearbeitet, da dies im vorliegenden Kontext nicht weiter von Belang war.

Online-Daten (Automatische Zählungen/Messungen des ASTRA):

Dieser Datensatz umfasst für rund 250 Zählstellen vorwiegend des Autobahnnetzes für alle 3-Minuten-Intervalle des ganzen Jahres pro Fahrspur und Richtung die Anzahl der Fahrzeuge differenziert nach den beiden Klassen leichte bzw. schwere Motorwagen¹³ sowie deren mittlere Querschnittsgeschwindigkeit. Für diese Untersuchung standen die Datensätze der Jahre 2008 bis 2014 zur Verfügung, d.h. rund 600'000 Dateien mit total rund 350 GB. Abbildung 8 illustriert Online-Daten am Beispiel eines Tages der Zählstelle Nr. 81 Muttenz A2. Die Daten sind weitgehend vergleichbar mit den angereicherten Daten von INRIX (vgl. Abbildung 4), allerdings handelt es sich hier um Querschnitts- und nicht um Streckengeschwindigkeiten. Die Verkehrsnach-

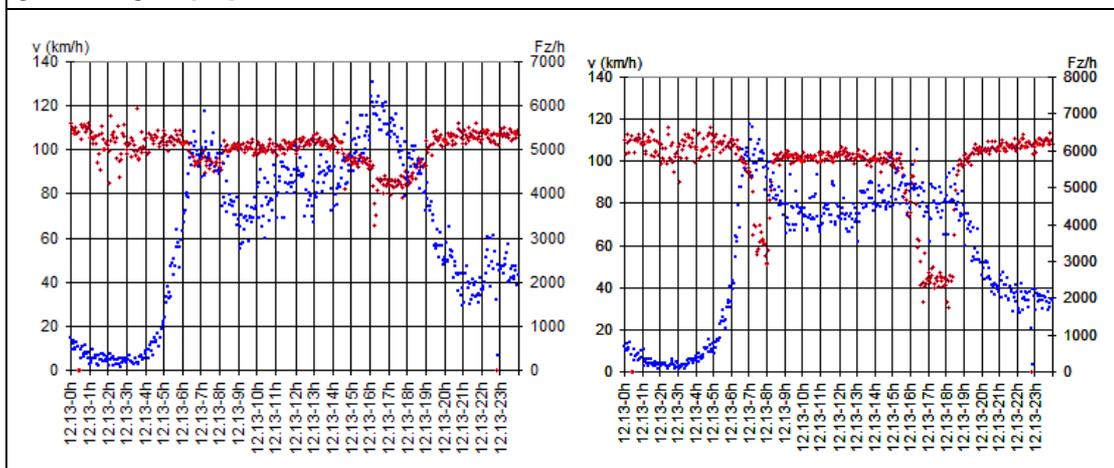
¹³ Der Online-Datensatz basiert auf Einzelfahrzeug-Messungen, die gemäss der Swiss10-Typisierung 10 Fahrzeugklassen zugeordnet werden (1: Bus/Car, 2: Motorrad, 3: Personenwagen, 4: Personenwagen + Anhänger, 5. Lieferwagen, 6. Lieferwagen mit Anhänger, 7. Lieferwagen mit Auflieger, 8. Lastwagen, 9. Lastenzug, 10. Sattelzug). Im hier verfügbaren, zu 3-Minuten-Intervallen aggregierten Datensatz wurden diese Fahrzeugklassen wie folgt zu den Gruppen PW bzw. LKW aggregiert:

- PW: Swiss10 Klassen 2, 3, 4, 5, 6 und 7
- LKW: Swiss10 Klassen 1, 8, 9 und 10

fragedaten stammen aus demselben Datensatz. Der Konnex zwischen Nachfrage und Geschwindigkeit ist hier deshalb präziser. Diese Daten erlauben die Verwendung für verschiedene Zwecke:

- Es können damit die „zeitlichen Verteilmuster“ generiert werden, auf deren Basis im INRIX-Datensatz der Tagesverkehr, der vom NPVM via Konversionsfiles dem TMC-Netz zugewiesen wurde, auf die einzelnen Tage bzw. Minuten verteilt wurde.
- Auch können für die einzelnen Zählstellen die analogen Berechnungen durchgeführt werden wie mit den angereicherten INRIX-Daten, einmal die Staudauer, und einmal die Fahrzeugstautunden – allerdings spezifisch, d.h. Fahrzeug-Stautunden pro Km, da die Online-Daten nicht Strecken-, sondern lokale Querschnittsgeschwindigkeiten messen.
- Die Daten erlauben schliesslich auch die Bildung von Fundamental-Diagrammen, d.h. Funktionen, die den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Nachfrage beschreiben (vgl. Abschnitt 2.6.1).

Abbildung 8: Illustration des Online-Datensatzes einer Zählstelle (81 Muttenz, 13.12.2013) in beide Richtungen: Angaben je 3-Min-Abschnitt zur Anzahl Fahrzeuge (PW [blau]) und deren mittleren Querschnittsgeschwindigkeit [rot].



Wie die INRIX-Daten haben auch die Online-Daten einen respektablen Umfang (rund 250 Zählstellen, mit richtungstrennten Daten pro 3-Minutenabschnitte aller 365 Tage der sechs Jahre 2009-2014) von mehreren 100 Mio. Datensätzen¹⁴. Sie wurden ebenfalls komprimiert (zu Tagesfiles) um für explorative Analysen verfügbar zu machen, da nicht a priori klar war, mit welchen Konventionen (z.B. Stauschwellenwerten) zu rechnen ist. Für die Basisrechnungen wurde

¹⁴ 6 Jahre x 250 Zählstellen x 2 Richtungen x n Fahrspuren x 365 Tage x 24h x 20 Drei-Minuten-Abschnitte/h

(wie in der Studie 2012) unterstellt, dass eine Situation dann staurelevant ist, wenn die Querschnittsgeschwindigkeit unter 60% fällt (also ein leicht strengeres Kriterium als INRIX es verwendet).

Neben der Grösse der Daten war die Datenqualität eine spezielle Herausforderung, da diese Daten offenbar keine vorgängige Plausibilisierung erfahren haben, so dass zuerst Datenlücken identifiziert und – soweit mit beschränktem Aufwand machbar – Unplausibilitäten und Redundanzen eliminiert werden mussten. Wo sich schliesslich Datenlücken ergaben, wurden Mittelwerte, die aus den restlichen, als plausibel eingestuften Werten ermittelt wurden, als Proxi-Werte eingesetzt.

Staustatistik

Wie oben bereits ausgeführt, weist die Staustatistik von Viasuisse eine grundlegend andere Datenstruktur aus als die INRIX- und die Online-Daten des ASTRA. Sie orientiert sich an einzelnen Stauereignissen und weist dazu die Staudauer sowie die Orte von Beginn bzw. Ende des Ereignisses aus. Für die Jahre 2013 und 2014 sind beispielsweise je rund 137'000 Ereignisse registriert. Gleichzeitig wird auch eine Ursache angegeben (Überlastung, Unfall, Baustelle etc.). Die aggregierten Angaben zur Staudauer lassen sich weder mit den INRIX- noch den Online-Daten vergleichen, weil es sich dort um streckenbezogene Angaben, bei der Staustatistik jedoch um ereignisbezogene Angaben handelt. Um diese vergleichbar zu machen, wurde die Staustatistik deshalb auf das TMC-Netz umgelegt, um die Staudauer je Streckenabschnitt vergleichen zu können. Im Abschnitt 2.4 werden entsprechende Vergleiche gezeigt.

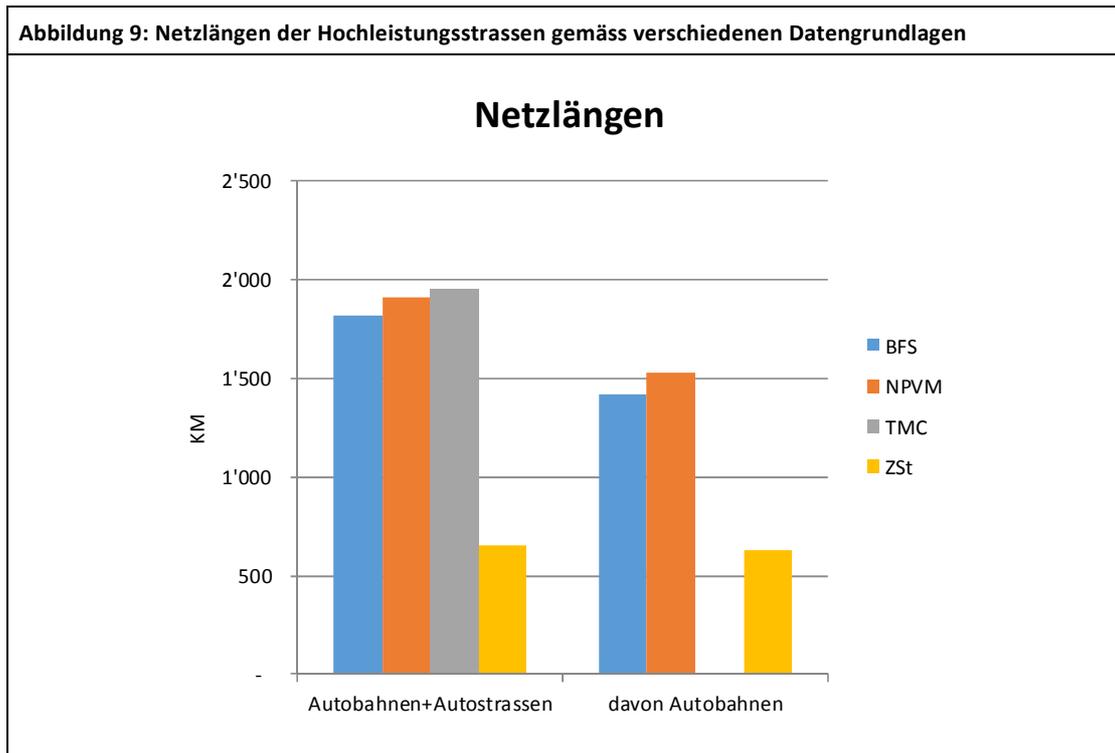
2.3.5. Mengengerüste

Bevor auf die Ergebnisse der Berechnungen eingegangen wird, werden als Hintergrundinformation im Folgenden einige Kenngrössen zu den zugrunde liegenden Mengengerüsten aufgeführt, die für Analogie-Schlüsse benötigt wurden, da zwar eine äussert grossen Datenmenge verfügbar war, aber damit gleichwohl noch nicht alle Bedürfnisse in der nötigen Qualität abgedeckt werden konnten, wie in den folgenden Abschnitten noch gezeigt wird.

Netzlängen

Fahrzeugstauzeiten hängen u.a. auch von den gefahrenen Streckenlängen ab, denn die Fahrzeiten bzw. Verlustzeiten werden hier aus Geschwindigkeit und Netzlänge abgeleitet (Zeitbedarf = Distanz/Geschwindigkeit). Abbildung 9 zeigt die den verschiedenen Datensätzen zugrundeliegenden Netzlängen. Dabei ist zu beachten, dass den Netzen unterschiedliche Terminologien zugrunde liegen. Das BFS bezieht sich auf Nationalstrassen, das TMC spricht von „motorways“ und schliesst kantonale Autobahnen und Autostrassen mit ein. Der Teil an Netzlänge, welche

den Zählstellen zugeschrieben wird, wird hier erwähnt, ist aber nicht mehr weiter relevant, da – anders als in der Vorgängerstudie 2012 – keine Hochrechnungen mehr gemacht werden, die sich an der Netzlänge orientieren.

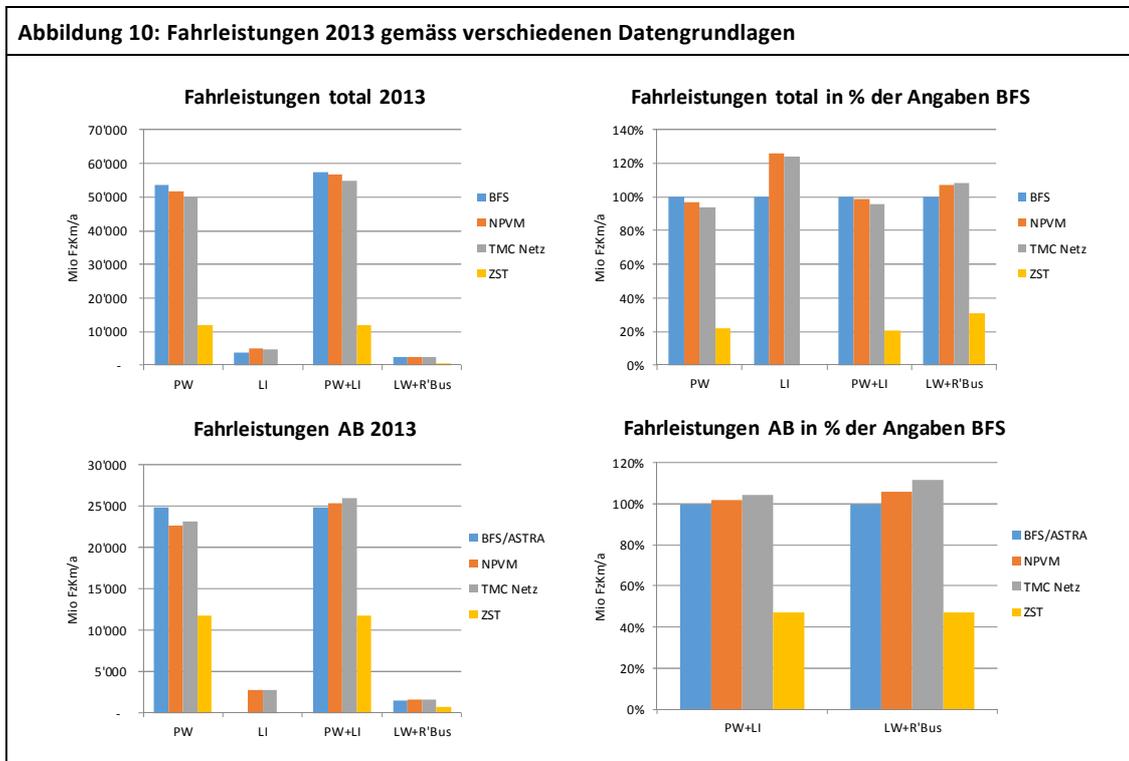


Zahlen und Quellenangaben zur Abbildung finden sich in Annex A1.

Fahrleistungen

Fahrzeugstauzeiten hängen selbstredend auch von der Verkehrsnachfrage ab, also von der Fahrleistung. Abbildung 10 zeigt die entsprechenden Mengen für das Jahr 2013 (die Zahlen dazu finden sich in Annex A1). Demnach decken die mit dem TMC Netz erfassten FzKm die schweizweiten Fahrleistungen weitgehend ab. Ein Spezialfall sind die Lieferwagen: die aus dem NPVM abgeleiteten Lieferwagen-Km liegen deutlich über den Angaben gemäss BFS. Die Ursache mag darin liegen, dass das NPVM auf die aus den Online-Messungen abgeleiteten Angaben kalibriert ist; dort werden mutmasslich auch einzelne PW-Kategorien (z.B. PW mit Anhängern) den Lieferwagen zugewiesen. Im vorliegenden Kontext ist dies nicht weiter von Belang, da die beiden Kategorien (PW/LI) letztlich aggregiert werden¹⁵.

¹⁵ Auch die Kostensätze der beiden Kategorien sind gemäss neueren Grundlagen ähnlich (vgl. Abschnitt 2.5.1), so dass durch die Aggregation keine relevanten Verzerrungen entstehen.



Zahlen und Quellenangaben zur Abbildung finden sich in Annex A1.

2.4. Staudauer und Fahrzeugstaudunden

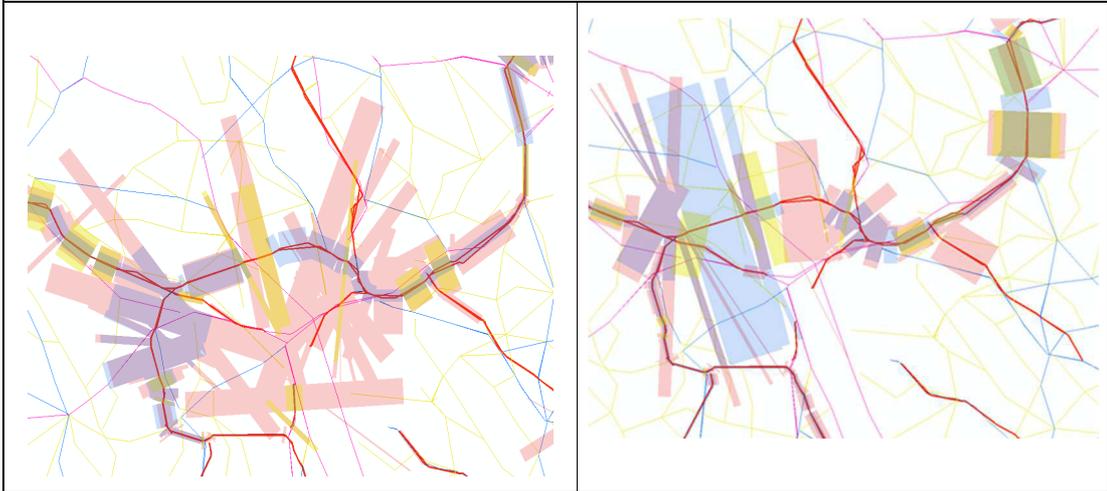
2.4.1. Staudauer 2013

Bevor auf die letztlich interessierenden Fahrzeugstaudunden eingegangen wird, wird die Staudauer gemäss verschiedenen Quellen illustriert. Die folgenden Darstellungen zeigen die Staudauern pro Jahr (2013) an verschiedenen Querschnitten und zwar auf der Basis der drei Datenquellen:

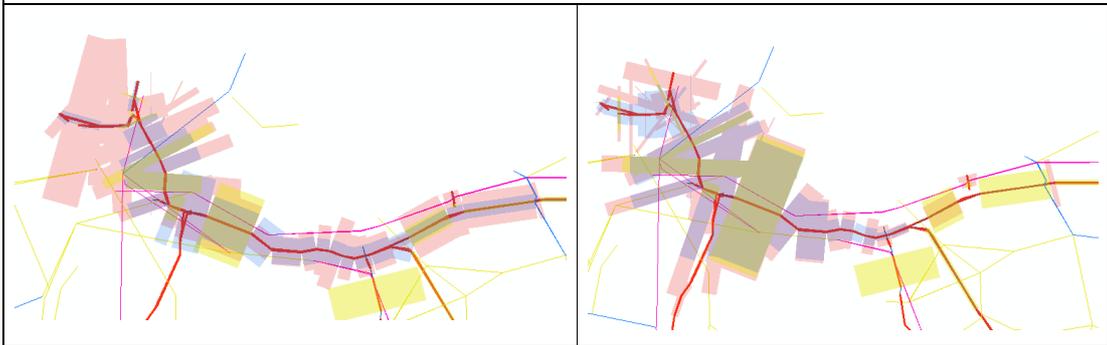
- INRIX [rot]: Darstellung falls Streckengeschwindigkeit $< 0.65 * v_{\text{freeflow}}$
- Viasuisse [blau]: Stauereignisse umgelegt auf TMC Netz
- Online [gelb]: Darstellung falls Querschnittsgeschwindigkeit < 0.6 von $v_{85} \text{ km/h}$ ¹⁶

Die Darstellungen zeigen jeweils eine Agglomeration mit Staudauern in beide Richtungen (links: „-Richtung“, rechts: „+Richtung“ gemäss TMC-Konvention). Es sind lediglich die Autobahnen dargestellt (Daten von Viasuisse und Online-Daten sind nur für Autobahnen verfügbar). Die Massstäbe sind uneinheitlich und variieren zwischen den einzelnen Agglomerationen.

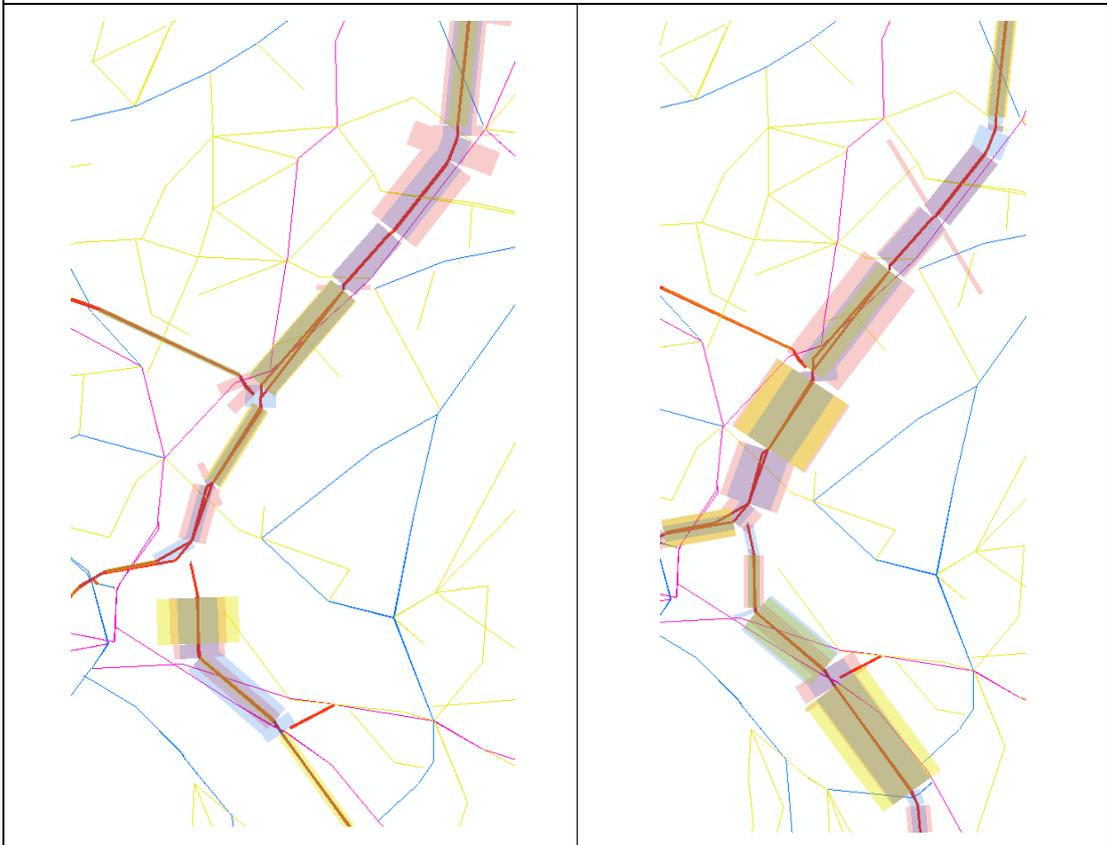
¹⁶ v_{85} bezeichnet jene Geschwindigkeit, die von 85% der unbehindert fahrenden Fahrzeuge nicht überschritten wird.

Abbildung 11: Staudauer Agglomeration Zürich (2013)

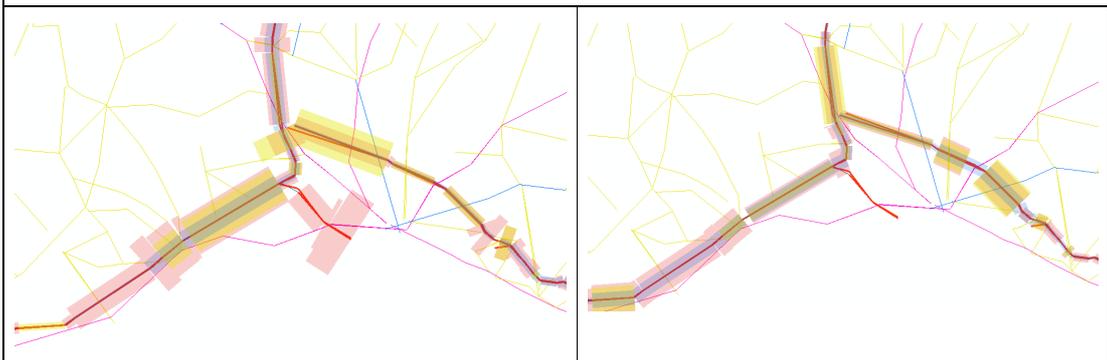
INRIX [rot], Viasuisse [blau], Online [gelb]; links: „-Richtung“, rechts: „+Richtung“ gemäss TMC-Konvention.

Abbildung 12: Staudauer Agglomeration Basel (2013)

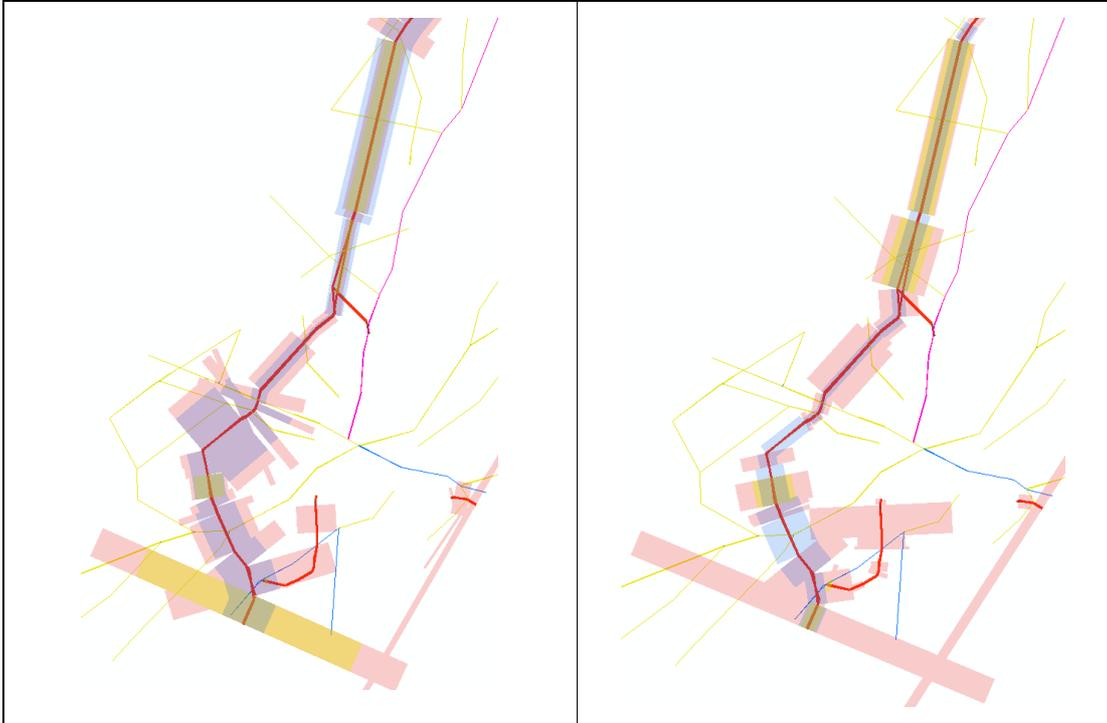
INRIX [rot], Viasuisse [blau], Online [gelb]; links: „-Richtung“, rechts: „+Richtung“ gemäss TMC-Konvention.

Abbildung 13: Staudauer Agglomeration Bern (2013)

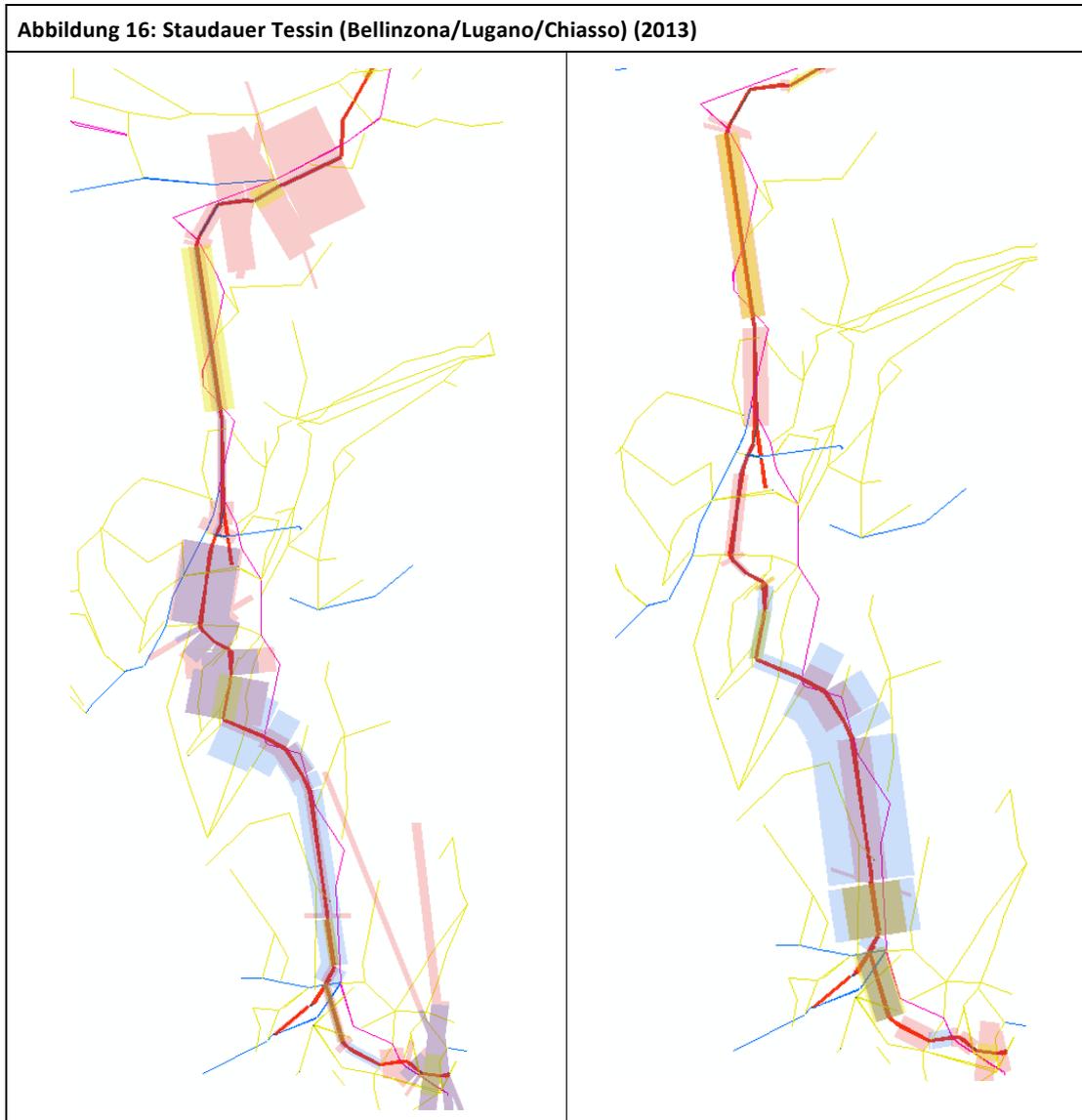
INRIX [rot], Viasuisse [blau], Online [gelb]; links: „-Richtung“, rechts: „+Richtung“ gemäss TMC-Konvention.

Abbildung 14: Staudauer Agglomeration Lausanne (2013)

INRIX [rot], Viasuisse [blau], Online [gelb]; links: „-Richtung“, rechts: „+Richtung“ gemäss TMC-Konvention.

Abbildung 15: Staudauer Agglomeration Genf (2013)

INRIX [rot], Viasuisse [blau], Online [gelb]; links: „-Richtung“, rechts: „+Richtung“ gemäss TMC-Konvention.



INRIX [rot], Viasuisse [blau], Online [gelb]; links: „-Richtung“, rechts: „+Richtung“ gemäss TMC-Konvention.

Die Darstellungen zeigen zum Teil markante Differenzen. Allerdings weist nicht eine bestimmte Datenquelle systematisch immer die grössten oder tiefsten Werte aus. Es ist auch nicht so, dass die Werte in einer bestimmten Agglomeration von einer Datenquelle homogen höher oder tiefer eingeschätzt würden. Bei den Online-Daten kommt eine gewisse Zufälligkeit dazu, ob die Zählstelle näher oder entfernter von einem Stauschwerpunkt liegt. Jedenfalls kann man nicht schliessen, dass eine der Datenquellen völlig unplausible Werte liefert, da sie für viele Abschnitte auch konsistente Angaben liefern. Hingegen muss man folgern, dass bereits die Ermittlung der Staudauer mit nennenswerten Unsicherheiten behaftet ist. Die Erwartung grosser Präzision bei den Ergebnissen zu Fahrzeugstaudauern, wo noch zusätzliche Unsicherheiten bzw.

die Notwendigkeit von weiteren Annahmen dazu kommen, muss deshalb gedämpft werden. Vielmehr ist mit Sensitivitätsrechnungen auszuloten, in welcher Grössenordnung sich die Fahrzeugstautunden bzw. Verlustzeiten bewegen.

2.4.2. Fahrzeugstautunden 2013

Wie oben erläutert werden die Fahrzeugstautunden vor allem auf der Basis der angereicherten INRIX-Daten durchgeführt. Eine erste Berechnung der Fahrzeugstautunden geht von der Annahme aus, dass alle Verkehrssituationen berücksichtigt werden, bei denen die beobachtete Streckengeschwindigkeit weniger als 65 % der Referenzgeschwindigkeit (v_{freeflow}) beträgt. Dieser Schwellenwert basiert auf Konventionen von INRIX und wird auch entsprechend auf den Internet-Seiten von INRIX so angezeigt. Nachfrageseitig wird differenziert zwischen leichten (PW, Lieferwagen) und schweren Motorwagen (Nutzfahrzeuge und Reisebusse)¹⁷. Daraus ergibt sich folgendes Ergebnis:

Tabelle 1: Fahrzeugstautunden (in Mio. FzStauStd/a), 2013, Basis-Rechnung			
	LMW	SMW	Total
AB	10.88	0.53	11.41
Nicht-AB	5.63	0.13	5.76
Total	16.50	0.66	17.16

AB: Autobahnen, Nicht-AB: übrige Strassen; LMW: Leichte Motorwagen, SMW: Schwere Motorwagen.
Ergebnisse unter Berücksichtigung aller Situationen, bei denen das Verhältnis „v-effektiv“ zu „v-freeflow“ < 0.65 beträgt.

Wie sind diese Zahlen zu interpretieren?

- Gemäss INRIX entsprechen die Geschwindigkeitsangaben nicht rein statistischen Gewichtungen, vielmehr bilden sie ab, welche Geschwindigkeit in einem Zeitpunkt erreicht werden könnte. Dies wird u.a. so begründet, dass diese Angaben für ein Routing benutzt werden, wo die bestmöglichen Routen und nicht das statistische Mittel relevant sind.
- Das wirkt sich insbesondere für die tiefen Geschwindigkeitsbereiche markant aus. Die Geschwindigkeit „null“ kommt per definitionem nie vor, obwohl es keineswegs aussergewöhn-

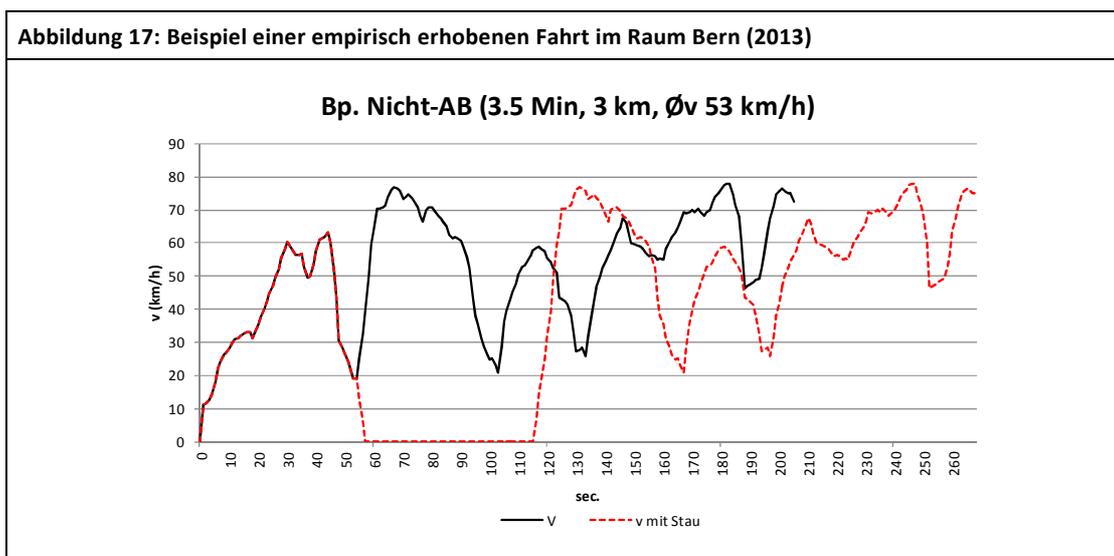
¹⁷ INRIX liefert lediglich eine Geschwindigkeitsangabe pro Streckenabschnitt, ohne zu differenzieren zwischen leichten und schweren Motorwagen. Für SMW wird in den hier dargestellten Analysen die gleiche Geschwindigkeit unterstellt, aber nach oben mit $v_{\text{max}} = 88 \text{ km/h}$ begrenzt (das gilt für v_{freeflow} wie auch für v_{effektiv}).

lich ist, dass ab und zu auf einer Strecke der Verkehr während mindestens einer Minute vollständig zum Stillstand kommt, z.B. nach Unfällen, aber auch bei vollständigem Verkehrszusammenbruch, der wenn auch punktuell durchaus zuweilen vorkommt.

- Allein der Umstand, dass mittlere Geschwindigkeiten bis 32 km/h (vgl. Abbildung 7) noch unter „Stau“ subsummiert werden, was z.B. in der einschlägigen VSS Norm mit $v < 10$ km/h assoziiert wird, ist ein Hinweis, dass diese Geschwindigkeit nicht zwingend zum Nennwert genommen werden kann.
- Die minimale Geschwindigkeit, die im INRIX-Datensatz 2013 vorkommt, beträgt 8 km/h (originär 5 miles/h), und diese Stufe kommt vergleichsweise selten vor.
- INRIX ist (gemäss Auskunft von INRIX-Mitarbeitern aus den USA) laufend daran, die Aufbereitung der Eingangsdaten, d.h. die Algorithmen und Filterungsprozesse, zu verbessern und zu optimieren. Details, wie die Original-Signale letztlich in die veröffentlichten Daten transformiert werden, werden allerdings nicht öffentlich zugänglich gemacht.
- Ab 2014 hat INRIX die minimal vorkommende Geschwindigkeit von 5 auf 2 miles/h, d.h. von 8 auf 3.2 km/h abgesenkt. Das ist eine rein methodische Änderung (ab 2014). Diese führt zwangsläufig dazu, dass die Berechnung von Fahrzeugstautunden höhere Ergebnisse liefert – bei gleichen Original-Daten.

Vor diesem Hintergrund beurteilen wir die so ermittelten Werte als klar zu tief. In Frage zu stellen sind nicht nur die Werte für die Autobahnen, sondern insbesondere jene für den Nicht-Autobahn-Bereich. Die v -Werte sind Mittelwerte je Streckenabschnitt. Diese hängen vom Feinheitsgrad der Netzkodierung ab. Wie wirkt sich ein Stauereignis auf das Verhältnis von „ v -effektiv“ zu „ v -freeflow“ aus, wenn man das Netz unterschiedlich kodiert?

Abbildung 17 zeigt das Fahrprofil einer empirisch erhobenen Fahrt im Raum Bern von 3 km Länge und einer mittleren Streckengeschwindigkeit von 53 km/h. Würde diese Fahrt um 1 Minute verzögert (rote Kurve in Abbildung 17, entsprechend der Stau-Definition gemäss VSS-Norm SN 671 921, vgl. 2.1), so ergäbe sich daraus eine Absenkung der mittleren Streckengeschwindigkeit von 53 auf 40 km/h. Das Verhältnis „v-effektiv“ zu „v-freeflow“ läge demnach bei 0.76¹⁸. Wäre die Strecke mit 2 km (statt 3 km) kodiert, würde die Geschwindigkeit von 48 auf 34 km/h absinken, was einem Verhältnis „v-effektiv“ zu „v-freeflow“ von 0.70 entspräche. Mit der in der Basis-Rechnung unterstellten Annahme (von <0.65) würde demnach diese Stau-Situation vollständig ausser Acht gelassen, weil sie sich im Mittelwert nicht genügend niederschlägt. Dieser Streckenabschnitt müsste mit einer Länge von rund 1.5 km kodiert sein, damit das Staukriterium überhaupt anspricht und die entsprechende Verkehrssituation als staurelevant erkannt würde. Je länger die einzelnen Abschnitte kodiert sind, desto eher „verschwindet“ eine Stausituation durch die Mittelwertbildung über den ganzen Streckenabschnitt.



Schwarze Kurve: Fahrprofil einer empirisch erhobenen Fahrt im Raum Bern von 3 km Länge und mit einer mittleren Streckengeschwindigkeit von 53 km/h (Quelle: Fahrverhaltensuntersuchung im Auftrag BAFU [INFRAS 2015]).

Rote Kurve: gleiches Fahrprofil, aber verzögert um eine (hypothetische) Stausituation von einer Minute mit $v = 0$ km/h. Das bewirkt eine Absenkung von \bar{v} von 53 km/h auf 40 km/h. Das entspricht einem Verhältnis von „v-effektiv“ zu „v-freeflow“ von 0.76.

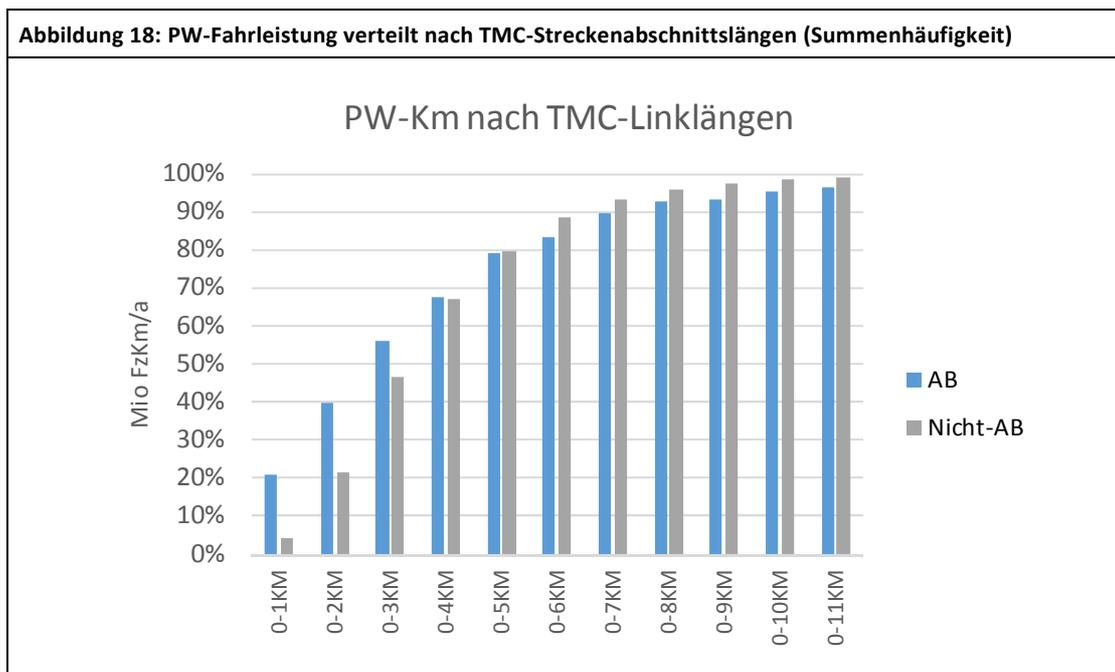
¹⁸ Erläuterung der Zahlenbeispiele:

3 km	Referenz	Sit.mit Stau
Zeit (sec)	205	268
Dist (m)	3'003	2'999
v (km/h)	52.7	40.3
v eff/v freeflow		0.76

2 km	Referenz	Sit.mit Stau
Zeit (sec)	149	212
Dist (m)	1'997	1'996
v (km/h)	48.2	33.9
v eff/v freeflow		0.70

1.5 km	Referenz	Sit.mit Stau
Zeit (sec)	115	178
Dist (m)	1'532	1'533
v (km/h)	48.0	31.0
v eff/v freeflow		0.65

Abbildung 18 zeigt die Verteilung der Fahrleistung nach Netzabschnitt-Längenklassen im angereicherten INRIX-Datensatz 2013. Rund 45% der Fahrleistung auf Autobahnen erfolgen auf Abschnitten von >3km Linklänge. Bei den Nicht-AB erfolgen 55% der Fahrleistung auf Abschnitten von >3 Km Linklänge und rund 85% bis 90% auf Abschnitten von >1.5 Km Linklänge. Die Wahrscheinlichkeit, dass das oben skizzierte Beispiel als staurelevant erkannt würde, ist demnach sehr gering. Das bedeutet generell, dass – unabhängig von der Art, wie die „v-effektiv“ im INRIX-Datensatz definiert sind – allein aufgrund der Netzdefinition bei einer Annahme eines Schwellenwertes von 0.65 eine Vielzahl von Stausituationen gar nicht erst in die Berechnung aufgenommen werden. Bemerkenswert ist deshalb der Umstand, dass INRIX ab 2014 die Auflösung des Bezugsnetzes deutlich verfeinert (zum sog. INRIX-XD), wodurch die Erfassung von Geschwindigkeitsabsenkungen zwangsläufig besser erfasst wird.



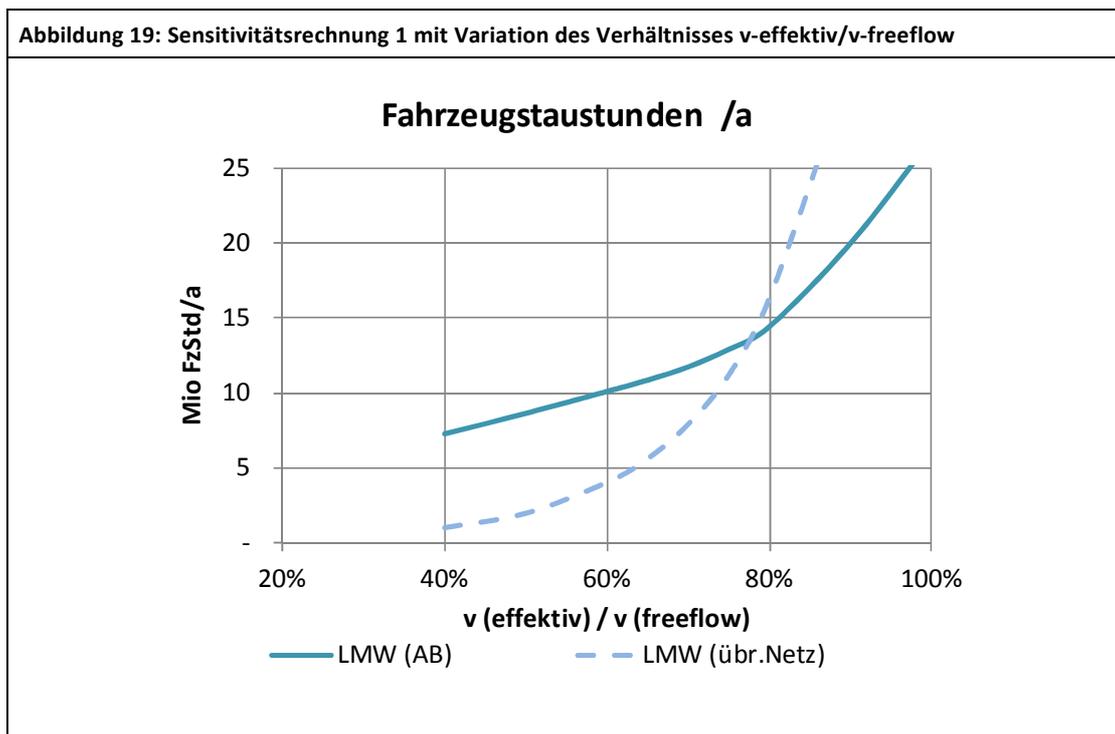
Sensitivitätsberechnungen zu den Fahrzeugstautunden

Vor diesem Hintergrund drängt es sich auf, Sensitivitätsberechnungen durchzuführen, um diese Verzerrungen zu korrigieren. **Drei Sensitivitätsrechnungen (S1-S3)** mit unterschiedlichen Ansatzpunkten wurden dazu durchgeführt:

- **S1:** Anheben der Schwellenwerte (an Stelle von 0.65).
- **S2:** Absenken der für die vorliegende Fragestellung als zu hoch beurteilten „v-effektiv“ um 5 km/h

- **S3:** Ersatz von „v-effektiv“ durch fixe Werte in Anlehnung an die VSS-Norm SN 671 921¹⁹:
 - Falls Verhältnis „v-eff.“ zu „v-freeflow“ < 0.2 -> $v = 5$ km/h („V‘zusammenbruch“)
 - Falls Verhältnis „v-eff.“ zu „v-freeflow“ > 0.2 und < 0.35 -> $v = 10$ km/h („stop+go“)
 - Falls Verhältnis „v-eff.“ zu „v-freeflow“ > 0.35 und < 0.65 -> $v = 30$ km/h (stockender Kolonnenverkehr)

Abbildung 19 zeigt die Ergebnisse von **Sensitivitätsrechnung 1**: hier zeigt sich, dass eine Veränderung des Schwellenwertes vor allem im Nicht-Autobahnbereich sensitiv ist. Erhöht man den Wert von 0.65 auf 0.75, was – wie das oben erläuterte Beispiel zeigt – durchaus gerechtfertigt erscheint, so verdoppeln sich die Verlustzeiten von 5.6 auf 11.2 Mio. Stunden, eine Anhebung auf 0.8 hat eine Verdreifung zur Folge (vgl. Annex A2).



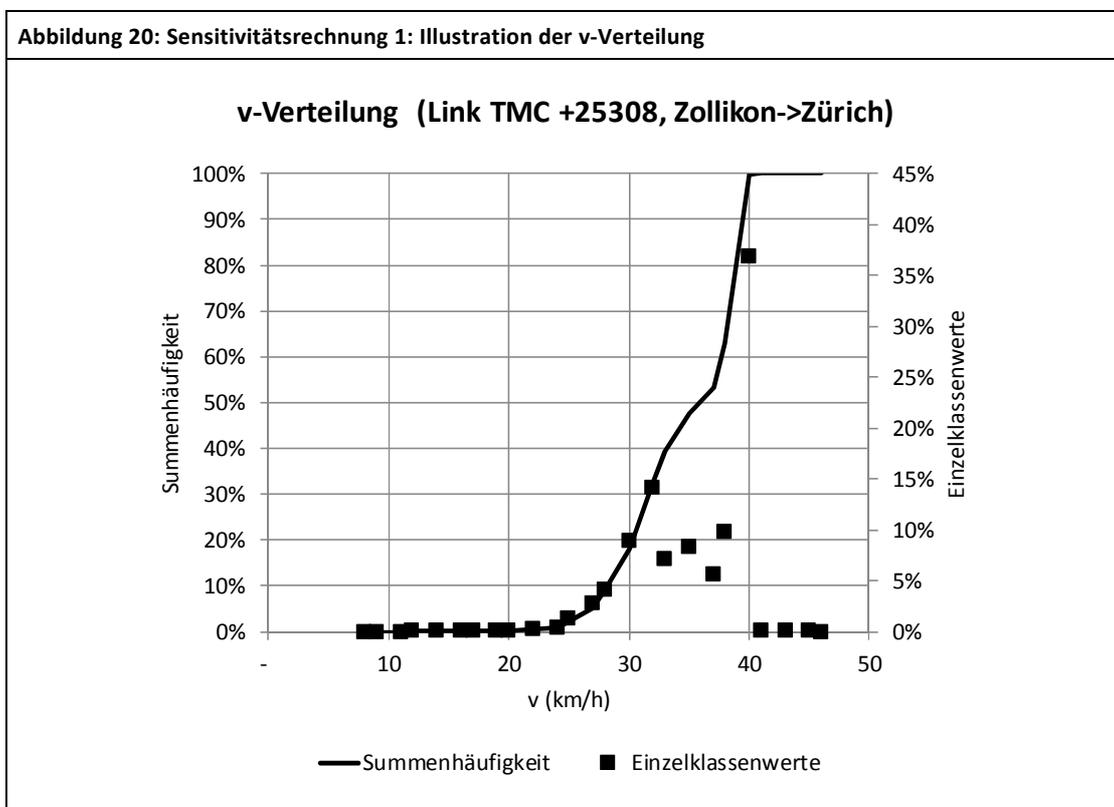
Zahlen dazu finden sich in Annex A2. xlsx

Dass ein Anheben des Schwellenwertes gerechtfertigt ist, kann man auch an einem konkreten Beispiel einer Einfallsachse (Rechtes Ufer Zürich, Zollikon Richtung Zürich, TMC-Link „+25308“, 7.5 km; vgl. Abbildung 20) illustrieren. Die Grafik zeigt die Verteilung der Geschwindigkeitsklassen²⁰ gemäss INRIX-Angaben. Der v-freeflow beträgt 40.2 km/h. Diese v-Klasse kommt mit 37%

¹⁹ Falls v-effektiv tiefer liegt als diese Werte, wird v-effektiv eingesetzt.

²⁰ Ungewichtet, ohne Gewichtung mit der Nachfrage

vor. Gemäss der Konvention, wonach Situationen mit Geschwindigkeiten $< 0.65 \cdot v\text{-freeflow}$ als staurelevant gelten, sind im vorliegenden Beispiel Situationen mit $v < 26.1 \text{ km/h}$ zu berücksichtigen; konkret sind das total 1.4% der Zeitanteile. Beim entsprechenden Grenzwert von $v=25 \text{ km/h}$ ²¹ generiert das im vorliegenden Fall eine Zeitverzögerung von 7 Minuten (nämlich eine Durchfahrtszeit von 18 statt 11 Minuten). Nun kann man sich sehr wohl vorstellen, dass auch Situationen mit höherer mittlerer Geschwindigkeit als staurelevant zu betrachten sind, namentlich wenn man ein feiner kodierte Netz zugrunde legt.



Zahlen dazu finden sich in Annex A2.

Tabelle 2 zeigt eine Reihe von Variationsmöglichkeiten für verschiedene v-Klassen. Beispiel v-Klasse von 30 km/h: diese v-Klasse generiert eine Verlustzeit von 4 Minuten (15 statt 11 Minuten Durchfahrtszeit). Würde man den Streckenabschnitt in zwei Teilstrecken kodieren (z.B. 2.5 km und 5 km), so könnte die mittlere Geschwindigkeit auf der ersten Teilstrecken z.B. bei 20 km/h liegen und jene auf der zweiten Teilstrecke bei v-freeflow. Die erste Teilstrecke wäre somit staurelevant (Verhältnis $20 \text{ km/h} / 40.2 \text{ km/h} = \text{ca. } 0.5$, also deutlich unter 0.65), die zweite selbstredend nicht. Man kann sich auch andere Teilstreckenverhältnisse vorstellen (vgl. Splits

²¹ Dieser beträgt 25 km/h; $v=26 \text{ km/h}$ kommt im INRIX-Datensatz nicht vor.

von 0.84 km / 7.68 km oder 4.2 km / 3.32 km): alle diese Splits wären mit der gleichen Verlustzeit von 4 Minuten belastet und würden als staurelevant gelten. Diese Situationen würden auch den Definitionen gemäss VSS-Norm SN 671 921 entsprechen, sind doch damit Fahrten von 5 bis 10 Minuten mit Geschwindigkeiten unter 30 km/h verbunden. Vor diesem Hintergrund ist ein Anheben des Schwellenwertes bis 0.75 gerechtfertigt.

Varianten				Teilstrecke 1				Teilstrecke 2				Gesamtstrecke		
	km total	Häufigkeit (h)	Häufigkeit (%)	km	v (km/h)	t (min)	Staufaktor	km	v (km/h)	t (min)	Staufaktor	t (min)	v (km/h)	Staufaktor
Freeflow	7.52	3'228	36.9%	7.52	40.2	11.2				-		11.2	40	1.00
v-Klasse 24	7.52	36	0.4%	7.52	24.0	18.8		0	24.0	-		18.8	24	0.60
v-Klasse 25	7.52	118	1.4%	7.52	25.0	18.0		0	25.0	-		18.0	25	0.62
v-Klasse 27	7.52	247	2.8%	7.52	27.0	16.7		0	27.0	-		16.7	27	0.67
v-Klasse 28	7.52	362	4.1%	7.52	28.0	16.1		0	28.0	-		16.1	28	0.70
v-Klasse 30	7.52	783	8.9%	7.52	30.0	15.0		0	30.0	-		15.0	30	0.75
Variationen zu v-Klasse 27	7.52	247	2.8%	1.22	10	7.3	0.25	6.30	40	9.4	1.00	16.7	27	0.67
	7.52	247	2.8%	3.65	20	11.0	0.50	3.87	40	5.8	1.00	16.7	27	0.67
	7.52	247	2.8%	6.04	25	14.5	0.62	1.48	40	2.2	1.00	16.7	27	0.67
Variationen zu v-Klasse 28	7.52	362	4.1%	1.08	10	6.5	0.25	6.44	40	9.6	1.00	16.1	28	0.70
	7.52	362	4.1%	3.25	20	9.8	0.50	4.27	40	6.4	1.00	16.1	28	0.70
	7.52	362	4.1%	5.40	25	13.0	0.62	2.12	40	3.2	1.00	16.1	28	0.70
Variationen zu v-Klasse 30	7.52	783	8.9%	0.84	10	5.0	0.25	6.68	40	10.0	1.00	15.0	30	0.75
	7.52	783	8.9%	2.51	20	7.5	0.50	5.01	40	7.5	1.00	15.0	30	0.75
	7.52	783	8.9%	4.20	25	10.1	0.62	3.32	40	5.0	1.00	15.0	30	0.75

Die Ergebnisse der **Sensitivitätsrechnungen 2 und 3** sind in Tabelle 3 dargestellt. Bemerkenswert ist, dass die Verwendung von „Geschwindigkeiten“ für Stausituationen, die dem Erfahrungswissen entsprechen und auch im Einklang mit der VSS-Norm SN 671 921 sind, namentlich auf der Autobahnen zu markant höheren Verlustzeiten führt (Sensitivitätsrechnung 3: 28.2 statt 11.4 Mio. FzStauStd./a). Dass die Werte auf Nicht-Autobahnen dabei nur beschränkt erhöht werden, ist auf den Umstand zurückzuführen, dass diese Berechnung mit einem Verhältniswert „v-effektiv“ zu „v-freeflow“ von 0.65 gerechnet wurde, was dazu führt dass viele Stausituationen gar nicht erkannt werden, also auch durch diese Sensitivitätsrechnungen nicht verändert werden. Die Sensitivitätsrechnung 2 geht auf den Autobahnen in die gleiche Richtung wie Sensitivitätsrechnung 3, ist aber vom Effekt her deutlich moderater, weil das Geschwindigkeitsspektrum im Wesentlichen belassen wird, aber als gesamtes leicht abgesenkt wird. Die Begründung liegt vor allem in der Beschaffenheit der Grundlagen, nämlich dass hier weniger statistische Angaben angegeben werden als vielmehr potenziell fahrbare Geschwindigkeiten, die im Kontext der Verkehrsinformation durchaus sinnhaft sind.

Tabelle 3: Fahrzeugstauzeiten (in Mio. FzStauStd/a), 2013, Sensitivitäten 2 und 3

Sens. 2	LMW	SMW	Total
AB	15.67	0.82	16.49
Nicht-AB	8.62	0.21	8.83
Total	24.28	1.03	25.32

Sens. 3	LMW	SMW	Total
AB	26.63	1.62	28.25
Nicht-AB	6.05	0.21	6.26
Total	32.68	1.83	34.51

Sensitivität 2 unterstellt eine Absenkung der „v-effektiv“ um 5 km/h.

Sensitivität 3 unterstellt fixe Werte für Stausituationen (10 km/h) bzw. „stockender Kolonnenverkehr“ (30 km/h)

Folgerung

Unter Berücksichtigung des „At least“-Ansatzes, wonach bei Unsicherheiten vorsichtige Annahmen getroffen werden sollen, die eher zu einer Unter- als einer Überschätzung der tatsächlichen Kosten führen, verwenden wir in der Folge für die Autobahnen die Werte aus der Sensitivität 2. Diese Annahme ist moderat, sie berücksichtigt nur Verkehrssituationen, die auch INRIX als für Verlustzeiten relevant bezeichnet (<0.65), und korrigiert die Unterschätzung von v-effektiv in zurückhaltender Form, da die zugrunde liegenden Geschwindigkeitsangaben primär Potenzialgeschwindigkeiten sind. Für die Nicht-Autobahnen rührt eine grundsätzliche Unterschätzung von der Netzkodierung und von Autobahn-orientierten Schwellenwerten her, wodurch ein signifikanter Anteil der Zeitverluste gar nicht erkannt wird. Deshalb verwenden wir dort einen höheren Schwellenwert (0.75), belassen aber die (hohen) Geschwindigkeitsangaben, um auch hier dem „At least“-Ansatz Rechnung zu tragen. Tabelle 4 zeigt diese Werte nochmals in der Übersicht.

Tabelle 4: Fahrzeugstauzeiten (in Mio./a) als Basis für die Berechnung der Stauzeitkosten 2013

	LMW	SMW	Total
AB	15.67	0.82	16.49
Nicht-AB	11.23	0.22	11.45
Total	26.90	1.04	27.93

Mit Blick auf die weiteren Analysen, d.h. die Abschätzung der vom Schwerverkehr verursachten Staukosten (vgl. Abschnitt 2.6), interessiert auch der Anteil der Stauzeiten, welche an Werkta-

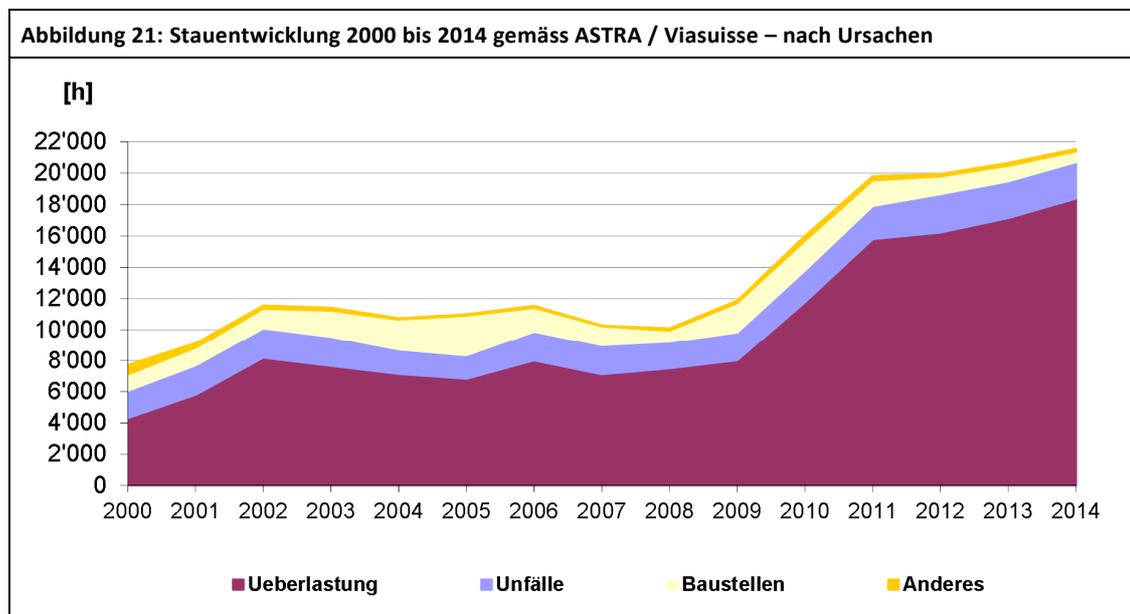
gen anfallen. Dies interessiert in erster Linie für den Nicht-Schwerverkehr, da der Schwerverkehr grossmehrheitlich an Werktagen stattfindet. Für die Ermittlung der vom Schwerverkehr verursachten Staukosten werden deshalb auch lediglich die werktäglichen Stauzeiten des Nicht-Schwerverkehrs in Betracht gezogen. Da die Datengrundlagen tagesfein vorliegen, lassen sich die entsprechenden Angaben nach Tagestypen differenziert auswerten. Demnach machen die Stauzeiten an Werktagen auf Autobahnen 79.3% aus, jene auf Nicht-Autobahnen 84.6%; gewichtet sind dies 81.5%.

2.4.3. Entwicklung von Staudauer und Fahrzeugstautunden

Auftragsgemäss sollen die Stauzeiten nicht nur für ein einzelnes Jahr ausgewiesen werden, sondern für eine ganze Zeitreihe. Weil die letzte Studie v.a. auf das Jahr 2009 fokussierte, werden im Folgenden Kenngrössen für die Zeitreihe 2009-2014 aufgezeigt. Dabei wird vorerst auf die Staudauer eingegangen und erst anschliessend auf die letztlich interessierenden Fahrzeugstautunden.

Entwicklung der Staudauer 2009-2014

Der Verkehrsflussbericht des ASTRA (ASTRA 2015) weist für die Entwicklung der Staudauer folgende Auswertung der Staustatistik aus.

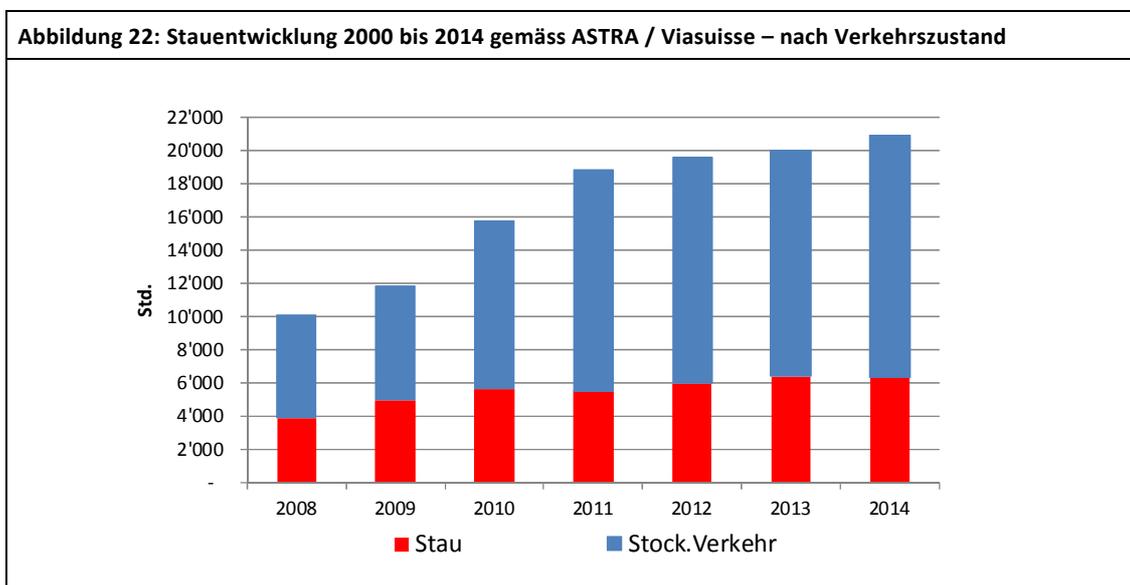


Quelle: ASTRA 2015, S. 19

Bemerkenswert ist der Umstand, dass die Staudauer sich bis etwa 2008 im Bereich um 10'000 Stunden bewegte, dann bis 2011 sich verdoppelt hat und seither sich nur noch leicht erhöht

hat. Diese Entwicklung ist zumindest erstaunlich und scheint kaum die Realität richtig wiederzugeben, vielmehr dürfte ein Teil davon auf vermehrte Erhebungsanstrengungen namentlich im Zeitraum 2008-2011 zurückzuführen sein (u.a. im Kontext der Inbetriebnahme des Uetlibergtunnels und der Eröffnung der Westumfahrung / A4 im Raum Zürich im Jahr 2009).

Die gleiche Statistik erlaubt auch eine Auswertung mit einer Differenzierung nach „Stau“ bzw. „Stockendem Kolonnenverkehr“. Interessanterweise fällt die Zunahme dabei vor allem auf die Kategorie „Stockender Kolonnenverkehr“.



Eigene Auswertung der Staustatistik (von ASTRA zur Verfügung gestellt).

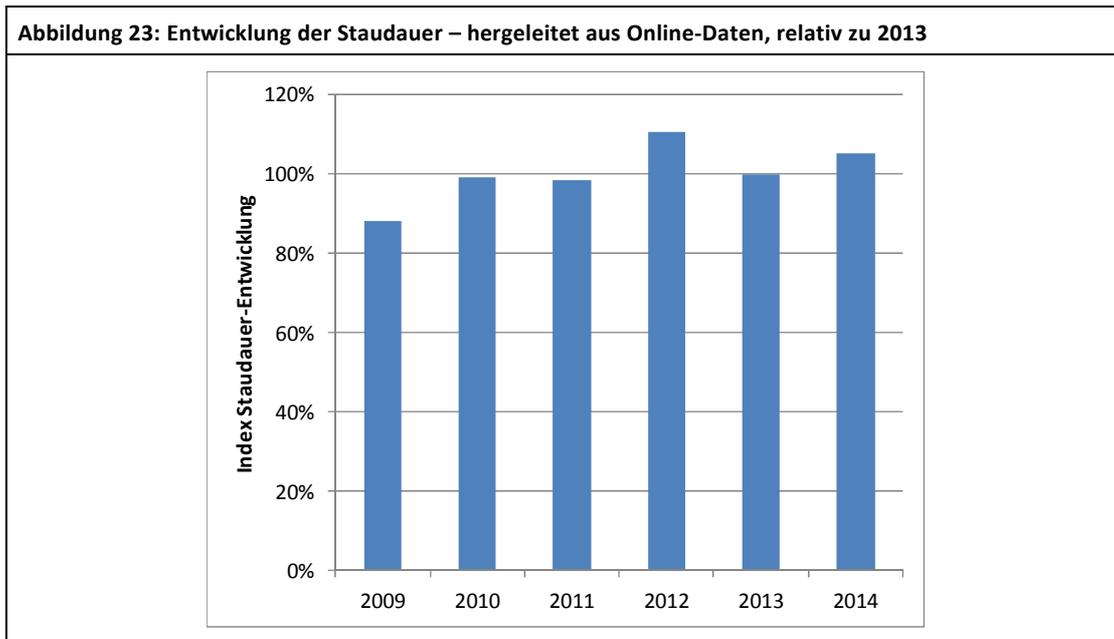
Herleitung der Staudauer aus Online-Daten

Es gibt keine andere Datenquelle, welche vergleichbare Angaben zur Dauer macht. Aus den Online-Daten kann man jedoch versuchen, die relative Entwicklung nachzuvollziehen, und zwar mit folgenden Berechnungsschritten: Pro Zählstelle und Jahr wird die Staudauer ermittelt²². Dabei werden alle Verkehrssituationen mit $v\text{-effektiv} < 0.6 v\text{-freeflow}$ als „Stau“ interpretiert. Als „v-freeflow“ wurde $v\text{-85}$ verwendet²³, als „v-effektiv“ die Angaben gemäss Online-Daten-

²² Diese Werte sind mit den Angaben aus der Staustatistik nicht vergleichbar, weil es sich um eine Angabe pro Querschnitt handelt, und nicht pro Ereignis. Falls 2 Querschnitte nahe nebeneinander liegen, sollte das Ereignis in der Staustatistik nur 1x auftreten, hier tritt es 2x auf. In der relativen zeitlichen Betrachtung ist der Vergleich aber zulässig.

²³ $v\text{-85}$ bezeichnet jene Geschwindigkeit, die von 85% der unbehindert fahrenden Fahrzeuge nicht überschritten wird. Dazu wurden die Online-Daten verwendet. Zu den „unbehindert“ fahrenden Fahrzeugen wurden alle Fahrzeuge gezählt, die ein v grösser als 85% des Mittelwerts aller Fahrzeuge aufwiesen.

satz. Diese Werte werden pro Jahr aufsummiert und in Relation gesetzt zur Gesamtzahl der gemessenen Fahrzeuge. Dieser Indikator wird dann mit der Fahrleistungsentwicklung gewichtet. Abbildung 23 zeigt das Ergebnis, die Zahlen zur Herleitung finden sich in Annex A3.



Zahlenwerte finden sich in Annex A3.

Die Abbildung zeigt, dass die Entwicklung sich nur teilweise mit der aus der Staustatistik ableitbaren Zahlen deckt. Am ehesten deckt sich die Entwicklung im Zeitraum 2009/2010. Der Sprung 2010/11 hingegen kann nicht nachvollzogen werden. Auch die Entwicklung 2011-2014 ist nicht völlig kongruent. Wie weit dies auf allfällige Unsicherheiten in der Staustatistik oder Mängel oder Fehlinterpretationen des Online-Datensatzes²⁴ zurückzuführen ist, muss an dieser Stelle offen gelassen werden.

Entwicklung der Fahrzeugstautunden 2009-2014

Für die Abschätzung der Entwicklung der Fahrzeugstautunden als Basis für die Staukostenermittlung wird (zwangsläufig) auf die Online-Daten zurückgegriffen, denn nur diese erlauben eine über die Jahre vergleichbare Berechnung. Dazu wurden folgende Berechnungen durchgeführt:

²⁴ Fehlinterpretationen sind z.B. bei Vorliegen von grösseren Baustellen möglich, welche den Verkehrsfluss beeinflussen; eine entsprechende Dokumentation lag mit den Online-Daten allerdings nicht vor.

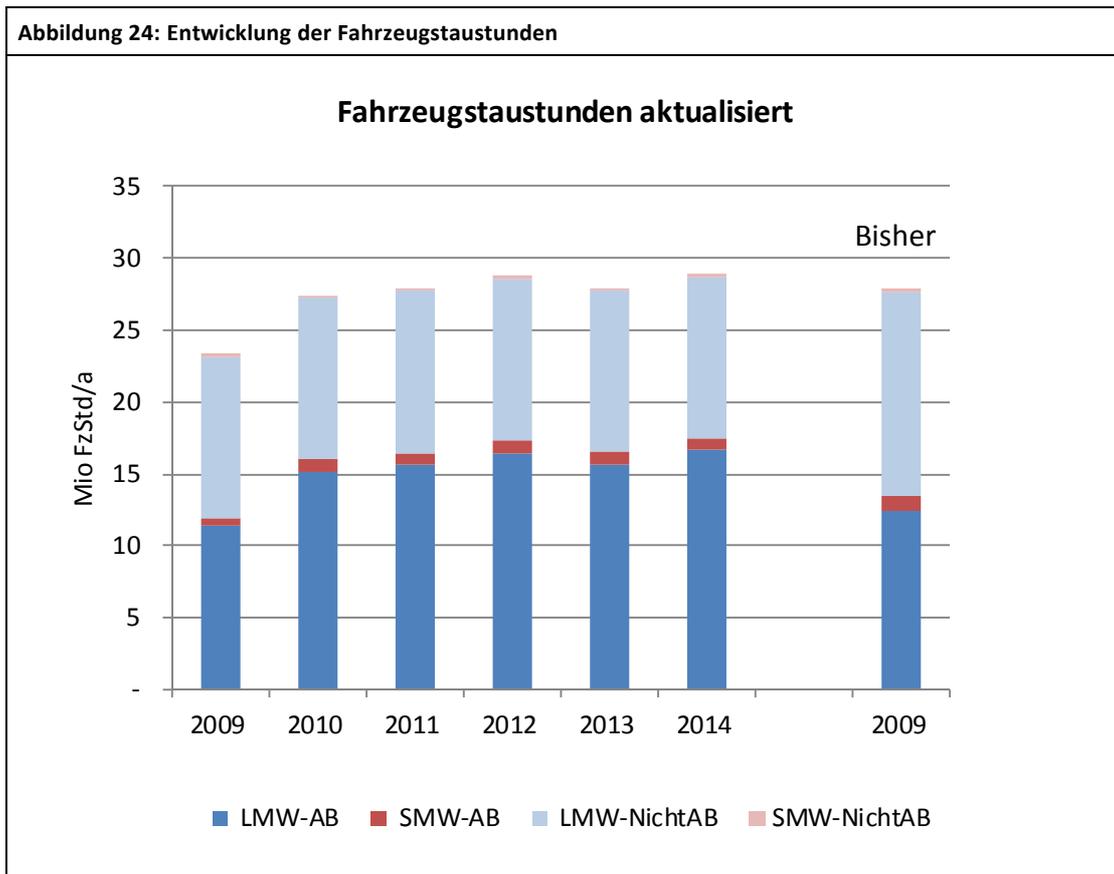
- Die Berechnung der Fahrzeugstautunden erfolgt grundsätzlich analog zu jenen mit dem INRIX-Datensatz für 2013, dies je Zählstelle und Jahr (soweit plausible Daten zur Verfügung standen).
- Als „v-freeflow“ wurde v-85 verwendet (analog zur Herleitung der Entwicklung der Staudauer)
- Als „v-effektiv“ wurde die Angabe gemäss Online-Datensatz verwendet – im Bewusstsein, dass dies tendenziell eine Überschätzung ist, weil auch im Online-Datensatz prinzipiell keine Fahrzeuge mit v „null“ vorkommen (können), da nur Fahrzeuge in Bewegung gemessen werden können.
- Als Schwellenwert für zu berücksichtigende Fahrzeuge wurde ein Wert von v-effektiv < 0.6 v-freeflow eingesetzt.
- Die Nachfrage (PW/Lieferwagen bzw. SMW) konnte den Online-Datensätzen entnommen werden.

Für die Herleitung der zeitlichen Entwicklung wurde ähnlich vorgegangen wie bei der Analyse der Staudauer-Entwicklung: Pro Jahr wurde ein summierter Indikator „spezifische Fahrzeugstautunden / a“ ermittelt, je für LWM und SMW. Gleichzeitig wurde das Total der gemessenen Fahrzeuge ermittelt und daraus ein Index „spezifische Fahrzeugstautunden / a“ pro Fahrzeug gesetzt. Um auf den relevanten Jahreswert zu kommen wurde dieser Indikator mit der Fahrleistungsentwicklung multipliziert um dem Verkehrswachstum Rechnung zu tragen; der Wert 2013 ist dabei der Index 100. Gleichzeitig wurde, um auf die Fahrzeugstautunden pro Jahr zu kommen, der Wert für 2013 aus den Berechnungen aus Abschnitt 2.4.2 übernommen und auf 100% gesetzt. So konnten die übrigen Werte Jahreswerte abgeleitet werden. Die jahresspezifischen Zahlen zu dieser Herleitung finden sich in Annex A3.

Diese Herleitung konnte allerdings nur für die Autobahnen durchgeführt werden, da Online-Daten (fast) nur für das Hochleistungsstrassennetz verfügbar sind. Für die Nicht-Autobahnen wird vereinfachend unterstellt, dass die Werte sich im Zeitraum 2009 bis 2014 nicht grundlegend verändert haben. Das Verkehrswachstum namentlich auf Einfallsachsen in die Städte, welche grösseres Staupotenzial aufweisen, dürfte deutlich geringer sein als jenes auf den Autobahnen, so dass diese Annahme zwar eine Notlösung ist, aber mangels Alternativen gerechtfertigt scheint.

Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse, die zugehörigen Zahlen finden sich in Annex A4. Die Grafik zeigt auch die bisher verwendeten Zahlen laut der Studie 2012. Der Vergleich zeigt für das Bezugsjahr 2009 für die Autobahnen eine vergleichbare Grössenordnung (-8% gegenüber den bisher verwendeten Werten), für die Nicht-Autobahnen (Nicht-AB) aber einen um 20% tieferen Wert. Die Fahrzeugstautunden der schweren Motorwagen (SMW) werden neu deutlich tiefer eingeschätzt (rund 50%), ihr Anteil ist allerdings eine Grössenordnung kleiner im Vergleich zu

den Leichten Motorwagen (LMW). Die Werte 2014 liegen neu in der Grössenordnung des damaligen Wertes für 2009, dies ist der neu tieferen Einschätzung der Verlustzeiten im Nicht-AB-Bereich geschuldet, die als konstant angenommen werden. Betrachtet man allein die Autobahnen (AB), wird eine Zunahme gegenüber 2009 um rund 45 Prozent ausgewiesen. Das ist – etwa im Vergleich zur Staudauerzunahme gemäss Viasuisse (+75%) – deutlich moderater.



Zahlenwerte finden sich in Annex A4.

2.5. Stauzeitkosten

Die Stauzeitkosten ergeben sich rechnerisch unmittelbar aus der Multiplikation von Fahrzeugstautunden mit Kostensätzen. Ebenso bedeutsam wie die Stauzeitenberechnung ist deshalb, welche Kostensätze den Stauberechnungen zugrunde gelegt werden.

2.5.1. Kostensätze

In der Studie 2012 wurden bewusst die gleichen Kostensätze verwendet wie in der Vorgängerstudie 2007, da es im Wesentlichen um einem methodischen „Sichtwechsel“ ging – von der

Verkehrsträger-Optik zur Sichtweise Verkehrsart. Damals wurde für die PW mit 28.2 CHF/h und für Lieferwagen und Lastwagen mit 116 CHF/h gearbeitet (vgl. Studie 2012, Tab. 4), ohne Berücksichtigung der Teuerung. Allerdings wurde letztlich mit nur zwei aggregierten Kostensätzen operiert, nämlich jenen für Leichte Motorwagen (LMW=PW+Lieferwagen) und Schwere Motorwagen (SMW; Lastwagen/Reisebusse). Dazu mussten PW und Lieferwagen gewichtet werden. Dabei wurde für die Ermittlung der Gesamt-Staukosten auf Autobahnen die gleiche anteilmässige Gewichtung von PW bzw. Lieferwagen wie in der 2007er Studie genommen (95.1% PW, 4.9% Lieferwagen), woraus sich ein gewichteter Wert für die LMW von 32.5 CHF/h ergab. Für die übrigen Strassen wurde – ebenfalls wie in der Studie 2007 – ein Lieferwagen-Anteil von 1.75% verwendet, was einen LMW-Kostensatz von 29.8 CHF/h ergab.

Inzwischen liegen mit den VSS Normen aus dem Kontext der Kosten-Nutzen-Analyse im Strassenverkehr²⁵ neuere Grundlagen zu dieser Thematik vor. Es wurde vereinbart, aus Konsistenzgründen mit laufenden Projektevaluationen den Stauzeitkostenberechnungen diese neuen Kostensätze zu unterlegen (vgl. Tabelle 5). Deren Herleitung ist in Annex 5 erläutert. Demnach nehmen die Kostensätze für LMW gegenüber den früheren Annahmen deutlich zu (ca. 25%), wobei ein Teil der Zunahme auf Teuerungs- bzw. Lohnentwicklungseffekte zurückzuführen ist. Die SMW-Kostensätze sind demgegenüber neu deutlich tiefer (um ca. 30%). Zudem sind PW- und Lieferwagen-Kostensätze neu sehr ähnlich und deshalb nicht mehr sensitiv auf den Anteil von Lieferwagen bzw. PW an den LMW, um einen gewichteten Wert für LMW (=PW+LI) zu ermitteln. Darum ist auch eine Differenzierung nach AB/Nicht-AB nicht mehr notwendig, vielmehr werden immer die gleichen gewichteten Ansätze unterstellt.

²⁵ SN 641 822a (2009): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Zeitkosten im Personenverkehr.
SN 641 823 (2007): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Zeitkosten im Güterverkehr.
SN 641 827 (2009): Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr – Betriebskosten von Strassenfahrzeugen.

Tabelle 5: Bisher verwendete und neu auf Basis der VSS-Normen SN 641 822a, SN 641 823 und SN 641 827 aktualisierte Kostensätze

Bisherige Kostensätze:			
	CHF/h	AB Anteil	Nicht-AB Anteil
PW	28.2	95.1%	98.25%
LI	116.0	4.9%	1.75%
LMW (Gewichtet)		32.6	29.8
SMW		116.0	116.0

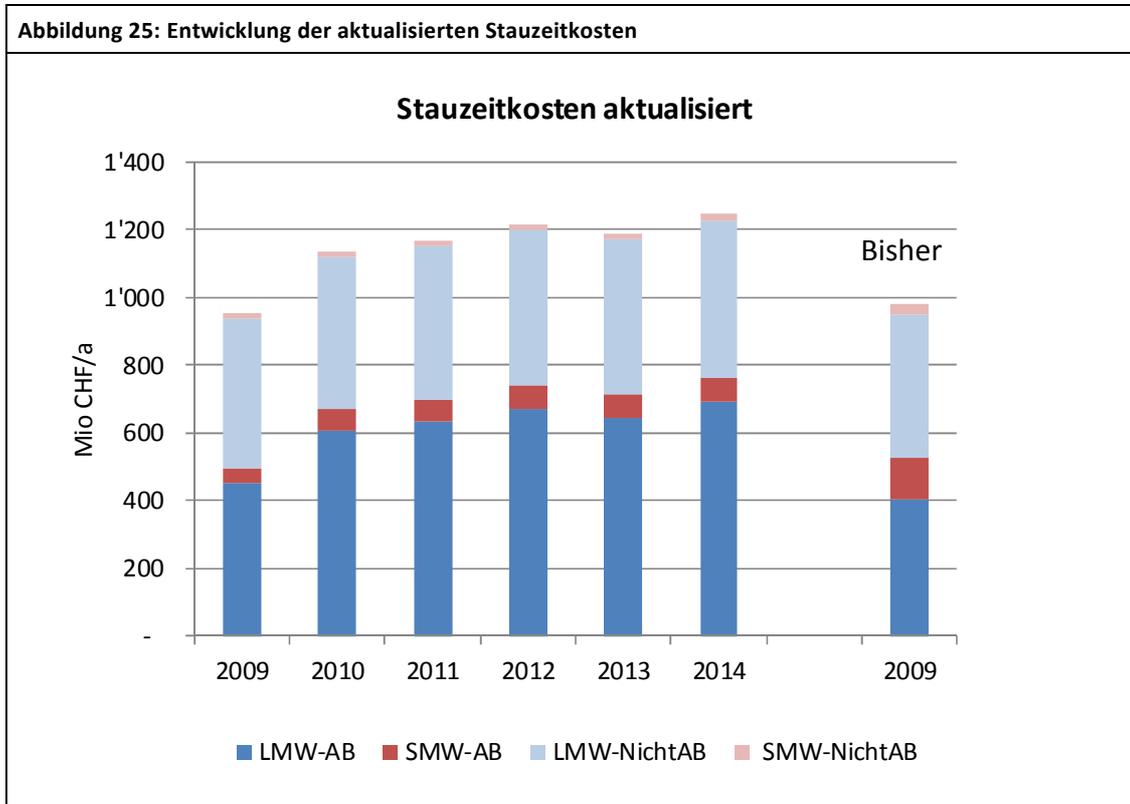
Aktualisierte Kostensätze:						
Kostensätze in CHF/Std.	2009	2010	2011	2012	2013	2014
PW	39.7	40.2	40.6	41.0	41.4	41.7
LI	37.4	37.8	38.1	38.4	38.7	39.0
LMW (Fzkm-gewichtet)	39.6	40.1	40.5	40.9	41.2	41.6
SNF	64.9	65.4	65.9	66.2	66.5	66.8
Car/Reisebus	313.5	316.0	318.8	321.3	323.4	325.5
SMW (Fzkm-gewichtet)	77.6	78.1	78.9	79.6	80.0	80.8

Die Herleitung der aktualisierten Kostensätze findet sich in Annex A5.

2.5.2. Stauzeitkosten 2013 und ihre Entwicklung

Aus den bisher erläuterten Grundlagen ergeben sich die Stauzeitkosten durch einfache Multiplikation von Stauzeiten x Kostensätzen. Abbildung 25 zeigt die entsprechenden Ergebnisse. Die zugehörigen Zahlen finden sich in Annex A6. Die Stauzeitkosten für die LMW für das Jahr 2009 bleiben in der gleichen Grössenordnung wie in der früheren Studie ausgewiesen (aktualisiert 896 Mio. CHF, bisher 824 Mio. CHF). Darin spiegeln sich kompensatorische Effekte wieder: einerseits etwas tiefere Stauzeiten, andererseits höhere Kostensätze. Die grösste Veränderung bzw. Reduktion ist beim Schwerverkehr festzustellen: die Stauzeiten liegen um rund die Hälfte tiefer, was auf die neuen Datengrundlagen zurückzuführen ist, und die Kosten sind um rund zwei Drittel geringer aufgrund der rund 30% tieferen Kostensätze.

Insgesamt steigen die Stauzeitkosten von 2009 (aktualisiert auf rund 0.95 Mrd. CHF veranschlagt, bisher 0.98 Mrd. CHF) bis ins Jahr 2014 auf rund 1.25 Mrd. CHF an, wobei der Grossteil beim Nicht-Schwerverkehr anfällt.



Zahlenwerte finden sich in Annex A6.

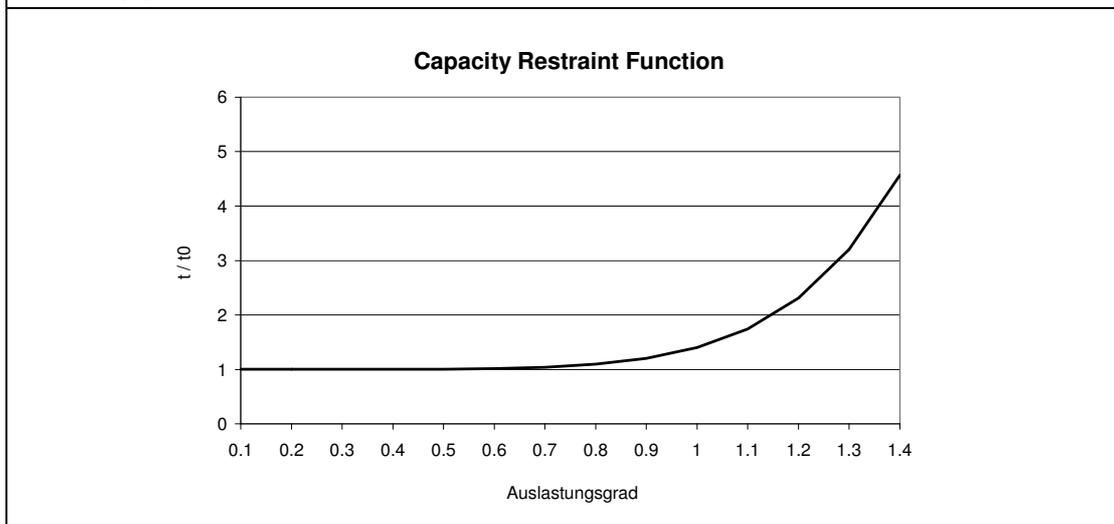
2.6. Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten

2.6.1. Methodik

Ausgangspunkt für die Ermittlung des Anteils der dem Schwerverkehr anzulastenden Stauzeitkosten ist die Methodik, die bereits in der Studie 2012 angewendet wurde. Diese Ermittlung erfolgt gemäss Vorgaben des Bundesgerichts, die darin begründet sind, dass es primär um eine Kostenzuteilungsregel geht. Weil der Gesetzgeber eine leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe beschlossen hat, nicht aber eine entsprechende Abgabe für den Nicht-Schwerverkehr, interessieren gemäss Bundesgericht lediglich die vom Schwerverkehr dem Nicht-Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten, nicht aber die Stauzeitkosten, die der Nicht-Schwerverkehr dem Schwerverkehr gegenüber verursacht. Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden die Stauzeitkosten einmal für einen Zustand MIT und einmal für einen Zustand OHNE Schwerverkehr ermittelt. Die Differenz entspricht dann dem gesuchten Wert der dem Schwerverkehr anzulastenden Stauzeitkosten. Dies setzt zwangsläufig eine Simulation voraus, da ein Zustand OHNE Schwerverkehr eine fiktive Situation ist. Der Eckwert, d.h. der Zustand MIT Schwerverkehr, ist dabei mit den Berechnungen aus den Abschnitten 2.4 und 2.5 gegeben. Das zentrale Element

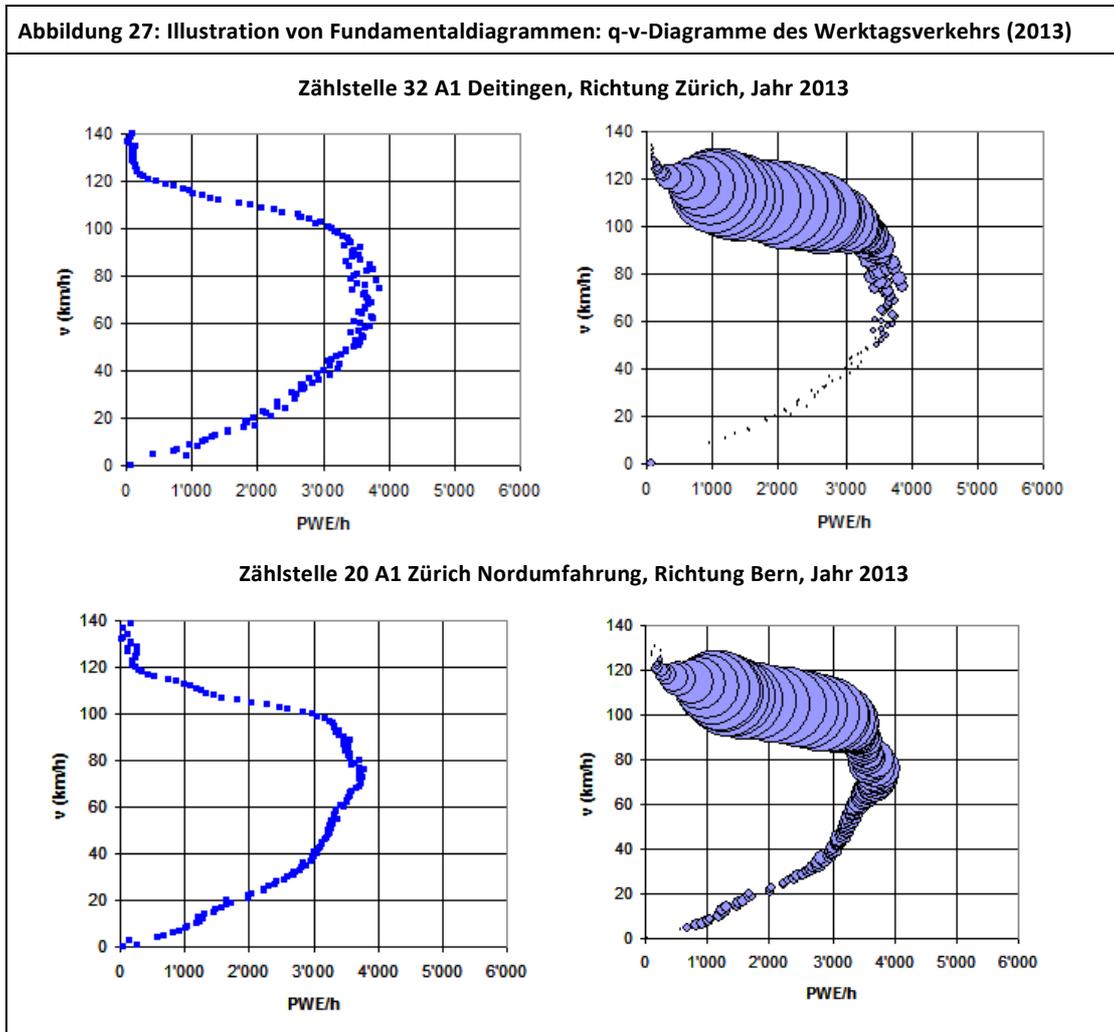
besteht darin, den Einfluss des Schwerverkehrs – oder generell einer zu- bzw. abnehmenden Nachfrage auf den Verkehrsfluss – modellhaft abzubilden. Das kann anhand von sog. Capacity Restraint (CR)-Funktionen umgesetzt werden. Diese machen eine Aussage über die Zunahme des Zeitbedarfs zum Durchfahren eines Streckenabschnitts in Abhängigkeit der bestehenden Nachfrage bzw. der Auslastung auf dem jeweiligen Strassenabschnitt (vgl. Abbildung 26). Die zu wählenden Parameter sind sensitiv, sie entscheiden massgeblich über den Einfluss der Nachfrage auf die Zeitverzögerung. Im Rahmen der Studie 2012 konnten aus Zeitgründen keine Vertiefungen durchgeführt werden, um solche Parameter für die relevanten Stausituationen herzuleiten und entsprechend zu eichen. Damals wurden die Funktionen verwendet, die für das NPVM entwickelt wurden. Im vorliegenden Kontext wurden die Online-Daten aller Zählstellen mit Blick auf solche Funktionen analysiert. Diese Daten sind deshalb dafür gut geeignet, weil der gleiche Datensatz simultan die Nachfrage als auch die Geschwindigkeit (auch wenn lediglich als Querschnitts- und nicht als Streckengeschwindigkeit) enthält

Abbildung 26: Capacity Restraint-Funktion (CR) zur Ermittlung der Zeitverzögerung in Abhängigkeit des Auslastungsgrads



Grundsätzlich könnte man auch den angereicherten INRIX-Datensatz dafür verwenden, denn auch dort sind im Prinzip Nachfrage und Geschwindigkeit simultan verfügbar. Allerdings sind das bereits modellierte Werte, da die Nachfrage aus dem NPVM den Online-Daten zugespielt werden musste. Zudem bestehen Vorbehalte über die Tauglichkeit der Geschwindigkeitsangaben für diesen Zweck (vgl. Ausführungen in Abschnitt 2.4.2). Deshalb wurde der Online-Datensatz bevorzugt. Abbildung 27 zeigt zwei typische Fundamental-Diagramme: jeweils links ein q - v -Diagramm mit der Nachfrage q in PWE/h auf der x-Achse und der Geschwindigkeit v auf der

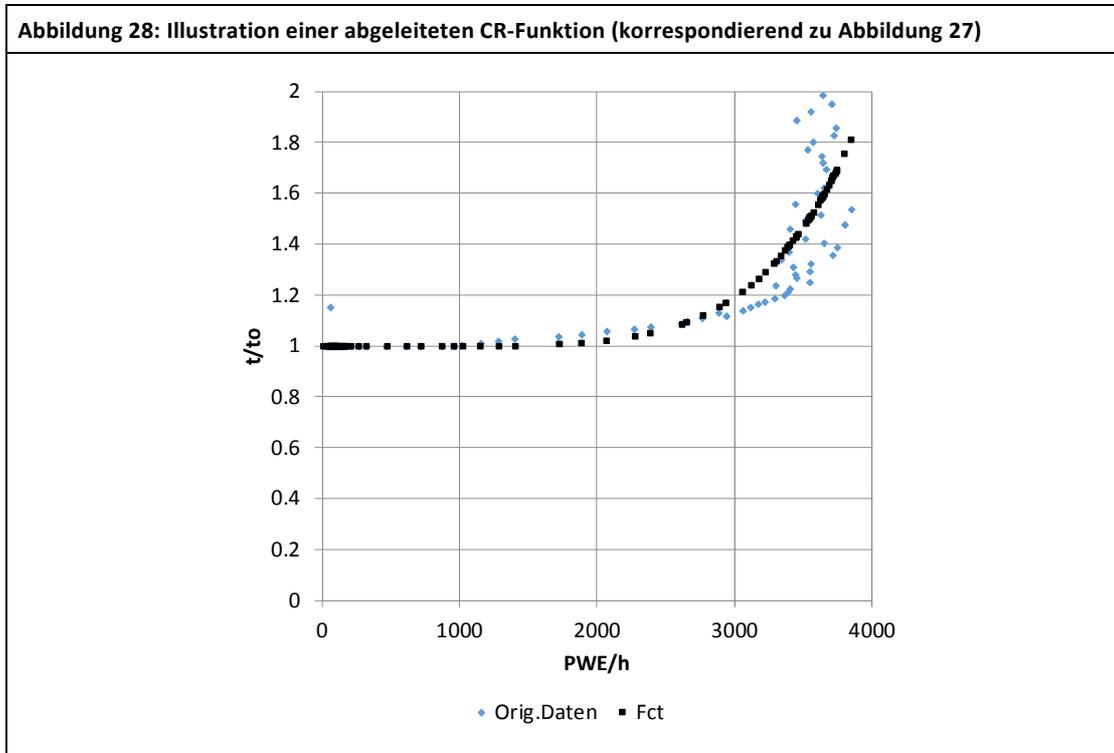
y-Achse. Die Darstellung zeigt (vereinfacht) jeweils einen Volumen-Wert pro v-Stufe; rechts ist zusätzlich eingetragen, wie häufig die betreffenden Punkte vorkommen.



Diese q-v-Diagramme kann man in Capacity Restraint Funktionen transformieren wie es in Abbildung 28 dargestellt ist. Diese Herleitung kann mit nicht-linearer Optimierung erfolgen²⁶.

²⁶ Diese Funktion hat die Form: $t_0 * (1 + \alpha * (q / \text{Cap})^\beta)$. Die nicht-lineare Optimierung erlaubt die optimierte Parameterwahl der drei Unbekannten (α , β und Cap [=Kapazität]). In diesem Fall: $\alpha = 0.4$, $\beta = 5.8$ und $\text{Cap} = 3415$ PWE/h; t_0 ist der Zeitbedarf, der der Referenzgeschwindigkeit entspricht, welche gleichgesetzt wurde mit v_{85} .

Zum Vergleich: in der früheren Studie 2012 wurden die Parameter $\alpha = 0.4$, $\beta = 6.5$ verwendet, d.h. der ansteigende Ast nimmt mit $\beta = 6.5$ leicht stärker zu als mit $\beta = 5.8$.



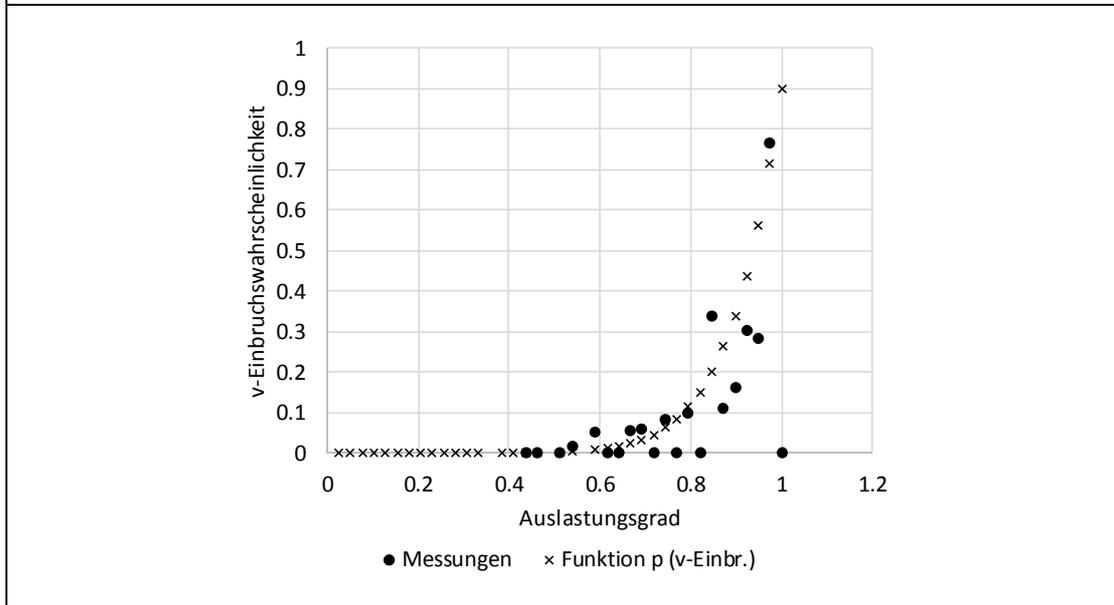
Mit nicht-linearer Optimierung hergeleitete CR-Funktion für das Beispiel in Abbildung 27

Der Capacity-Restraint-Ansatz stösst allerdings an Grenzen: Wenn die Auslastung sich dem Wert von 100% annähert, wird der Verkehrsfluss instabil (vgl. Abbildung 27), die (fahrbare) Geschwindigkeit sinkt ab, dies allerdings mit einer gewissen Streuung. Die Punkte unterhalb der „Grenzgeschwindigkeit“ von rund 70 km/h in den dargestellten Beispielen zeigen, dass auf dem rückwärtsläufigen Ast der q - v -Funktion – trotz abnehmender Nachfrage – die Geschwindigkeit weiter Richtung Null tendiert. Das ist allerdings nur ein scheinbarer Widerspruch, denn diese Punkte repräsentieren nicht die Wunschgeschwindigkeit, sondern vielmehr Stausituationen. Capacity-Restraint-Funktionen bilden deshalb vor allem die Situation im oberen Geschwindigkeitsbereich ab (oberhalb der Grenzgeschwindigkeit). Streng genommen gelten sie bis zu einem Auslastungsgrad von 100%. Die darüber hinausgehenden Werte (Auslastungsgrad $>100\%$) lassen sich als gespiegelte oder von links nach rechts ‚umgeklappte‘ Werte interpretieren, welche die Situation im unteren Geschwindigkeitsbereich (unterhalb der Grenzgeschwindigkeit) darstellen. Empirisch lässt sich dies aber mit den verfügbaren Daten nicht eruieren, da der Auslastungsgrad faktisch bei 100% endet. Vor diesem Hintergrund haben wir die Methodik ergänzt und für den unteren Geschwindigkeitsbereich (unterhalb der Grenzgeschwindigkeit) einen zusätzlichen Ansatz miteinbezogen. Dieser orientiert sich an der Erkenntnis, dass die Kapazität nicht eine deterministisch als vielmehr eine stochastisch verteilte Grösse ist: Mit zunehmender

Verkehrsstärke steigt das Risiko, dass die Geschwindigkeit einbricht und zu einer Stausituation führt. In neueren Studien wird dies als „Einbruchswahrscheinlichkeit“ bezeichnet (z.B. Schwietering 2010)²⁷. Diese lässt sich ermitteln aus dem Vergleich der Anzahl der zeitlichen Intervalle, denen unmittelbar ein Geschwindigkeitseinbruch folgt und der Anzahl der Intervalle bei fließendem Verkehr für gleiche Verkehrsstärkekassen. Dieses Verhältnis beschreibt somit für eine bestimmte Verkehrsstärke das Risiko eines Geschwindigkeitseinbruchs. Im vorliegenden Kontext haben wir diesen Grundgedanken aufgenommen, die Wahrscheinlichkeit des Geschwindigkeitseinbruchs aber in vereinfachter Form ermittelt, nämlich aus dem Vergleich der Häufigkeit von Ereignissen im unteren Geschwindigkeitsbereich mit der Häufigkeit von Ereignissen im oberen Geschwindigkeitsbereich für die jeweils gleiche Verkehrsstärke. Dieses Häufigkeitsverhältnis interpretieren wir als Wahrscheinlichkeit des Geschwindigkeitseinbruchs. Abbildung 29 illustriert dies für die Zählstelle 20 (A1 Nordumfahrung Zürich). Diese Daten kann man ähnlich wie die CR-Funktion näherungsweise mit einer Funktion abbilden (im Folgenden als pE-Funktion bezeichnet). Man sieht in den Daten grosse Streuungen, gleichwohl lässt sich ablesen, dass die Wahrscheinlichkeit des Geschwindigkeitseinbruchs in der Nähe der Kapazitätsgrenze stark überproportional zunimmt.

²⁷ Die Wahrscheinlichkeit des Geschwindigkeitseinbruchs ist nicht zu verwechseln mit der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit der Leistungsfähigkeit auf Autobahnen (Brilon et.al. 2004, Brilon et.al. 2007, Geistefeldt 2009).

Abbildung 29: Wahrscheinlichkeit des Geschwindigkeitseinbruchs (abgeleitet aus den Daten aus Abbildung 27: Zählstelle 20, A1 Nordumfahrung Zürich, 2013)²⁸



Um diesen Ansatz umzusetzen, ist es überdies notwendig, für den Fall eines „v-Einbruchs“ – also auf dem rückwärtigen Ast der q-v-Funktion des Fundamentaldiagramms – eine Geschwindigkeit festzulegen, denn für die Ermittlung der Stauzeiten muss auch im vorliegenden Anwendungsfall eine Stau-Geschwindigkeit bekannt sein, um daraus den Zeitverlust gegenüber einer „freeflow“-Geschwindigkeit abzuleiten. Aus den Fundamentaldiagrammen bzw. den Online-Daten konnten solche vereinfachte Funktionen („vStau-Funktionen“) zwischen dem Nullpunkt und der Grenzgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Auslastungsgrads festgelegt werden (vgl. Abbildung 30). Für diesen Zusammenhang wurde eine Exponentialfunktion gewählt von der Form

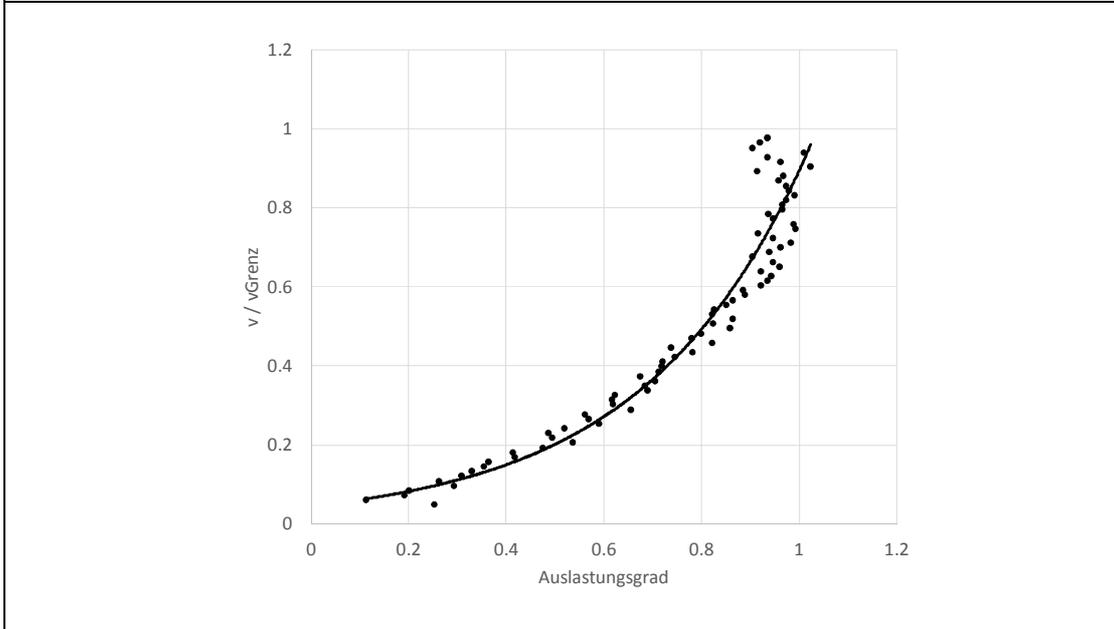
$$v_{\text{Stau}}/v_{\text{Grenz}} = \alpha * \text{Exp}(\beta * \text{Auslastungsgrad}),$$

mit den Parametern $\alpha = 0.045$ und $\beta = 2.97$.

²⁸ Im vorliegenden Fall wurde folgende pE-Funktion unterstellt:

$p(\text{v-Einbruch}) = \alpha * (\text{Auslastung})^\beta$, mit den Parameterwerten $\alpha = 0.9$ und $\beta = 9$.

Abbildung 30: Beispiel der Ableitung der Geschwindigkeit im untern v-Bereich in Abhängigkeit des Auslastungsgrads (Daten: Zählstelle 32, A1 Deitingen, Werktagsverkehr 2013, vgl. Abbildung 27)



2.6.2. Umsetzung

Die konkrete Umsetzung erfolgte in mehreren Schritten:

- In einem ersten Schritt wurden für alle Zählstellen die Fundamental-Diagramme erstellt. Daraus ergeben sich q - v -Funktionen, d.h. v (Geschwindigkeit) in Abhängigkeit von q (Nachfrage) ausgedrückt in PW-Einheiten (vgl. Abbildung 27). Diese Fundamental-Diagramme wurden für alle Jahre (2009 bis 2014) erstellt, faktisch wurden sie aber lediglich für Kontrollzwecke verwendet. Relevant war das Bezugsjahr 2013.
- Auf dieser Basis wurde in einem zweiten Schritt die Grenzgeschwindigkeit (je Zählstelle) ermittelt. Zuerst wurde die maximale Kapazität (definiert als maximal vorkommende Nachfrage) rechnerisch ermittelt, dann „by inspection“ eingegrenzt auf realistische Werte²⁹. Die entsprechende Geschwindigkeit wurde dann als „Grenzgeschwindigkeit festgelegt. Somit konnte das Fundamental-Diagramm in zwei Bereiche eingeteilt werden:
 - $v > v_{\text{Grenz}}$, wo die CR-Funktion zum Einsatz gelangte, und
 - $v \leq v_{\text{Grenz}}$, wo der Ansatz mit der „ v -Einbruchswahrscheinlichkeit“ zur Anwendung gelangte.

²⁹ Konkret wurde in einem v -Fenster von 60 bis 100 km/h die maximal vorkommende Nachfrage, welche häufiger als nur punktuell vorkommt, als Kapazität festgelegt.

- In einem dritten Schritt wurden CR-Funktionen einerseits und pE-Funktionen andererseits ermittelt. Dabei wurden vereinfachend jeweils die gleichen Parameter beibehalten; die Differenzen zwischen den Zählstellen ergeben sich aufgrund der zählstellen- und richtungsspezifischen Kapazitäten sowie den entsprechenden Grenzggeschwindigkeiten. Folgende Parameter wurden schliesslich verwendet:
 - CR-Funktion: $t(\text{Auslastung}) = t_0 * (1 + \alpha * \text{Auslastungsgrad}^\beta)$
wobei $\alpha = 0.4$ und $\beta = 6.0$
 - pE-Funktion: $pE(\text{Auslastung}) = \alpha * (\text{Auslastungsgrad})^\beta$
wobei³⁰ $\alpha = 0.9$ und $\beta = 8.0$
 - v-Stau³¹: $v\text{Stau}/v\text{Grenz}(\text{Auslastung}) = \alpha * \text{Exp}(\beta * \text{Auslastungsgrad})$
wobei $\alpha = 0.045$ und $\beta = 2.97$
- Schliesslich wurden in einem vierten Schritt die Fahrzeugstaukosten für alle Zählstellen und für alle jeweils vorkommenden Punkte unter Berücksichtigung von deren Häufigkeit ermittelt: einerseits für den oberen Geschwindigkeitsbereich mit Hilfe der CR-Funktionen (wie in Abbildung 27 illustriert), und andererseits für den unteren Geschwindigkeitsbereich mit Hilfe der pE-Funktionen sowie der vStau-Funktionen. Dies ergibt den modellierten Fall MIT Schwerverkehr, welcher in der Summe über alle Zählstellen als 100%-Referenzwert genommen wird und dem Eckwert der Fahrzeugstaukosten aus Abschnitt 2.5 entspricht.
- In einem fünften Arbeitsschritt wurden die gleichen Berechnungen durchgeführt, aber dieses Mal OHNE Schwerverkehr. Damit verschiebt sich jeder Punkt auf der CR-Funktion bzw. auf der pE-Funktion nach links, je nach den Anteil des Schwerverkehrs im jeweiligen Punkt im Fundamentaldiagramm.
- Aus dem Ergebnis MIT bzw. OHNE Schwerverkehr lässt sich die Differenz ermitteln. Dieser prozentuale Rückgang kann dann auf den Eckwert der Fahrzeugstaukosten appliziert werden, was dem gesuchten Ergebnis entspricht. Dabei wurden immer spezifische Staukosten berechnet (also $Fz\text{StauStd}/\text{km}$). Dadurch wird jede Zählstelle entsprechend ihrer Relevanz bezüglich Staustunden berücksichtigt; die Länge des Netzabschnittes, dem die Zählstelle zugewiesen ist, spielt so keine Rolle.

³⁰ Der Wert von $\beta = 8.0$ an Stelle von $\beta = 9.0$ wie im Beispiel von Abbildung 29 wurde im Sinne des „At least“-Ansatzes gewählt, denn er bewirkt eine tendenziell geringere Reduktion der Stauzeitkosten im Fall OHNE Schwerverkehr.

³¹ In beiden Fällen (mit und ohne Schwerverkehr) wurde als „v-Stau“ der gleiche Wert verwendet. Das heisst, es wird lediglich eine geringere Häufigkeit von Stauereignissen unterstellt. Die „Intensität“ der Stauereignisse wird nicht verändert, was eine konservative Annahme (im Sinne des „At least“-Ansatzes) ist, denn bei signifikanter Reduktion der Nachfrage würden nicht nur die Stauhäufigkeiten, sondern auch deren Intensitäten zurückgehen.

Der methodische Unterschied im Vergleich zur Studie 2012 besteht somit darin, dass einerseits das empirische Datenmaterial zählstellenspezifisch für die q-v-Funktionen genutzt und appliziert werden konnte; andererseits konnten die eigentlichen Stausituationen im unteren Geschwindigkeitsbereich an Stelle von CR-Funktionen mit einem transparenteren Ansatz (v-Einbruchswahrscheinlichkeiten) in Rechnung gestellt werden.

2.6.3. Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeiten und –kosten und ihre Entwicklung

Basisrechnung 2013

Die Basisrechnung wurde analog zu den Berechnungen der Stauzeitkosten insgesamt für das Bezugsjahr 2013 erstellt. Das Ergebnis kann kurz in eine Zahl gefasst werden: Die Fahrzeugstauzeiten der LMW an Werktagen reduzieren sich gemäss den oben erläuterten Berechnungen um 62 % falls kein Schwerverkehr auf den Strassen zirkulieren würde. Dieser Wert gilt, da an den Mengengerüsten der Zählstellen ermittelt, im Wesentlichen für die Autobahnen³². Die Bezugsgrösse sind die werktäglichen Fahrzeugstauzeiten. Diese machen – gemäss der Detailanalyse der INRIX-Daten nach Wochentagtypen (vgl. Abschnitt 2.4.2) – auf Autobahnen knapp 80% der gesamten Stauzeiten bzw. –kosten aus (2013: 512 Mio. CHF = 79.3% von 646 Mio. CHF [vgl. Annex 6]). Demnach gelten 62% davon, also 316 Mio. CHF als vom Schwerverkehr verursacht. Für die Nicht-Autobahnen liegen keine Daten vor, mit denen vergleichbare Berechnungen durchgeführt werden könnten. Durch Analogie kann man folgende Grössenordnung abschätzen:

- Auf Nicht-Autobahnen machen die werktäglichen Stausituationen 84.6% aus (2013: 391 Mio. CHF = 84.6% von 463 Mio. CHF).
 - Der Anteil der SMW macht auf Autobahnen 6.1% aus, auf Nicht-Autobahnen 2.1%. Entsprechend kann man argumentieren, das gleiche Verhältnis gelte auch für die vom Schwerverkehr verursachten Staukosten. D.h. $2.1/6.1 \times 62\% = 21\%$ von 391 Mio. CHF = 83 Mio. CHF.
- Insgesamt machen die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten demnach im Bezugsjahr 2013 398 Mio. CHF aus.

Zeitreihe 2009 bis 2014

Angesichts der Unsicherheiten in der Modellierung wird auf eine jahresweise Eruiierung des Anteils der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten verzichtet, zumal temporäre Ereig-

³² Für die Nicht-Autobahnen stehen nur wenige Zählstellen mit entsprechender Auflösung zur Verfügung.

nisse wie Baustellen, Datenlücken etc. diesen Wert beeinflussen. Vielmehr wird der Prozentsatz von 62% konstant gehalten und auf die Staukosten der verschiedenen Jahre appliziert. Analoges gilt für den Wert auf Nicht-Autobahnen (21%).

So ergibt sich die in Tabelle 6 dargestellte Zeitreihe. Demnach sind für 2014 rund 420 Mio. CHF als vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten zu bezeichnen. Im Vergleich zu den in der Studie 2012 veranschlagten Werten³³ ist der aktualisierte Wert für das Vergleichsjahr 2009 vergleichbar (300 statt 291 Mio. CHF). Etwas grösser ist die absolute Differenz für das Jahr 2010, denn der damals für das Jahr 2010 indikativ erwähnte Wert von 401 Mio. CHF liegt um knapp 25 Mio. CHF über dem neuen Wert für 2010 von 378 Mio. CHF; die neue Schätzung ist also marginal tiefer. Bis ins Jahr 2014 steigt der Wert aber auf 421 Mio. CHF an.

Tabelle 6: Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten (aktualisiert; Werte gerundet)				
		Vom Schwerverkehr verursachte Stauzeitkosten (Mio CHF/a)		
		AB	NichtAB	total
		LMW	LMW	LMW
aktualisiert	2009	221	79	300
"	2010	297	80	378
"	2011	310	81	391
"	2012	328	82	411
"	2013	316	83	398
"	2014	337	83	421
bisher	2009	225	66	291

Bei einem Vergleich der Daten ist Folgendes zu erwähnen: die aktualisierten absoluten Stauzeitkosten des Nicht-Schwerverkehrs liegen in der ähnlichen Grössenordnung (neu 896 Mio. CHF gegenüber 824 Mio. CHF für das Jahr 2009 gemäss der Studie 2012). Die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten für 2009 haben ebenfalls eine ähnliche Grössenordnung (neu 300 Mio. CHF gegenüber 291 Mio. CHF gemäss der Studie 2012). Allerdings sind in der aktualisierten Rechnung zwei Faktoren erwähnenswert, die sich in etwa kompensieren:

- Einerseits wurden die eigentlichen Stauereignisse neu mit dem Ansatz der „v-Einbruchswahrscheinlichkeit“ ermittelt. Dadurch werden diese Ereignisse höher veranschlagt als dies

³³ Damals wurde durch die „Absenz“ des Schwerverkehrs ein Rückgang der Verlustzeiten der leichten Motorwagen um 55% ermittelt.

mit der Approximation mittels den CR-Funktionen in der Studie 2012 der Fall war. Betrachtete man allein diesen Faktor, würde das neue Ergebnis höher ausfallen als das bisherige.

- Andererseits wurde in den neuen Rechnungen der Umrechnungsfaktor von Lastwagen in Personenwageneinheiten modifiziert. In den früheren Abschätzungen (Studie 2012) wurde mit einem Faktor 2.5 PW-Einheiten pro LW gerechnet. Dieser Faktor wirkt direkt auf das Ergebnis ein – in reduzierendem Sinne: je geringer der Faktor, desto geringer der Einfluss des Schwerverkehrs und in der Folge desto geringer die dem Schwerverkehr anrechenbaren Verlustzeiten. Obwohl gute Argumente für den ursprünglich verwendeten Wert von 2.5 sprechen (vgl. dazu die Ausführungen in Annex A8), wird für die vorliegende Aktualisierung der Wert von 2.0 unterstellt, um dem „At least“-Ansatz Rechnung zu tragen, also eher eine Unter- denn eine Überschätzung anzustreben. Würde man wie früher mit 2.5 PWE/LW rechnen, würden die Ergebnisse um gut 40 Mio. CHF höher ausfallen (für 2014: 463 Mio. CHF statt 421 Mio. CHF).

2.7. Würdigung der Ergebnisse

2.7.1. Kernpunkte der Aktualisierung

Der Bund ist verpflichtet, die Berechnung der externen Kosten nach aktuellem Stand der Wissenschaft durchzuführen und deshalb auch laufend zu aktualisieren. Die vorliegende Aktualisierung der Stauzeitkosten ist geprägt von zwei Elementen:

- Bei der letzten Berechnung (Studie 2012) hat sich gezeigt, dass für das schweizerische Autobahnnetz mit den Daten des ASTRA (sog. Online-Daten) taugliche Grundlagen vorliegen, um die nötigen Berechnungen durchzuführen. Vorteilhaft ist insbesondere der Umstand, dass Verkehrsnachfrage und Verkehrsflussdaten im gleichen Datensatz verfügbar sind. Problematischer war die Situation bei den Nicht-Autobahn-Strecken: hierzu fehlten entsprechende Grundlagen weitgehend, so dass über punktuelle Hinweise und Analogieschlüsse die Gröszenordnungen abgeschätzt werden mussten. Deshalb wurde der Fokus ursprünglich auf diesen Teilbereich gelegt. Die Suche nach differenzierteren Grundlagen ergab, dass heute mit Floating Car Data und Floating Phone Data (FCD/FPD) neue Datenquellen verfügbar werden, die grosses Potenzial für solche Abschätzungen aufweisen. Mit dem INRIX-Datensatz 2013 konnte ein umfangreicher Datensatz beschafft werden, der den Verkehrsfluss minutenfein für die wichtigsten Strassen (TMC-Netz) beschreibt – sowohl für die Autobahnen wie auch die wichtigsten Achsen des Hauptstrassennetzes. Eine genauere Analyse der Daten führte allerdings zum Schluss, dass die auf Verkehrsinformation ausgerichteten Daten nicht unbezogen übernommen werden konnten. So kommt im ganzen Datensatz 2013 keine Minute vor, in denen der Verkehr völlig zum Erliegen kommt – was zumindest nach Unfällen oder

Pannen sehr wohl vorkommen kann, und die tiefste überhaupt vorkommende Geschwindigkeit beträgt 8 km/h, was ebenfalls nicht mit dem Erfahrungswissen über Staus übereinstimmt. Zudem sind die Netzabschnitte teilweise so lang, dass allfällige Stausituationen (auf Teilabschnitten) sich nicht genügend stark im Mittelwert über die gesamte Strecke niederschlagen und deshalb aufgrund der Netzkodierung nicht als Stausituationen erkannt werden können. Das trifft vor allem für den Nicht-Autobahn-Bereich zu – also jenen Bereich, bei dem bereits bisher Datenlücken bestanden. INRIX hat denn auch ab 2014 wesentliche Neuerungen eingeführt: einerseits eine feinere Netzkodierung (mit dem sog. INRIX-XD-Netz), und eine Anpassung der tiefsten Geschwindigkeit auf ein Niveau von 3.2 km/h (bzw. eine Absenkung von 5 auf 2 miles/h). Da für die vorliegende Untersuchung lediglich der Datensatz 2013 zur Verfügung stand, mussten die vorliegenden Daten teilweise neu interpretiert werden, um nicht systematische Unterschätzungen zu machen.

Dazu kommt, dass der Datensatz aufwändig aufbereitet werden musste, indem den Verkehrsflussdaten entsprechende Verkehrsnachfragedaten vom nationalen Personenverkehrsmodell zugespielt werden mussten, um die letztlich interessierenden Ergebnisse in Form von Fahrzeug-Staustunden produzieren zu können. Diese Zuordnung musste eigens über Konversionsprozeduren („conflation“) durchgeführt werden, weil derzeit Daten zum Verkehrsfluss und Daten zur Verkehrsnachfrage durch unterschiedliche Akteure bearbeitet werden.

Trotz dieser Vorbehalte beurteilen wir FC/FP-Daten als eine Datenquelle mit grossem Potenzial, welche für künftige Aktualisierungen herangezogen werden sollte. Allerdings braucht es zusätzliche Verfeinerungen der Verkehrsflussdaten, um diese plausibler zu machen. Insbesondere wäre es sehr wünschenswert, mehr Details über den Hintergrund der originären Datenquellen bzw. über die Art und Weise der Aufbereitung zu erfahren. Allenfalls wäre es lohnenswert, für die etwas spezielle Fragestellung von Verlustzeiten nicht von Providern aggregierten Ergebnisse, sondern zugrunde liegende Rohdaten zu nutzen und zu analysieren.

Gleichzeitig wäre es angezeigt, die Datensätze von Verkehrsfluss und –nachfrage besser miteinander zu koordinieren (z.B. Standardisierung von Verkehrsnetzkodierungen bzw. standardisierte Konversionsmöglichkeiten).

- Ein zweites Element betrifft die Methodik zur Ermittlung der vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten. Bisher wurde die Berechnung mit Hilfe der sog. CR-Funktionen (Capacity Restraint) durchgeführt. Weil diese Funktionen bei der Behandlung von Stausituationen an Grenzen stossen, wurde ein neuer Ansatz (mit sog. Geschwindigkeits-Einbruchwahrscheinlichkeiten) versucht, der konzeptionell belastbarer ist – auch wenn er tendenziell dazu führt, dass die Verlustzeiten eher höher ausfallen.

Neben diesen grundlegend neuen Elementen wurden auch einzelne Parameter neu bestimmt, namentlich die Übernahme neuer Kostensätze in Anlehnung an aktualisierte VSS-Normen aus

dem Umfeld von Projektevaluationen. Dies führt dazu, dass die Stauzeitkosten von leichten Motorwagen (PW, Lieferwagen) um rund 25% zunehmen, während jene der Schwere Motorwagen um rund 30% tiefer veranschlagt werden. Schliesslich wurde auch die Konversion von Schwere Motorwagen in Personewageneinheiten verändert (früher 2.5, neu 2.0 PWE/LW), was die dem Schwerverkehr anrechenbaren Stauzeitkosten etwas reduziert.

Insgesamt führen die neuen Grundlagen und aktualisierten Berechnungen in der Summe zu ähnlichen Grössenordnungen der Stauzeitkosten wie auch der dem Schwerverkehr anrechenbaren Stauzeitkosten (berechnet gemäss den methodischen Vorgaben des Bundesgerichts).

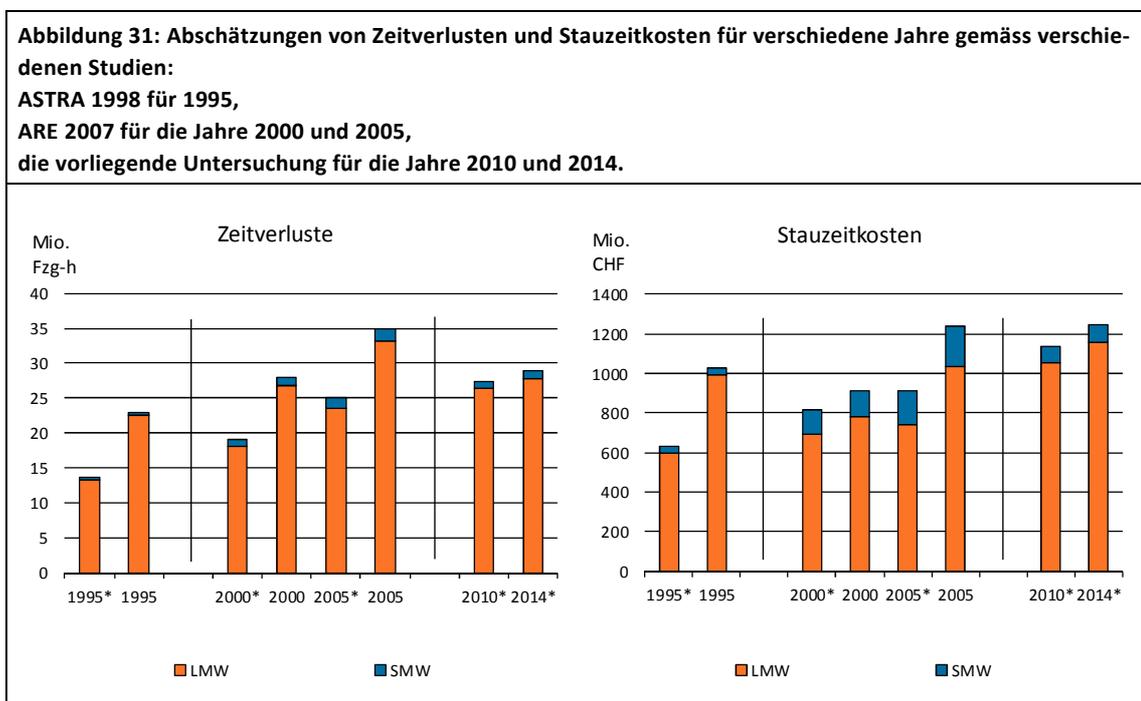
2.7.2. Vergleich der Ergebnisse mit früheren Studien (1998, 2007)

Stauzeitkosten wurden schon in früheren Studien (1998 und 2007) berechnet, da bereits damals ein Interesse an staubedingten Zeitverlusten im Verkehr bestand. Schätzungen mussten mit den damals verfügbaren Daten gemacht werden, auch wenn diese im Vergleich zu den heute vorliegenden umfangreichen Datensätzen eher begrenzt waren. In der Studie 1998 (ASTRA 1998) wurden grobe Abschätzungen auf der Basis verschiedener alternativer bzw. sich ergänzender Teilansätze gemacht (Staustatistik, Modellbetrachtung anhand des Fundamental-diagramms, Fallbeispiele). Die Studie 2007 (ARE 2007) verwendete teils die gleichen, aber aktualisierten Datenquellen; teils kamen neue Quellen dazu (z.B. KABEWISTRA [„Kapazitätsbewirtschaftung Strasse“]³⁴). Wie oben ausgeführt hat die vorliegende Studie erstmals auch Floating Car Data bzw. Floating Phone Data (INRIX) als Basisdatensatz einbezogen.

Abbildung 31 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für die Jahre 1995, 2000, 2005, 2010 und 2014 im Quervergleich, wobei für die Jahre 1995, 2000 und 2005 jeweils zwei Werte angegeben sind, einmal eine „Sensitivitätsbetrachtung“ ohne Einbezug kleiner Zeitverluste im Nicht-Autobahnbereich (in Abbildung 31 markiert mit einem Stern nach der Jahreszahl) und einmal eine „Basisrechnung“ unter Einbezug auch kleiner Zeitverluste. In der vorliegenden Untersuchung für die Jahre 2010ff. wird der Schwerpunkt bewusst auf die Version „ohne Einbezug kleiner Zeitverluste“ gelegt, denn Ziel der Untersuchung ist nicht nur die Berechnung der Staukosten insgesamt, sondern auch die Ermittlung des Anteils, der vom Schwerverkehr verursacht wird. Aus einer Sichtweise „Verkehrsträger“ sind Stauzeitkosten weitestgehend interne Kosten, da sie innerhalb des Verkehrsträgers (hier Strasse) verursacht und auch erlitten werden, d.h. die Verkehrsteilnehmenden sind gleichzeitig Verursacher und Betroffene von Staus. Nun hat das Bundesgericht festgehalten, dass im Kontext der Festlegung des LSVA-Tarifs nicht die Verkehrsträgeroptik, sondern die Sichtweise „Verkehrsart“ relevant ist. In dieser Sichtweise sind

³⁴ Auf Basis von Experteneinschätzungen (Tiefbauämter der Kantone) wurden neuralgische Stautellen der Schweiz aufgelistet und quantifiziert (Staudauer und Staulängen). Die Daten wurden einmalig für das Jahr 2003 erhoben.

Staukosten, welche ein Verkehrssegment (z.B. der Schwerverkehr) den andern Verkehrsteilnehmern (z.B. dem Individualverkehr) aufbürdet, als externe Kosten zu interpretieren. Deshalb macht diese Untersuchung (im Unterschied zu den früheren Studien 1998 und 2007) ergänzend zur Ermittlung der Gesamtstaukosten implizit auch eine entsprechende Differenzierung zwischen intern und extern. Das Bundesgericht hat allerdings festgehalten, dass im erwähnten Kontext lediglich die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten relevant sind. Überdies hat das Bundesgericht auch Vorgaben gemacht, wie diese „externen Kosten“, d.h. die dem Schwerverkehr anrechenbaren Stauzeitkosten ermittelt werden sollen. Vor diesem Hintergrund folgt die vorliegende Untersuchung bewusst dem „At least“-Ansatz, der eher zu einer Untertenn zu einer Überschätzung der Kosten führt und der im Kontext der Berechnung von externen Kosten üblicherweise zum Zuge kommt. Deshalb wurden „kleine Zeitverzögerungen“ nicht in die Berechnungen für 2010ff. mit aufgenommen, sondern lediglich solche, die mit effektivem Stau oder stockendem Kolonnenverkehr im Sinne der Verkehrsinformation verbunden sind. Die in Abbildung 31 ausgewiesenen Werte 2010 und 2014 sind deshalb am ehesten mit den früheren „Sensitivitätswerten“ vergleichbar.



Die Kolonnen mit dem Zusatz „*“ blenden kleine Zeitverzögerungen aus. Die Zahlen zur Abbildung finden sich in Annex A9.

Die Untersuchung zum Jahr 1995 hat Verlustzeiten in einer Spannweite zwischen 14 und 23 Mio. Fahrzeugstunden ermittelt und Stauzeitkosten auf zwischen 0.6 und 1.0 Mrd. CHF veranschlagt. Die Untersuchung 2007 hat für die Jahre 2000 und 2005 bei Einbezug aller Zeitverluste

höhere Verlustzeiten, aber gleichwohl geringere Stauzeitkosten (zumindest für 2000) ausgewiesen. Die Begründung liegt darin, dass ein Grossteil der Verlustzeiten im Freizeitverkehr anfällt, demnach tiefere Kostensätze angesetzt wurden. Betrachtet man die Werte ohne Einbezug kleiner Zeitverzögerungen (so wie sie in der vorliegenden Untersuchung ausgewiesen werden), so ist seit 1995 ein kontinuierlicher Anstieg von Verlustzeiten und Staukosten auszumachen – mit knapp einer Verdopplung der Staukosten von 1995 bis 2010 von gut 0.6 auf rund 1.1 Milliarden CHF und einem weiteren Anstieg auf 1.24 Mrd. CHF bis 2014. Der Verlauf von Verlustzeiten und Staukosten ist gleichwohl nicht gleich geartet – dies als Folge variierender Kostensätze: die vorliegende Studie verwendet aktualisierte Kostensätze gemäss VSS-Normen, was beim Nicht-Schwerverkehr zu spürbar höheren Werten führt. Auffallend sind die Unterschiede beim Schwerverkehr: die aktuelle Studie schätzt dessen Stauzeitkosten deutlich tiefer ein als die Vorgängerstudie. Neben input-daten-bedingt geringeren Verlustzeiten fällt vor allem der tiefere Kostensatz gemäss Norm (-30%) ins Gewicht.

Die Differenzen zwischen den verschiedenen Untersuchungen haben demnach unterschiedliche Gründe. Ein Teil davon hat letztlich mit der Frage zu tun, wie ein Stau definiert wird bzw. ab wann ein Zeitverlust als „staurelevant“ gilt, und gleichzeitig, wie man dies messen soll bzw. kann. Zwar existiert heute eine Definition von „Stau im Sinne der Verkehrsinformation“ (vgl. 2.1, VSS-Norm SN 671 921 aus dem Jahr 2005). Faktisch war (und ist) diese bisher so nicht messbar: erst wenn Floating Car Data so präzise sind, dass sie diesen (oder einen andern, ggf. noch zu definierenden) Indikator automatisch mitmessen und die Mess- und Auswertemethodik öffentlich und transparent gemacht wird, würde eine einheitliche Berechnung ermöglicht. Das ist derzeit noch nicht der Fall. Vielmehr müssen zwangsläufig Annahmen getroffen werden, was dazu führen kann, dass mit verschiedenen Ellen gemessen wird. Dabei spielt der Kontext einer Untersuchung durchaus eine Rolle: Die vorliegende Untersuchung hatte zum Ziel, neben den Gesamtstauzeitkosten auch die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten auszuweisen – dies als eine der Grundlagen für die Internalisierung der vom Schwerverkehr verursachten externen Kosten im Kontext der LSVA. In diesem Zusammenhang wurde bewusst der „At least“-Ansatz beachtet, also die Verwendung von vorsichtigen Annahmen, die eher zu einer Unter- als einer Überschätzung der tatsächlichen Kosten führen.

Teil B: Staubedingte Umwelt- und Unfallkosten 2010

3. Staubedingte Umwelt-, Klima- und Energiekosten 2010

3.1. Ausgangslage, Fragestellung

In der Studie der externen Effekte des Verkehrs für das Jahr 2010 (Ecoplan/INFRAS 2014). wurden die externen volkswirtschaftlichen Kosten des Verkehrs entlang von zwölf Bereichen ermittelt: Luftverschmutzungsbedingte Gesundheitsschäden, Gebäudeschäden, Ernteauffälle, Waldschäden, Biodiversitätsverluste, Lärm, Klima, Natur und Landschaft, Bodenschäden, vor- und nachgelagerte Prozesse, Unfälle und Zusatzkosten in städtischen Räumen. In den folgenden Abschnitten geht es um die Frage: Welche Anteile der in Ecoplan/INFRAS 2014 ausgewiesenen gesamten externen Kosten des Verkehrs können ursächlich auf Stau zurückgeführt werden?

Die Umwelt- und Klimakosten stellen aus Verkehrsträgersicht externe Kosten dar, d.h. sie werden nicht von den Verkehrsteilnehmern selbst getragen, sondern von der am Verkehr zum Betrachtungszeitpunkt nicht beteiligten Allgemeinheit. Ein Sonderfall in der Diskussion der staubedingten Kosten sind die Energiekosten, die aufgrund der ineffizienteren Fahrweise (höherer Treibstoffverbrauch) in Stausituationen entstehen. Im Gegensatz zu den Umwelt- und Klimakosten werden diese von den Verkehrsteilnehmern selbst getragen und sind daher aus Verkehrsträgersicht interne Kosten. Trotzdem werden diese in den folgenden Berechnungen berechnet und ausgewiesen.

3.2. Methodik, Definitions- und Abgrenzungsfragen (Umwelt, Klima, Energie)

3.2.1. Gesamte Kosten Umwelt und Klima

Ausgangslage für die Ermittlung der staubedingten Anteile der Umwelt- und Klimakosten des Verkehrs sind die Berechnungen für das Jahr 2010 in Ecoplan/INFRAS 2014. Die Ergebnisse aus diesen Arbeiten werden hier als Gesamtkosten unverändert übernommen, d.h. es finden in nachfolgender Arbeit keine Neuberechnungen dieser Gesamtwerte statt, es werden daraus lediglich die staubedingten Anteile ermittelt.

Zu den Umweltkosten im vorliegenden Kontext werden die Kostenbereiche luftverschmutzungsbedingte Gesundheitsschäden, Gebäudeschäden, Ernteauffälle, Waldschäden und Biodiversitätsverluste gezählt. Dazu kommen die Klimakosten. Die für die nachfolgenden Berechnungen relevanten Teile sind in Tabelle 7 grau hinterlegt.

Die nicht berücksichtigten Kostenbereiche sind die Natur-/Landschaftskosten, die Bodenschäden, die vor- und nachgelagerten Prozesse und die Zusatzkosten in städtischen Räumen. Für diese Positionen sind die Beiträge des Staus irrelevant. Die Unfallkosten werden in einem

separaten Kapitel behandelt. Bei den Lärmkosten ist es grundsätzlich ebenfalls zu erwarten, dass die Fahrten im Stau einen Einfluss auf die Kosten haben dürften. Auch diese Kosten sind aus den nachfolgenden Analysen ausgeschlossen worden mangels umfassender Grundlagen zur Beziehung zwischen Fahrgeschwindigkeit bzw. Verkehrssituation und Lärm³⁵. Solche Abhängigkeiten wären zuerst zu vertiefen bzw. zu erforschen.

Die externen Umweltkosten des Verkehrs im Jahr 2010 betragen rund 2.1 Milliarden Franken, weitere 1.3 Milliarden Franken entfallen auf die Klimakosten. Insgesamt betragen die externen Umwelt- und Klimakosten des Verkehrs rund 3.3 Milliarden Franken im Jahr 2010. Im Verhältnis zu den gesamten externen Effekten des Strassenverkehrs (7.7 Milliarden Franken; inkl. Lärm, Unfälle, etc.) machen die Umwelt- und Klimakosten rund 43 % aus.

Innerhalb der einzelnen Kostenbereiche der Umwelt- und Klimakosten machen die Gesundheits- und Gebäudekosten (Luftschadstoffe) rund 55 % aus, die Klimakosten weitere 38 %. Die Bedeutung der restlichen Kostenbereiche ist dagegen vergleichsweise gering.

³⁵ Es liegt nicht a priori auf der Hand, ob die Fahrten im Stau bei langsameren Geschwindigkeiten aber häufigeren Beschleunigungsphasen im Endeffekt höhere oder tiefere Lärmemissionen hätten. Für die Lärmkostenberechnung in Ecoplan/INFRAS 2014 wurde die Lärmdatenbank des Bundes (SonBase) eingesetzt. Die Methodik für die Lärmemissionsberechnung, die dort zum Einsatz kommt, berücksichtigt allerdings keine Verkehrssituationen und bezieht die Fahrgeschwindigkeiten nur sehr aggregiert ein. Auf dieser Grundlage lassen sich keine differenzierten Aussagen zu Lärmemissionen bei Stau und nicht-Stau treffen.

Tabelle 7: Externe Effekte aus Sicht Verkehrsträger im Strassenverkehr 2010 nach Kostenbereichen und Fahrzeugkategorien, in Mio. CHF								
Bereich	PW	Lieferwagen	SNF (LW+SS)	Car (Reisebus)	ÖV³⁶	ZR	Weitere	Total
Umweltkosten								
Gesundheit Luft	1'019.2	129.3	264.36	22.7	60.2	8.89	-	1'504.6
Gebäude Luft	209.8	26.6	54.39	4.7	12.4	1.83	-	309.7
Ernteauffälle Luft	27.0	6.1	16.94	1.2	3.7	0.60	-	55.5
Waldschäden Luft	25.0	4.9	13.55	1.0	2.9	0.48	-	47.9
Biodiversitätsverluste Luft	86.5	12.3	31.74	2.3	6.8	1.17	-	140.8
Klimakosten								
Klima	956.2	86.5	163.48	9.5	26.1	18.72	-	1'260.6
Weitere Kosten								
Lärm	644.1	142.6	371.4	17.2	36.9	251.3	-	1'463.5
Natur und Landschaft	601.1	45.9	89.6	4.0	9.5	9.5	10.2	769.7
Bodenschäden	56.8	10.9	41.7	2.2	5.2	1.3	-	117.9
Vor- und nachgelagerte Prozesse	537.3	49.7	103.2	4.8	19.6	9.1	34.5	758.1
Unfälle	590.7	34.2	20.5	1.7	7.2	316.8	872.2	1'843.3
Städtische Räume	90.6	9.3	6.4	0.3	3.2	2.0	-	111.8
Abzug LSVA-Anteil	-	-	-707.2	-12.5	-	-	-	-719.7
Totale								
Total Umweltkosten	1'367.6	179.2	381.0	31.8	85.9	13.0	-	2'058.5
Total Umwelt- und Klimakosten	2'323.8	265.8	544.4	41.3	112.1	31.7	-	3'319.1
<i>Gesamttotal</i>	<i>4'844.2</i>	<i>558.3</i>	<i>470.2</i>	<i>58.9</i>	<i>193.5</i>	<i>621.7</i>	<i>916.9</i>	<i>7'663.8</i>

Quelle: Ecoplan/INFRAS 2014; PW = Personenwagen, SNF = schwere Nutzfahrzeuge (Lastwagen LW und Sattelschlepper SS), ÖV = Öffentlicher Verkehr (Bus, Tram, Trolley), ZR = Zweiräder (Motorräder, Mofas), weitere = Langsamverkehr und Nonroad.

Die Berechnungsmethodik, die hinter den in Tabelle 7 aufgeführten Kostenbeträgen steht, ist im Detail in Ecoplan/INFRAS 2014 beschrieben. Zwecks besserem Verständnis der nachfolgenden Aufteilung der Kosten in die staubedingten Anteile, werden hier die wichtigsten methodischen Ansätze für die Berechnung der Gesamtkostenbeträge stichwortartig rekapituliert:

- **Gesundheitskosten** umfassen medizinische Behandlungskosten, Produktionsausfälle, Wiederbesetzungskosten, immaterielle Kosten infolge Verkürzung der Lebenserwartung und Krankheitsfälle. PM10 gilt Leitschadstoff für die Belastungs-Wirkungs-Beziehungen, Basis sind die PM10-Immissionen. Für die Monetarisierung werden Literaturangaben zu Behandlungskosten, Produktionsausfällen, etc. beigezogen.

³⁶ Faktisch leisten nur die Busse Beiträge zu den externen Kosten in den Bereichen Umwelt und Klima. Der Vollständigkeit halber sind die Trolleybusse und Trams in den anderen Bereichen mit eingeschlossen.

- **Gebäudekosten** umfassen die Zusatzkosten für Renovationen, Kosten durch verkürzte Lebensdauer der Fassade und Zusätzliche Reinigungskosten. PM10 gilt als Leitschadstoff (Immissionen) für die Monetarisierung der zusätzlichen Kosten (Kostensätze aus Literaturanalysen und Experteneinschätzungen) aufgrund der verkehrsbedingten Luftverschmutzung.
- **Ernteausfälle** umfassen die aufgrund der Ozonbelastung verminderten landwirtschaftlichen Erträge. Die Ozonimmissionen bilden die Basis für die Expositions-Wirkungsbeziehungen (Ozon/Pflanzenwachstum); Monetarisierung mit Hilfe der Ernteerträge und Produzentenpreise ausgewählter Nutzpflanzenarten.
- **Waldschäden** umfassen die verminderten Holzerträge infolge Ozonbelastung und Bodenversauerung und die Kosten durch verstärkten Windwurf als Folge der Bodenversauerung. Monetarisierung mit Hilfe der Holzerträge und Produzentenpreise für Holz bzw. der Gesamtkosten für Sturmereignisse.
- **Biodiversitätsverluste** umfassen die Kosten für Massnahmen zur Wiederherstellung von artreichen Ökosystemen. Bewertet werden sie aufgrund der Emissionen der Luftschadstoffe NO_x, NH₃ und SO₂ (versauernd, eutrophierend wirkende Schadstoffe) und der spezifischen Kosten für Biodiversitätsverluste.
- **Klimakosten** umfassen die Kosten für Vermeidungsmassnahmen zur Erreichung eines langfristigen globalen Klimaziels. Ausgangspunkt für die Bewertung sind die Treibhausgasemissionen (CO₂, CH₄ und N₂O) des Verkehrs. Die Monetarisierung geschieht auf Basis von spezifischen Kosten zur Vermeidung von Treibhausgasen.

Die Umweltkosten des Verkehrs werden also entlang der Wirkungskette Luftschadstoffemissionen → Immissionen → Schäden → Kosten hergeleitet. In Ecoplan/INFRAS 2014 wurden zunächst die verkehrsbedingten Luftschadstoff-Emissionen ermittelt. Dabei wurde das INFRAS-Emissionsmodell eingesetzt, welches die Verkehrsaktivitäten mit Emissionsfaktoren (auf der Basis des „Handbuchs für Emissionsfaktoren“ HBEFA, Version 3.1), siehe BAFU 2010a) verknüpft. Anschliessend wurden die Luftschadstoff-Emissionen des Verkehrs mit Hilfe eines Ausbreitungsmodells in räumlich differenzierte Schadstoffkonzentrationen (Immissionen) umgerechnet und mit den räumlich aufgelösten Bevölkerungsdaten (Hektarraster) verschnitten. Damit kann für jede Fahrzeugkategorie die bevölkerungsgewichtete, mittlere Schadstoffkonzentration ermittelt werden. Letztere sind schliesslich massgebend für die Belastungs-Wirkungsbeziehungen, welche der monetären Bewertung der Umweltkosten zu Grunde liegen.

Die Klimakosten beruhen direkt auf den Treibhausgasemissionen des Strassenverkehrs (ebenfalls auf Basis des INFRAS-Emissionsmodells ermittelt).

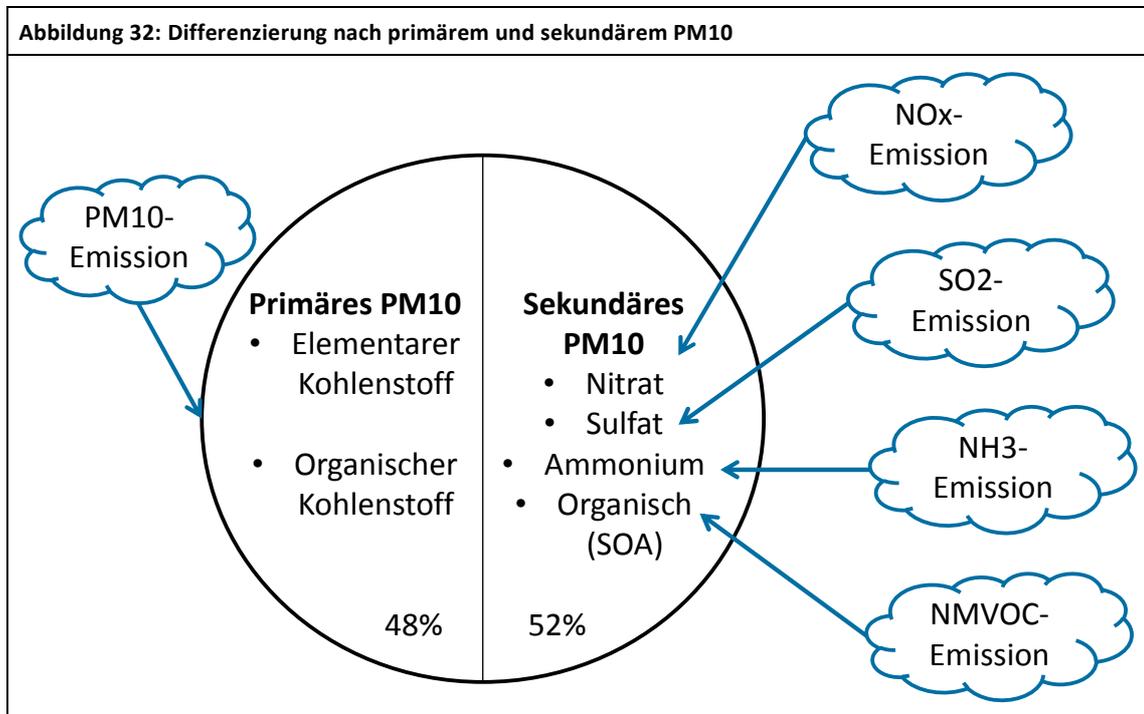
3.2.2. Staubbedingte Umwelt-, Klima- und Energiekosten

Vorgehen Umweltkosten

Die Wirkungskette Luftschadstoffemissionen → Immissionen → Schäden → Kosten bildet den Ausgangspunkt für die Ermittlung der staubbedingten Umweltkosten. Als Leitschadstoff wird dabei PM10 (Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von maximal 10 Mikrometern; Feinstaub) betrachtet. Explizit gilt dies im Ansatz von Ecoplan/INFRAS 2014 für die luftschadstoffbedingten Gesundheits- und Gebäudekosten, welche zusammen rund 90 % der Umweltkosten ausmachen. Vereinfachend wird PM10 auch als Leitschadstoff für die anderen Umweltkostenbereiche (Ernteauffälle, Waldschäden und Biodiversitätsverluste) beigezogen. Diese Vereinfachung wird als vertretbar erachtet, da diese Kostenkategorien insgesamt eine untergeordnete Rolle spielen (Anteil rund 10 %).

Innerhalb des Leitschadstoffs PM10 wird weiter differenziert nach primärem und sekundärem PM10 (siehe Abbildung 32). Primäres PM10, bestehend aus elementarem und organischem Kohlenstoff wird direkt aus dem Auspuff der Fahrzeuge emittiert. Sekundäre Partikel entstehen bei der Umwandlung von gasförmigen Stickoxid-, Schwefeldioxid-, Ammoniak- und nicht-Methan-VOC-Emissionen in der Umgebung. Bei der Herleitung der staubbedingten Umweltkosten werden beide Komponenten der PM10-Immissionen berücksichtigt. Die Anteile an den Immissionskonzentrationen an primärem/sekundärem PM10 sind ungefähr hälftig aufgeteilt (48 % primäres, 52 % sekundäres PM10 im Jahr 2010).

Eine weitere Differenzierung betrifft die Herkunft der Partikelemissionen (primär und Sekundär). Diese bestehen einerseits aus den Emissionen, die durch den Verkehr in der Schweiz verursacht werden. Andererseits wurden in Ecoplan/INFRAS 2014 auch Emissionen berücksichtigt, die durch den Verkehr im Ausland entstehen und in die Schweiz verfrachtet wurden. Für die vorliegende Analyse werden ausschliesslich die durch den Verkehr bzw. den Stau in der Schweiz verursachten Emissionen und Kosten eingeschlossen.



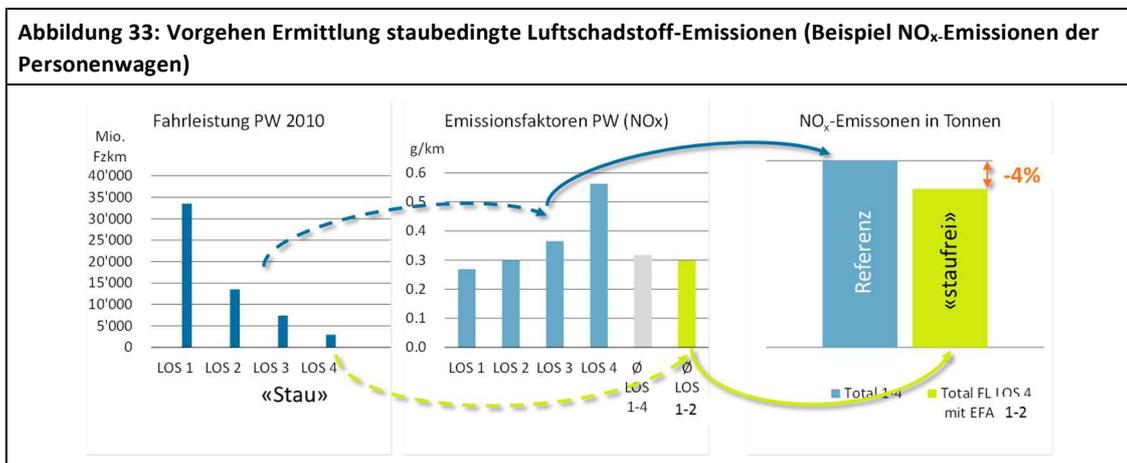
Vorläufer für Sekundäres PM10: NO_x = Stickoxid, SO₂ = Schwefeldioxid, NH₃ = Ammoniak, NMVOC = nicht-Methan-Volatile-Organic-Compounds (VOC); SOA = secondary organic aerosols.

Ausgehend von den PM10-Emissionen (für primäres PM10) bzw. der übrigen Luftschadstoffemissionen als Vorläufer für die sekundären Partikelbildungen werden die staubbedingten Anteile der Emissionen ermittelt. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

- Das INFRAS-Emissionsmodell für den Strassenverkehr liefert die Luftschadstoffemissionen differenziert nach sog. Verkehrssituationen (BAFU 2010b). Diese unterscheiden verschiedene Verkehrsqualitätsstufen (sog. „levels-of-service“ oder LOS) von „freiem Fluss“ über „dicht“, „gesättigt“ bis „Stop+Go“. Für diese Verkehrssituationen lassen sich aus dem Emissionsmodell pro Fahrzeugkategorie und Strassentyp – in der vorliegenden Studie wird zwischen „Autobahnen“ und „nicht Autobahnen“ unterschieden – die spezifischen Emissionsfaktoren in g/km auswerten (siehe Annex B1).
- Die Aufteilung der Fahrleistungen nach Verkehrsqualitätsstufen ist für die Berechnung der Emissionen zentral. Diese Aufteilung basiert auf den Ergebnissen der vorliegenden Studie, d.h. die Aufteilung aus der schweizerischen Emissionsmodellierung gemäss BAFU 2010b wird entsprechend angepasst. Es ist nun notwendig, die Fahrleistung im Stau gemäss Definition der vorliegenden Studie mit den Verkehrsqualitätsstufen aus dem Emissionsmodell in Übereinstimmung zu bringen. Dazu werden folgende Annahmen getroffen: Gemäss der in Kapitel 2 beschriebenen Herleitung der Fahrzeugstautunden, entfallen rund 3 % der Fahrleistungen auf den Zustand „Stau“. Stau im Sinne der vorliegenden Studie besteht teilweise aus

Verkehr in der Verkehrsqualitätsstufe 4 (Stop+Go) und teilweise in der Verkehrsqualitätsstufe 3 (gesättigt). Die relativen Anteile werden ebenfalls aus der Staumodellierung gemäss Kapitel 2 abgeleitet: 75 % der Stau-Fahrleistungen können der Verkehrsqualitätsstufe 3 (gesättigt) und 25 % der Verkehrsqualitätsstufe 4 (Stop+Go) zugewiesen werden.

- Darauf aufbauend können nun die Referenzsituation (siehe Abbildung 33, Darstellung exemplarisch für NO_x-Emissionen der Personenwagen) und eine fiktive, staufreie Situation berechnet werden. Dazu werden die Fahrleistungen, die unter den Verkehrssituationen Stop+Go und gesättigt (=Stau; LOS 4 und LOS 3) gefahren werden, statt mit den höheren Stau-Emissionsfaktoren mit dem mittleren gewichteten Emissionsfaktor der Nicht-Stau-Situationen (Mittelwert LOS 1 und LOS 2) multipliziert. Die so berechneten Emissionen entsprechen einer virtuellen Situation ohne Stau. Die Differenz bzw. das Verhältnis zwischen Referenzrechnung und staufreier Situation entspricht dann dem Stau-Anteil der Emissionen.
- Diese staubedingten Emissionsanteile können für sämtliche relevanten Luftschadstoffemissionen (PM₁₀, NO_x, SO₂, NH₃ und NMVOC) und Fahrzeugkategorien ermittelt werden. Anschliessend werden damit die staubedingten bevölkerungsgewichteten Schadstoffkonzentrationen (Immissionen) berechnet und diese schliesslich auf die gesamten Umweltkosten des Strassenverkehrs gemäss Tabelle 7 übertragen (Multiplikation der Gesamtkosten mit den staubedingten Anteilen).



LOS = „level-of-service“ (Verkehrsqualitätsstufe); LOS1 = freier Fluss, LOS 2 = dicht, LOS 3 = gesättigt, LOS 4 = Stop+Go.

Vorgehen Klima- und Energiekosten

Das Vorgehen für die Berechnung der staubedingten Klimakosten ist im Prinzip identisch mit demjenigen der Umweltkosten. Im Unterschied zu den Umweltkosten, wo die Immissionen der Luftschadstoffe massgebend sind, umfasst die Wirkungskette der Klimakosten direkt die CO₂-

Emissionen (Emissionen → Vermeidungskosten), welche unmittelbar mit dem Treibstoffverbrauch zusammenhängen (siehe nächsten Abschnitt). Somit entfällt der Schritt über das Ausbreitungsmodell bzw. die Schadstoffkonzentrationen; die staubedingten CO₂-Emissionssanteile werden direkt auf die gesamten Klimakosten übertragen.

Dasselbe gilt für die Berechnung der Energiekosten. Diese entsprechen dem aufgrund der ineffizienteren Fahrweise in Stau-Situationen (bei gesättigter Verkehrslage und Stop+Go) erhöhten Treibstoffverbrauch und den damit verbundenen Zusatzkosten. Für die Berechnung der Zusatzkosten werden die mittleren Treibstoffpreise für Benzin und Diesel für das Jahr 2010 eingesetzt. Diese basieren auf den durch das Bundesamt für Statistik veröffentlichten Auswertungen zum Landesindex der Konsumentenpreise (LIK – Treibstoffe)³⁷.

3.3. Mengen- und Wertgerüst

3.3.1. Umwelt- und Klimakosten

Die Gesamtwerte der Umweltkosten wurden bereits in Kapitel 3.2.1 (Tabelle 7) vorgestellt. In Tabelle 8 sind die diesen Kostenbeträgen zugrunde liegenden PM10 (primär und sekundär)-Immissionskonzentrationen zusammengefasst:

³⁷ Publiziert auf www.bfs.admin.ch (Landesindex der Konsumentenpreise LIK; „Treibstoff - Jahresdurchschnittspreise pro Liter in Franken“)

Tabelle 8: Immissionskonzentrationen (bevölkerungsgewichtete Mittelwerte Schweiz) - 2010												
	PM10 (primär)		Nitrat/NO _x (sekundär)		Sulfat/SO ₂ (sekundär)		Ammonium/NH ₃ (sekundär)		OM/NMVOG (sekundär)		Total	
	CH	Ausland	CH	Ausland	CH	Ausland	CH	Ausland	CH	Ausland	CH	Ausland
	ug/m ³		ug/m ³		ug/m ³		ug/m ³		ug/m ³		ug/m ³	
Total alle Quellen	6.44	2.38	0.53	2.47	0.30	1.66	0.96	0.65	1.61	1.49	9.84	8.65
Total Strasse	1.23	0.40	0.27	1.18	0.00	0.00	0.04	0.01	0.29	0.26	1.83	1.85
Anteil Strasse	19%	17%	50%	48%	1%	0%	4%	2%	18%	17%	19%	21%
Nach Fahrzeugkategorien												
PW	0.882	0.236	0.137	0.478	0.002	0.002	0.041	0.012	0.261	0.189	1.323	0.918
Lieferwagen	0.116	0.069	0.026	0.152	0.000	0.000	0.001	0.000	0.012	0.018	0.156	0.239
SNF (LW+SS)	0.180	0.082	0.082	0.477	0.000	0.001	0.000	0.000	0.007	0.013	0.269	0.574
Car (Reisebus)	0.012	0.006	0.007	0.040	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.019	0.047
ÖV-Busse	0.031	0.003	0.014	0.032	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.047	0.036
Zweiräder	0.007	0.001	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.034	0.012	0.037
Anteil am Total Strasse												
PW	72%	59%	51%	40%	76%	60%	98%	96%	91%	74%	72%	50%
Lieferwagen	9%	17%	10%	13%	7%	13%	2%	2%	4%	7%	9%	13%
SNF (LW+SS)	15%	21%	31%	40%	14%	25%	0%	1%	3%	5%	15%	31%
Car (Reisebus)	1%	2%	3%	3%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	1%	3%
ÖV-Busse	3%	1%	5%	3%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	3%	2%
Zweiräder	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%	13%	1%	2%

Quelle: Ecoplan/INFRAS 2014, eigene Berechnungen; 0.000 = Werte kleiner 0.0005 ug/m³; OM = organisches Material

Der Anteil des Strassenverkehrs an den PM10-Immissionen liegt bei rund 20 %, der Rest entfällt auf die übrigen Quellengruppen (Haushalte, Industrie, Land-/Forstwirtschaft und übriger Verkehr). Rund 50 % können auf den Strassenverkehr im Inland zurückgeführt werden. Innerhalb des Strassenverkehrs machen die Personenwagen den grössten Anteil der Immissionen aus (rund 72 % an den Total PM10-Immissionen Schweiz), wobei dieser Anteil je nach PM10-Komponenten stark variiert. So ist beispielsweise der Beitrag des Schwerverkehrs bei den sekundären NO_x-Partikelimmissionen aufgrund des Dieselanteils deutlich höher als bei den anderen Teilkomponenten.

Die Eckwerte des Verkehrsmengengerüsts sind in Annex B2 einsehbar. Abbildung 34 zeigt die den Stau-Anteil-Modellierungen zu Grunde liegenden Fahrleistungsanteile nach Verkehrsqualitätsstufen. Gemäss oben beschriebener Methodik sind die Anteile in den beiden Qualitätsstufen 3 und 4 für alle Fahrzeugkategorien identisch; unterschiedlich sind dagegen die Anteile in den Qualitätsstufen 1 und 2. Ebenfalls in Abbildung 34 sind die aus den Fahrleistungen modellierten Emissionen nach Verkehrsqualitätsstufen ersichtlich. Je nach Schadstoff sind die Emissionsanteile, die auf die Stausituationen entfallen gegenüber den entsprechenden Fahr-

leistungsanteilen mehr oder weniger ausgeprägt überproportional. Begründet liegen diese Unterschiede in den je nach Fahrzeugkategorie und Schadstoff unterschiedlichen Verhältnisse der Emissionsfaktoren in den einzelnen Verkehrsqualitätsstufen.



Quelle: BAFU 2010b, eigene Berechnungen

Auf dieser Grundlage werden nach der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Methodik die Stauanteile an den Luftschadstoff-Immissionen bzw. den CO₂-Emissionen berechnet. Die folgenden Tabellen zeigen diese Anteile (nur Verkehrsimmissionen bzw. -emissionen in der Schweiz):

Tabelle 9: Staubedingte Immissionskonzentrationen (PM10 primär und sekundär) 2010								
Fahrzeugkategorie	PM10 (primär + sekundär) „staufrei“					Total PM10 "staufrei"	Total PM10 "mit Stau"	Stau-Anteil
	PM10 (primär)	Nitrat/NO _x (sek.)	Sulfat/SO ₂ (sek.)	Ammonium/NH ₃ (sek.)	OM/NMVOC (sek.)	A	B	100%-(A/B)
	ug/m ³	ug/m ³	ug/m ³	ug/m ³	ug/m ³	ug/m ³	ug/m ³	%
PW	0.88	0.14	0.00150	0.04139	0.25484	1.31	1.32	1.1%
Lieferwagen	0.12	0.03	0.00013	0.00091	0.01200	0.16	0.16	0.5%
SNF (LW+SS)	0.17	0.08	0.00027	0.00010	0.00690	0.25	0.27	5.4%
Car (Reisebus)	0.01	0.01	0.00002	0.00001	0.00059	0.02	0.02	5.2%
ÖV-Busse	0.03	0.01	0.00005	0.00002	0.00124	0.05	0.05	0.9%
Zweiräder	0.01	-	-	-	0.00498	0.01	0.01	1.4%
Total Strasse	1.21	0.26	0.00197	0.04243	0.28056	1.80	1.83	1.7%

Nur Immissionen Schweiz (ohne Beiträge Verkehr aus dem Ausland); OM = organisches Material

Rund 1.7 % der primären und sekundären PM10-Immissionskonzentrationen lassen sich somit auf die Verkehrsemissionen im Stau zurückführen. Die Unterschiede zwischen den Fahrzeugkategorien sind einerseits auf die unterschiedlichen Beiträge der primären und sekundären PM10-Komponenten (aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Emissionsfaktoren, z.B. wegen des Dieselanteils) und andererseits auf verkehrliche Unterschiede der Fahrleistungen (Autobahn- vs. Innerorts-/ Ausserortsanteil, Anteil der Fahrten in Ballungsräumen und/oder Transitachsen, etc.) zurückzuführen.

Tabelle 10: Staubedingte CO ₂ -Emissionen 2010			
Fahrzeugkategorie	Total CO ₂ -Emissionen "staufrei"	Total CO ₂ -Emissionen "mit Stau"	Stau-Anteil
	Mio. t	Mio. t	%
PW	10.39	10.51	1.1%
Lieferwagen	0.83	0.84	0.6%
SNF (LW+SS)	1.68	1.71	1.6%
Car (Reisebus)	0.10	0.10	2.1%
ÖV-Busse	0.30	0.30	0.6%
Zweiräder	0.22	0.22	2.0%
Total Strasse	13.52	13.68	1.1%

Der staubedingte Anteil der CO₂-Emissionen liegt über alle Fahrzeugkategorien hinweg bei rund 1.1 %. Die höchsten staubedingten Emissionen finden sich bei den Personenwagen, die aufgrund ihres hohen Anteils an den Gesamtemissionen auch das Niveau des Mittelwerts massgeblich bestimmen. Die tiefsten Stau-Anteile weisen die ÖV-Busse und die Zweiräder auf. Auch hier liegen diese Unterschiede einerseits in strukturellen Unterschieden der Fahrleistungsverteilung (z.B. verkehren ÖV-Busse prinzipiell kaum auf Autobahnen) und andererseits in den relativen Unterschieden der Emissionsfaktoren entlang der Verkehrssituationen begründet.

3.3.2. Energiekosten

Aus der oben beschriebenen Emissionsmodellierung lassen sich nebst den Luftschadstoff- und CO₂-Emissionen auch die Treibstoffverbräuche auswerten, jeweils im Referenzfall („mit Stau“) und in der fiktiven, staufreien Situation. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst:

	Total Treibstoff- verbrauch "staufrei"	Total Treibstoff- verbrauch "mit Stau"	Mehrverbrauch Masse	Mehrverbrauch Volumen
Fahrzeugkategorie	<i>Mio. t</i>	<i>Mio. t</i>	<i>Mio. t</i>	<i>Mio. L</i>
PW	3.307	3.344	0.037	47.9
Lieferwagen	0.265	0.266	0.002	1.9
SNF (LW+SS)	0.534	0.543	0.009	10.4
Car (Reisebus)	0.030	0.031	0.001	0.7
ÖV-Busse	0.097	0.097	0.001	0.7
Zweiräder	0.069	0.070	0.000	0.2
Total Strasse	4.302	4.350	0.048	61.8

Aufgrund der Fahrten im Stau ergibt sich so insgesamt ein Mehrverbrauch von rund 62 Millionen Litern Treibstoff (Benzin und Diesel zusammen). Rund 78 % dieses Mehrverbrauchs entfällt auf die Personenwagen, weitere 17 % auf den schweren Güterverkehr.

Für die Berechnung der Mehrkosten werden die Treibstoffpreise aus den Auswertungen der Eidgenössischen Zollverwaltung (EZV) beigezogen. Die mittleren Treibstoffkosten ergeben sich aus der Gewichtung mit den relativen Verbrauchsanteilen nach Fahrzeugkategorien:

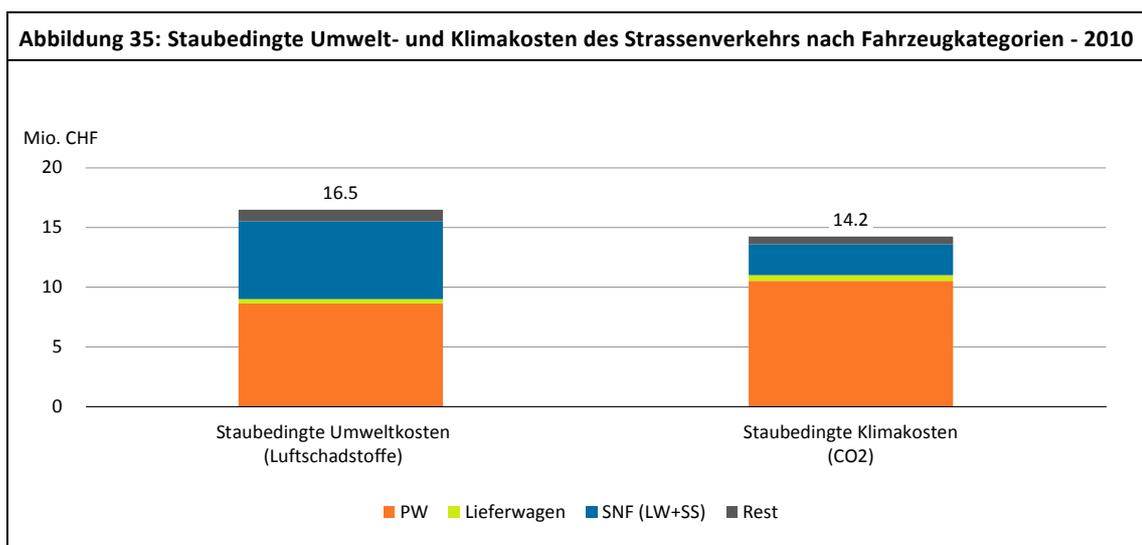
Tabelle 12: Treibstoffpreise 2010					
Fahrzeugkategorie	Mittlerer Preis 2010		Anteil (Verbrauch)		Gewichteter Preis
	Benzin	Diesel	Benzin	Diesel	Benzin+Diesel
	CHF/L	CHF/L	%	%	CHF/L
PW	1.69	1.72	78%	22%	1.70
Lieferwagen			24%	76%	1.71
SNF (LW+SS)			-	100%	1.72
Car (Reisebus)			-	100%	1.72
ÖV-Busse			-	100%	1.72
Zweiräder			100%	-	1.69

Quelle: BFS (Landesindex der Konsumentenpreise LIK), BAFU 2010b, eigene Berechnungen.

3.4. Ergebnis: Staubbedingte Umwelt-, Klima- und Energiekosten

3.4.1. Umwelt- und Klimakosten

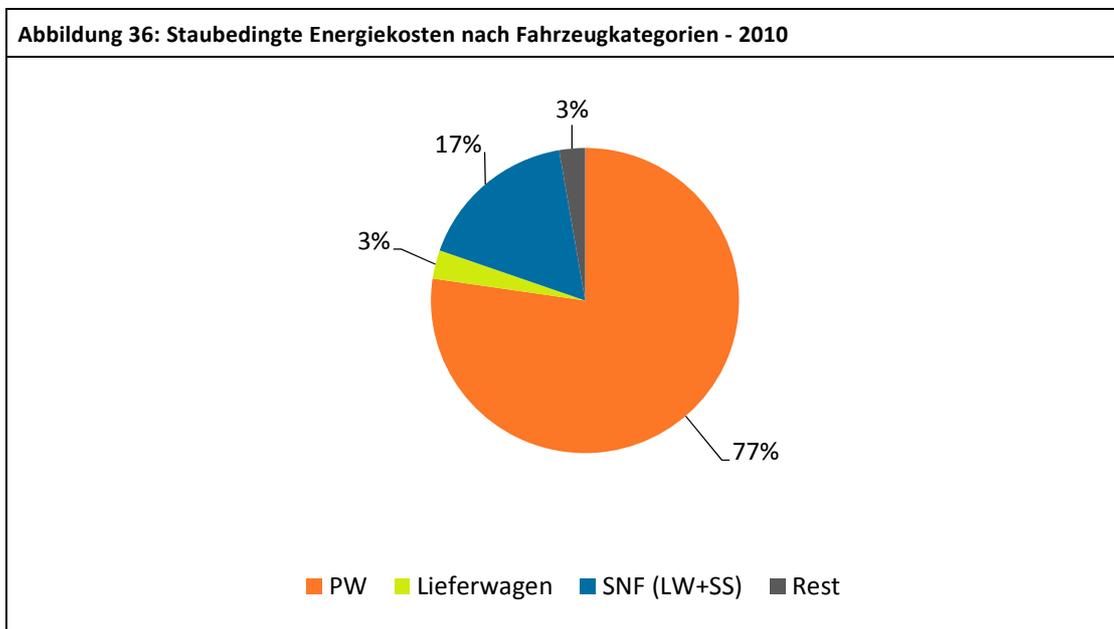
Abbildung 35 fasst die Ergebnisse der Berechnungen zu den staubedingten Umwelt- und Klimakosten zusammen. Insgesamt entfallen rund 16.5 Mio. CHF auf die Umwelt- und 14.2 Mio. CHF auf die Klimakosten, im Total betragen die Umwelt- und Klimakosten 30.7 Mio. CHF. Die Personenwagen machen dabei den Hauptanteil der Kosten aus: Rund 52 % der staubedingten Umweltkosten und 74 % der Klimakosten entstehen durch den Personenwagenverkehr. Die schweren Nutzfahrzeuge sind für 40 % der Umwelt- und 18 % der Klimakosten verantwortlich. Die detaillierten Resultate sind in Annex B3 einzusehen.



3.4.2. Energiekosten

Die zusätzlichen Kosten für den staubedingten Treibstoffmehrerverbrauch betragen im Jahr 2010 rund 105 Mio. CHF. 77 % dieser Kosten entfallen auf die Personenwagen, 17 % auf die schweren Nutzfahrzeuge.

Nochmals sei an dieser Stelle auf den speziellen Charakter der staubedingten Energiekosten hingewiesen: Im Gegensatz zu den externen Umwelt- und Klimakosten werden die staubedingten Energiekosten durch die Verkehrsteilnehmer selbst getragen und sind deshalb aus Verkehrsträgersicht keine externen Kosten.



Quelle: Gesamtbetrag staubedingte Energiekosten 2010 = 105 Mio. CHF

3.5. Interpretation

3.5.1. Sensitivitäten

Um die präsentierten Berechnungen zu den staubedingten Umwelt-, Klima- und Energiekosten durchführen zu können, müssen zwingend Annahmen getroffen werden. Entscheidend bei den Berechnungen der Stauanteile ist die Definition, was „staubedingt“ bedeutet. In den oben vorgestellten Basisrechnungen wurde dazu die Differenz des realen Referenzzustands (inklusive Stau) zu einem fiktiven „staufreien“ Zustand beigezogen. Für die Berechnungen des staufreien Zustands wurde davon ausgegangen, dass die in der Referenz in der Verkehrssituation „Stop+Go“ und „gesättigt“ verkehrenden Fahrzeuge sich entlang der bestehenden Anteile auf die übrigen Verkehrssituationen (flüssig, dicht) verteilen. Zu dieser Rechnung wurden folgende Sensitivitätsbetrachtungen durchgeführt:

- Sensitivität I: Die bislang im Stau verkehrenden Fahrzeuge verkehren statt in den beiden Verkehrssituationen flüssig und dicht, vollständig in der nächst höheren Verkehrsqualitätsstufe (LOS 2, dicht; Sensitivitätsrechnung I).
- Sensitivität II: Die bislang im Stau fahrenden Fahrzeuge verkehren im freien Fluss (LOS 1; Sensitivitätsrechnung II).

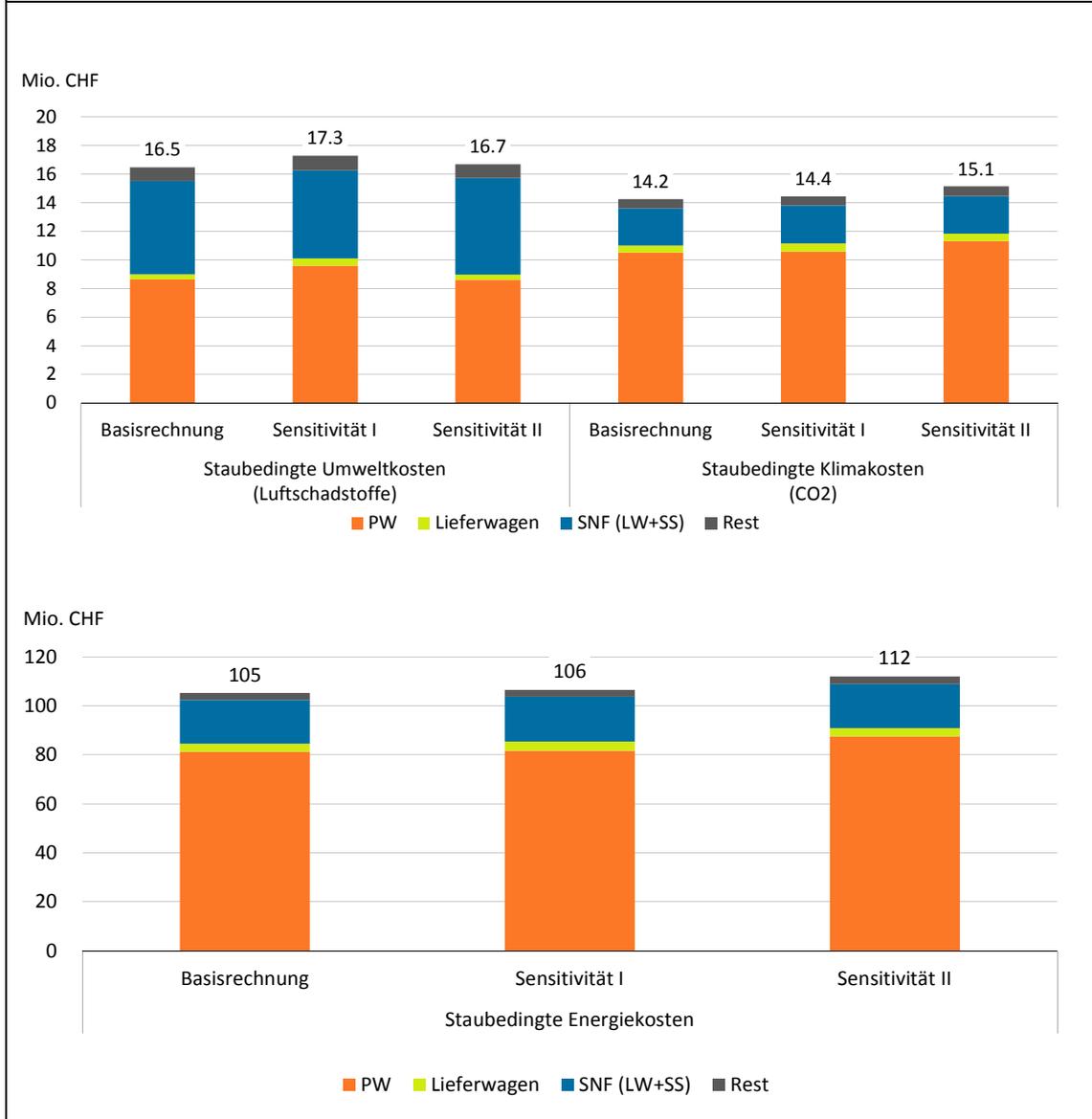
Die Resultate der Sensitivitätsrechnungen sind in Abbildung 37 ersichtlich. Grundsätzlich sind bei den Umwelt- und Klimakosten die Differenzen durch die in den Sensitivitäten variierten Annahmen relativ gering: +1 bis +5 % der Basisrechnung bei den Umweltkosten und +1 % bis +6 % bei den Klimakosten. Die Energiekosten folgen denselben Grössenordnungen wie die Klimakosten, da sie ebenfalls direkt vom Treibstoffverbrauch (bzw. dem CO₂-Ausstoss) abhängig sind.

In beiden betrachteten Fällen sind die Umwelt- und Klimakosten leicht höher als in der Basisrechnung. Entscheidend für diese Verhältnisse sind die Emissionsfaktoren der PW: Der Emissionsfaktor der Luftschadstoffe (PM, NO_x, etc.) für LOS 2 ist auf Autobahnen effektiv leicht tiefer als für LOS 1 bei den PW. Aus diesem Grund sind die Emissionsunterschiede für PW „mit/ohne Stau“ bei Sensitivität I am Grössten. Dasselbe gilt für die Lieferwagen (die aber auf das Gesamttotal keinen massgebenden Einfluss ausüben). Im Gegensatz dazu ist die Sequenz der Emissionsfaktoren bei den SNF auf allen Strassentypen und bei den PW und Lieferwagen auf den nicht-Autobahnen EFA LOS 1 < LOS 2, insgesamt sind aber in beiden Sensitivitätsrechnungen die Emissionsdifferenzen „mit/ohne Stau“ etwas höher als in der Basisrechnung.

Bei den Klimakosten sind die spezifischen CO₂-Emissionen massgebend. Hier sind bei allen Fahrzeugkategorien die spezifischen Emissionen in LOS 1 höher als in LOS 2, allerdings nur auf den Autobahnen. Auf nicht-Autobahnen sind die Emissionsfaktoren von LOS 1 bis LOS 4 stetig steigend. Zusammen mit den relativen Fahrleistungsanteilen in den einzelnen Strassentyp/LOS-Kategorien, ergeben sich für die Sensitivitätsrechnung II die höchsten Kosten, gefolgt von denjenigen der Sensitivitätsrechnung I und der Basisrechnung. Die Energiekosten folgen derselben Logik wie die CO₂-Emissionen.

Die Annahmen bezüglich Umverteilung der Stau-Fahrleistungen in die nicht-Stau Qualitätsstufen beeinflussen also das Resultat nicht massgeblich. Für die Zusammenstellung der Gesamtstaukosten (siehe Kapitel 5) fliessen daher die Resultate der Basisrechnung ein.

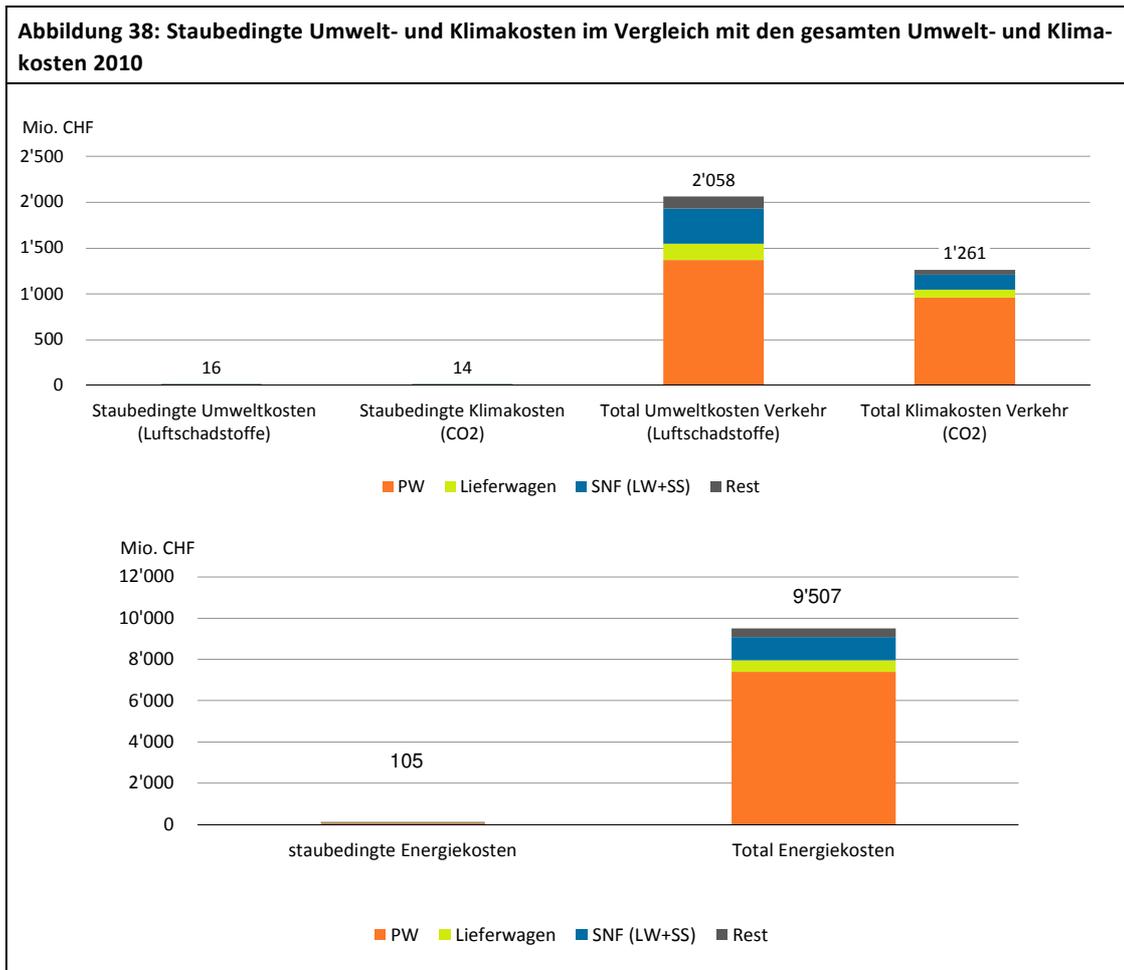
Abbildung 37: Sensitivitätsrechnungen staubedingte Umwelt- und Klimakosten (oben) bzw. Energiekosten (unten) für das Jahr 2010



3.5.2. Vergleich mit Gesamtumwelt-, Klima- und Energiekosten

Welche Bedeutung haben nun die staubedingten Umwelt-, Klima- und Energiekosten verglichen mit den Gesamtkosten? In Abbildung 38 wird dieser Vergleich hergestellt. Die Umwelt- und Klimakosten zusammen betragen insgesamt 3'320 Mio. CHF; es wird deutlich, dass die Bedeutung der staubedingten Umwelt- und Klimakosten vergleichsweise gering ist. In beiden Teilbereichen machen die staubedingten Kosten rund 1% aus (16.5 Mio. CHF entsprechen 0.8 % der gesamten Umwelt- und 14.2 Mio. CHF entsprechen 1.1 % der gesamten Klimakosten).

Bei den Energiekosten liegt der staubedingte Anteil an den gesamten Energiekosten (rund 9.5 Milliarden CHF) in derselben Grössenordnung: die 105 Mio. CHF an zusätzlichen Energiekosten machen rund 1.1 % der Gesamtkosten aus.



3.5.3. Vergleich mit früheren Ergebnissen

Die staubedingten Umwelt-, Klima- und Energiekosten wurden letztmals in einer ARE-Studie (2007) berechnet. Die Umwelt- und Klimakosten wurden damals auf rund 20 Mio. CHF für das Jahr 2005 geschätzt; falls auf den Einbezug kleiner Zeitverluste verzichtet wird, so beträgt der damals geschätzte Wert 15 Mio. CHF (was als „Sensitivitätsrechnung“ bezeichnet wurde). Die Ergebnisse der vorliegenden Studie liegen bei rund 30 Mio. CHF; sie sind mit den oben erwähnten 15 Mio. CHF (Einbezug kleiner Zeitverluste) vergleichbar und liegen somit deutlich höher.

Die staubbedingten Energiekosten beliefen sich in der Vorgängerstudie (ARE 2007) auf rund 84 Mio. CHF für das Jahr 2005 bzw. 55 Mio. CHF (ohne Einbezug kleiner Zeitverluste, = Sensitivitätsrechnung). Der hier ermittelte Kostenwert liegt bei 105 Mio. CHF und damit ebenfalls um rund einen Faktor 2 höher.

Zurückzuführen sind diese höheren Werte von Umwelt-, Klima- und Energiekosten auf die Zunahme der Fahrleistungen insgesamt, vor allem aber auf die etwas höheren Stauanteile, gleichzeitig sind aber die spezifischen Emissionsfaktoren aufgrund der technologischen Entwicklung im Jahr 2010 etwas tiefer als im Jahr 2005. Allerdings sind diese Differenzen gemessen an den gesamten Umwelt-, Klima- und Energiekosten fast vernachlässigbar klein. Zudem ist zu beachten, dass die Berechnungsmethodik in der vorliegenden Studie gegenüber den Vorgängeranalysen überarbeitet wurde:

- Neu wird für die Umweltkosten ein immissionsbasierter Ansatz verwendet, um die Konsistenz zu den externen Effekten des Verkehrs (Ecoplan/INFRAS 2014) herzustellen. In der Vorgängeranalyse wurden ausschliesslich die primären PM10-Emissionen für die Berechnungen beigezogen.
- Im neuen Ansatz werden sowohl die primären als auch die sekundären PM10-Emissionen mit berücksichtigt, gewichtet nach den effektiven Expositionsanteilen der Bevölkerung.
- Die im Ausland entstandenen Verkehrsemissionen, welche als Hintergrundbelastung zur Luftschadstoffkonzentration in der Schweiz beitragen, wurden dagegen ausgeklammert.
- Die Modellierung der Emissionsanteile basierte in der ARE-Studie 2007 auf den Emissionsfaktoren der HBEFA-Version 2.1. Die vorliegenden Berechnungen basieren auf der Version 3.1³⁸ (BAFU 2010a). Nebst neuen Emissionsgrundlagen (aktualisierte Emissionsfaktoren) wurde auf die Version 3.1. das Verkehrssituationen-Schema grundlegend überarbeitet. Relevant im vorliegenden Kontext ist hier v.a. die Tatsache, dass die Emissionsfaktoren neu nach den Verkehrsqualitätsstufen (LOS) gruppiert wurden. Dies lässt die relative Differenz etwas ansteigen im Vergleich zur früheren Version.

³⁸ Aktuell ist die HBEFA Version 3.2 (publiziert im Jahr 2014). Die Berechnungen der externen Kosten des Verkehrs 2010 beruhen allerdings auf der Version 3.1 (publiziert im Jahr 2010). Aus Konsistenzgründen wurde daher für die vorliegende Studie auch Version 3.1. verwendet.

4. Staubedingte Unfallkosten 2010³⁹

4.1. Ausgangslage, Fragestellung

Ausgangslage und Fragestellung bei den Unfallkosten sind gleich wie bei den Umweltkosten: Nachdem in der Studie Ecoplan/Infras (2014) die volkswirtschaftlichen Unfallkosten des Verkehrs beziffert worden sind, geht es hier um die Frage, wie gross der Anteil ist, der als staubedingt bezeichnet werden kann.

4.2. Definition staubedingter Unfälle

In der bisherigen Studie zu den Staukosten des Strassenverkehrs in der Schweiz (ARE 2007) wurden die staubedingten Unfälle wie folgt definiert:

- Auffahrunfälle auf Autobahnen und Autostrassen
 - auf stehende Fahrzeuge = untere Grenze
 - inkl. auf fahrende Fahrzeuge = obere Grenze
- Auffahrunfälle auf anderen Strassen haben mutmasslich grösstenteils andere Ursachen (z.B. Linksabbiegen des vorausfahrenden Fahrzeuges), sie wurden deshalb ausgeblendet.

Die neuen Datengrundlagen des ASTRA erlauben mittlerweile eine neue Vorgehensweise. Ab 2011 werden bei jedem Unfall die sogenannten Verkehrsbedingungen erfasst (vgl. Tabelle 13).

Tabelle 13: Definition der Verkehrsbedingungen

Nr.	Name	M/Z*	Beschreibung
450	schwach	M	Ankreuzen, wenn sich der Unfall bei einer leichten Verkehrsdichte von 1 bis 10 Fahrzeugen pro Minute ereignet hat.
451	rege	M	Ankreuzen, wenn sich der Unfall bei einer mittleren Verkehrsdichte von 10 bis 20 Fahrzeugen pro Minute ereignet hat.
452	stark	M	Ankreuzen, wenn sich der Unfall bei einer hohen Verkehrsdichte von mehr als 20 Fahrzeugen pro Minute ereignet hat.
453	stockende Kolonne	M	Ankreuzen, wenn sich der Unfall bei Stop-and-go-Verkehr ereignet hat.
454	stehende Kolonne	M	Ankreuzen, wenn sich der Unfall bei Stau ereignet hat.
459	andere	M	Ankreuzen, wenn keines der Merkmale zutrifft, und Präzisierung auf der dafür vorgesehenen Zeile.

Quelle: ASTRA (2010), Instruktionen zum Unfallaufnahmeprotokoll (UAP), S. 21.

- Unfälle bei stehender und stockender Kolonne können generell als staubedingte Unfälle betrachtet werden.

³⁹ Dieses Kapitel basiert auf Unterlagen, die durch Ecoplan aufgearbeitet wurden (Ecoplan 2015).

- Da Stau bereits auftritt, bevor der Verkehrszustand „Stop-and-go“ (= stockende Kolonne) erreicht wird, ist davon auszugehen, dass ein Teil der Unfälle bei starkem Verkehr ebenfalls als staubedingt betrachtet werden kann. Jedoch ist bei starkem Verkehr auch ein staufreier Verkehr möglich. Aufgrund dieser nicht ganz eindeutigen Ausgangslage werden daher staubedingte Unfallkosten einmal mit den Unfällen im „starken“ Verkehr und einmal ohne die Berücksichtigung dieser Unfälle ermittelt. Für den Ausweis des Endergebnisses werden die verschiedenen Unfallarten unterschiedlich berücksichtigt (vgl. Details in Abschnitt 4.5).
- Die Daten zu den so definierten staubedingten Unfällen stammen aus einer Spezialauswertung der Unfalldatenbank, welche durch das ASTRA erfolgte.
- Zu beachten ist: Im Jahr 2010 wurden erst 59% aller Unfälle nach den in Tabelle 13 ausgewiesenen Verkehrsbedingungen ausgewertet (erst ab 2011 haben alle Kantone die neuen Unfallaufnahmeprotokolle verwendet).
- Das ASTRA hat aufgrund dieses Umstandes die Daten nicht nur für das Jahr 2010, sondern auch für die Jahre 2011-2013 ausgewertet. Diese Auswertung erfolgte getrennt für (vgl. Tabelle 14)
 - 11 Unfalltypen
 - Autobahn / Autostrasse bzw. übrige Strassen.
Dabei wurde jeweils der Anteil der Unfälle bei stehender / stockender Kolonne bzw. bei starkem Verkehr bestimmt.
- Da die Daten 2010 unvollständig sind, können sie nicht direkt verwendet werden, da dies zu einer Unterschätzung führen würde. Deshalb werden die durchschnittlichen Anteile der Jahre 2011 bis 2013 verwendet. Diese Daten sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Wie sich zeigt, sind vor allem Auffahrunfälle, Überholunfälle oder Fahrstreifenwechsel sowie Abbiegeunfälle staubedingt.
- Dieselbe Ermittlung des Anteils wird für Leichtverletzte, Schwerverletzte und Getötete wiederholt. Dabei zeigt sich, dass der Anteil der staubedingten Unfälle bei den Schwerverletzten und Getöteten geringer ist als bei allen Unfällen und denjenigen mit Leichtverletzten. Bei staubedingten Unfällen sind die Geschwindigkeiten tendenziell gering und damit die Unfallfolgen meist weniger gravierend (vgl. Annex B4, Tabelle 29).

Tabelle 14: Anteil der staubedingten Unfälle nach Unfall- und Strassentyp in den Jahren 2011 bis 2013 (bei stehender und stockender Kolonne plus hälftigem Unfallanteil bei starkem Verkehr)

	Unfälle	
	Autobahn / Autostrasse	Übrige Strassen
Schleuder- oder Selbstunfall	7.38%	1.92%
Überholunfall oder Fahrstreifenwechsel	31.60%	13.90%
Auffahrunfall	63.47%	23.91%
Abbiegeunfall	13.04%	10.93%
Einbiegeunfall	8.45%	8.29%
Überqueren der Fahrbahn	0.00%	5.47%
Frontalkollision	9.23%	3.00%
Parkierunfall	6.98%	1.21%
Fussgängerunfall	6.52%	7.32%
Tierunfall	3.05%	1.97%
Andere	11.87%	3.03%

In dieser Zusammenstellung sind alle Unfallarten bei der Verkehrsbedingung „starker“ Verkehr mit 50% mitberücksichtigt.
Datenquelle: ASTRA, Auswertung durch Ecoplan.

4.3. Mengengerüst

4.3.1. Staubedingte Unfälle

- Da die Kosten pro Unfallopfer für Unfallverursacher und Nicht-Unfallverursacher unterschiedlich hoch sind, muss das Mengengerüst differenziert nach Unfallverursachern und Nicht-Unfallverursachern erhoben werden. Dies gilt nur für die Leichtverletzten, Schwerverletzten und Getöteten, aber nicht für die Zahl der Unfälle.
- Bei dieser Zuweisung werden Beifahrer jeweils als Nicht-Unfallverursacher angesehen.
- Im Jahr 2010 wurden bei 53% der Unfallopfer die erforderlichen Daten zur Abgrenzung zwischen Unfallverursacher und Nicht-Unfallverursacher bereits erhoben, so dass bei diesen Unfällen eine Zuteilung einfach möglich ist.
- Für die übrigen 47% der Unfallopfer erfolgt eine Approximation: Als Unfallhauptverursacher gilt das erste von der rapportierenden Polizei eingetragene Objekt mit mindestens einer Mangelzuweisung. Diese approximative Zuweisung ist mit einem Fehler von ca. 10% behaftet.
- Die folgende Abbildung fasst das Mengengerüst zusammen (die detaillierten Zahlen finden sich im Annex B4: Tabelle 30 bis Tabelle 32). Insgesamt wurden im Jahr 2010 auf Autobahnen und Autostrassen bei rund 2'300 Unfällen etwas über 1'000 Personen verletzt. Auf den übrigen Strassen gab es bei 3'800 Unfällen rund 2'250 Unfallopfer. Total wurden somit rund

3'250 Personen bei staubedingten Unfällen verletzt und 15 getötet. Der Anteil Unfallverursacher beläuft sich bei den Leichtverletzten auf 21%, bei den Schwerverletzten auf 36% und bei den Getöteten auf 40%.

Tabelle 15: Staubedingte Unfälle und Unfallopfer im Jahr 2010

	Autobahn/ Autostrasse	Übrige Strassen	Total
Unfälle	2'307	3'762	6'069
Leichtverletzte	937	1'959	2'896
Schwerverletzte	89	274	363
Getötete	5	10	15
Total Unfallopfer	1'031	2'243	3'274

In dieser Zusammenstellung sind alle Unfallarten bei der Verkehrsbedingung „starker“ Verkehr mit 50% mitberücksichtigt.

4.3.2. Dunkelziffer

In der vorliegenden Berechnung wurden Dunkelziffern nicht explizit einbezogen. Qualitativ kann dazu Folgendes ausgeführt werden:

- **Personenunfälle:** Die SN 641 824 enthält Dunkelziffern. Die Verwendung dieser Dunkelziffern auf die vorliegende Fragestellung zu den staubedingten Unfällen ist jedoch nicht zulässig, da sich diese auf alle Unfälle und nicht nur staubedingte Unfälle beziehen. Bei staubedingten Unfällen dürfte es sich grossmehrheitlich um Kollisionen (Unfälle mit 2 oder mehr Fahrzeugen) handeln. Bei Kollisionen dürfte die Dunkelziffer deutlich kleiner sein als bei Selbstunfällen. Die Verwendung der Dunkelziffern aus der SN 641 824 würde also zu einer Überschätzung führen. Andererseits führt ein völliger Verzicht bei den Personenschäden zu einer Unterschätzung der staubedingten Unfallkosten. Das Ausmass dieser Unterschätzung lässt sich ohne quantitative Analysen allerdings kaum abschätzen.
- **Sachschäden:** Bei den Sachschäden ist eine durchschnittliche Dunkelziffer bereits im Kostensatz enthalten und es liegen keine Daten vor, welche das Herausrechnen der Dunkelziffer aus dem Kostensatz für Sachschäden erlauben würden. Bei den Sachschäden wirken gegenläufige Effekte auf die Höhe der Dunkelziffer ein: Einerseits dürfte die Dunkelziffer aus denselben Gründen wie bei den Personenschäden eher überschätzt sein. Andererseits ist davon auszugehen, dass die Sachschäden bei Kollisionen eher höher sind als im Durchschnitt, weil mindestens zwei Fahrzeuge betroffen bzw. beschädigt sind und weil zu vermuten ist, dass es relativ viele staubedingte Unfälle gibt, die lediglich zu Sachschäden führen. Insgesamt kann man davon ausgehen, dass der verwendete Kostensatz zu keinen grösseren Verzerrungen führen dürfte.

- Bei den Polizei- und Rechtsfolgekosten kann mit dem normalen Kostensatz gerechnet werden, da insbesondere die Polizeikosten nur bei polizeilich registrierten Unfällen auftreten.

4.4. Wertgerüst: Kostensätze

Die Kostensätze werden aus der Studie Ecoplan/Infras (2014), „Externe Effekte des Verkehrs 2010. Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten“ übernommen (S. 441-445). Dabei ist zu beachten, dass man diejenigen Kostensätze verwenden muss, die auf der gleichen Definition der Verletzungsschweren beruhen wie das Mengengerüst der polizeilich registrierten Unfallopfer. Die verwendeten Kostensätze sind in den folgenden beiden Tabellen dargestellt.

in CHF	Leichtverletzte	Schwerverletzte	Getötete
Medizinische Heilungskosten	1'394	37'504	11'654
Nettoproduktionsausfall	157	7'095	184'639
Wiederbesetzungskosten	-	786	19'438
Administrative Kosten	127	6'753	27'381
Immaterielle Kosten	33'997	408'233	2'699'111
Total	35'675	460'372	2'942'223

in CHF	soziale Kosten
Sachschaden	26'982
Administrativkosten	9'444
Polizeikosten	953
Rechtsfolgekosten	5'862
Administrativkosten Rechtsschutz	715
Total	43'955

4.5. Ergebnisse für die staubedingten Unfallkosten 2010

Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis für die sozialen Kosten im Jahr 2010. Insgesamt treten staubedingte Unfallkosten von 329 Mio. CHF auf. Hinter dieser Zahl stehen folgende Annahmen:

- Auf Autobahnen und Autostrassen werden alle Unfallarten bei stehenden oder stockender Kolonnen sowie 50% der Unfälle bei starkem Verkehr als staubedingt betrachtet.
- Auf den übrigen Strassen werden Auffahrunfälle zu 50% berücksichtigt; von den übrigen Unfallarten werden 50% der Unfälle bei stehendem oder stockendem Kolonnenverkehr ebenfalls als staubedingt gezählt.

Somit sind 58% der staubedingten Unfallkosten auf Unfälle auf Autobahnen und Autostrassen zurückzuführen, 42% auf Unfälle auf den übrigen Strassen. 71% sind Auffahrunfälle, der Rest entfällt auf verschiedene weitere Arten wie Schleuderunfälle, Überholunfälle oder Fahrstreifenwechsel.

Mio CHF/a	AB/AS	übrige Strassen	Total	%
Auffahrunfall	132.4	99.9	232.3	71%
übrige Arten	57.6	38.8	96.3	29%
Total	190.0	138.6	328.6	100%
%	58%	42%	100%	

Sensitivitäten

Wie gross der Anteil der staubedingten Kosten letztlich ist, hängt weitgehend von den oben erwähnten Annahmen ab. Würden die Unfälle im starken Verkehr nicht als staubedingt angesehen, so würden die staubedingten Unfallkosten auf 301 Mio. CHF sinken. Würden hingegen alle Unfälle im starken Verkehr als staubedingt betrachtet, so würden die Unfallkosten auf 862 Mio. CHF steigen. Tabelle 33 und Tabelle 34 in Annex B4 dokumentieren die detaillierten Zahlen dazu.

Vergleich zur bisherigen Staukosten-Studie (ARE 2007)

In der letzten Staukosten-Studie, in der auch Unfallkosten als Teil der Staukosten abgeschätzt wurden (ARE 2007, S. 75-78), wurden nur Auffahrunfälle auf Autobahnen und Autostrassen miteinbezogen. Dies ergab für 2005 soziale Kosten von 121 Mio. CHF. Der am ehesten vergleichbare Wert liegt bei 132 Mio. CHF (vgl. Tabelle 18). Die Vergleichbarkeit wird aber wie folgt erschwert:

- In ARE (2007) wurden alle Auffahrunfälle auf stehende Fahrzeuge und 50% der Auffahrunfälle auf fahrende Fahrzeuge miteinbezogen.

- Hier werden nur die Auffahrunfälle während dem Stau miteinbezogen (je nach Verletzungsschwere 34% bis 64%).

Würden alle Auffahrunfälle auf Autobahnen / Autostrassen betrachtet, ergeben sich für 2005 Kosten von 156 Mio. CHF (ARE 2007, S. 78) und gemäss den vorliegenden Berechnungen 229 Mio. CHF für 2010, wobei in der Zahl für 2005 die Sachschäden etc. vernachlässigt wurden, die in 2010 105 Mio. CHF ausmachen. Die neuen Daten erlauben wie oben erläutert eine viel umfassendere Darstellung der staubdingten Unfallkosten, entsprechend fallen diese auch deutlich höher aus als in der ARE-Studie 2007.

Teil C: Übersicht über Gesamtstaukosten

5. Gesamtstaukosten – Vergleich mit früheren Studien

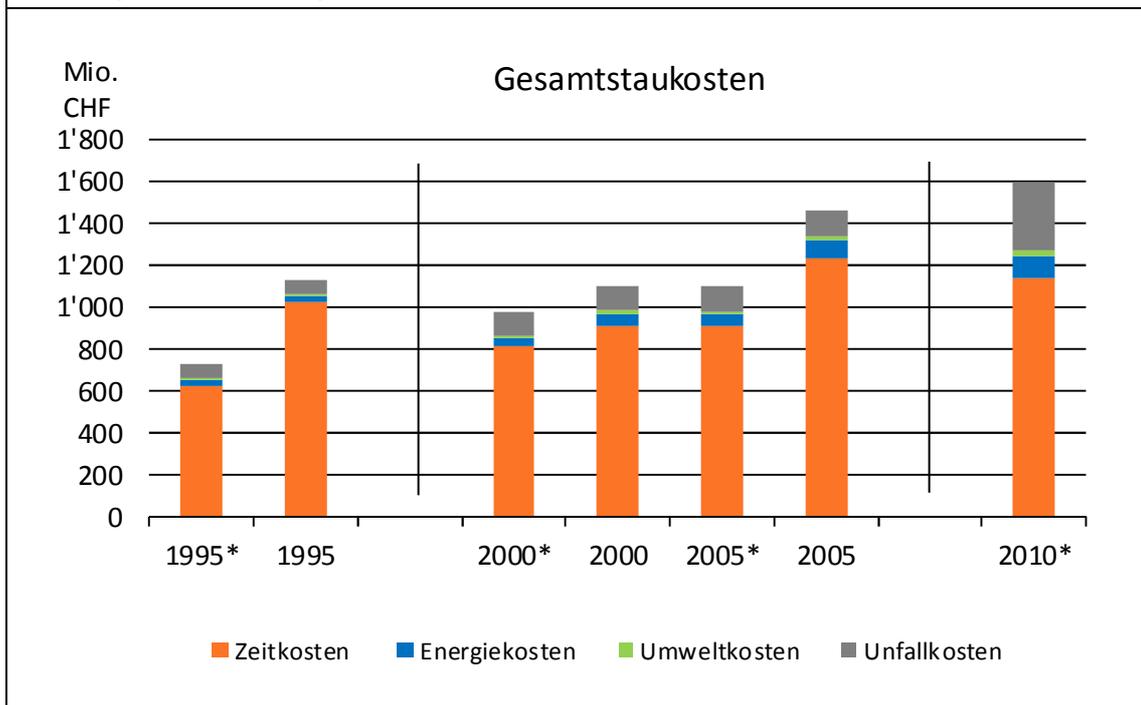
Mittlerweile liegt eine Reihe von Untersuchungen zu den Staukosten vor: die erste Untersuchung datiert aus dem Jahr 1998 mit Fokus auf das Bezugsjahr 1995 (ASTRA 1998). Eine Aktualisierung wurde im Jahr 2007 durchgeführt mit Blick auf die Jahre 2000 und 2005. Eine Sonderstellung nimmt die Untersuchung aus dem Jahr 2012 (ARE 2012) ein: Diese entstand im Rahmen des Rechtsmittelverfahrens, in welchem das Strassentransportgewerbe gegen den Einbezug der Stauzeitkosten in den Abgabetarif der LSVA Beschwerde erhob. Im Rahmen dieses Verfahrens bestätigte das Bundesgericht dessen Rechtmässigkeit und machte Vorgaben, wie die vom Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten zu ermitteln sind. Die Studie 2012 legte den Schwerpunkt deshalb auf Stauzeitkosten und auf die sog. Sichtweise „Verkehrsart“. Die vorliegende Studie schliesslich hat zum Ziel, für das Jahr 2010 erneut eine Gesamtsicht der Staukosten aufzuzeigen (analog zu den Studien 1998 und 2007). Zusätzlich wird für den Teil Stauzeitkosten – und zwar für die Gesamtstauzeitkosten wie auch für die vom Schwerverkehr verursachten Kosten – eine Zeitreihe 2010 bis 2014 ermittelt, auf die in diesem Kapitel aber nicht mehr weiter eingegangen wird (vgl. Abschnitt 2.6).

Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse der Gesamtstaukosten (Stauzeitkosten und staubedingte Umwelt-, Klima-, Energie- und Unfallkosten) für die Jahre 1995, 2000, 2005 und 2010 gemäss den Angaben in den erwähnten Studien im Quervergleich, wobei für die Jahre 1995, 2000 und 2005, wie im Kapitel zu den Stauzeitkosten, jeweils zwei Werte angegeben sind: einmal eine „Sensitivitätsbetrachtung“ ohne Einbezug kleiner Zeitverluste im Nicht-Autobahnbereich (in Abbildung 39 markiert mit einem Stern * nach der Jahreszahl) und einmal eine „Basisrechnung“ unter Einbezug kleiner Zeitverluste. Für das Jahr 2010 wird der Schwerpunkt bewusst auf die Version „ohne Einbezug kleiner Zeitverluste“ gelegt, um – wie in Kapitel 2 erläutert – dem „At least“-Ansatz Rechnung zu tragen, der eher zu einer Unter- denn zu einer Überschätzung der Kosten führt und der im Kontext der Berechnung von externen Kosten üblicherweise zum Zuge kommt. Grundsätzlich zeigt die Abbildung einen kontinuierlichen Anstieg der Staukosten über die Zeitspanne seit 1995. Weil die Datengrundlagen wie auch die Berechnungsmethoden aber teilweise signifikant geändert haben, können die Ergebnisse nur bedingt als Zeitreihe betrachtet werden. Vielmehr hängen die Differenzen zwischen den Jahren stark vom Wechsel von Methodik und Datengrundlagen in den verschiedenen Studien ab, so dass sie nicht zwangsläufig die effektive zeitliche Entwicklung abbilden. Das betrifft die Ermittlung der Mengengerüste wie die Verlustzeiten; dazu kommen andere Elemente wie etwa ein Wechsel der Kostensätze (z.B.

eine Reduktion von 30% bei den Kostensätzen für die Schwere Motorwagen in dieser Studie im Vergleich zur letzten Untersuchung [ARE 2007]).

Auffallend ist, dass andere Komponenten – vor allem die Unfallkosten und teilweise auch die Energiekosten – neu stärker ins Gewicht fallen (der Vergleich wird anhand der Versionen „ohne Einbezug kleiner Zeitverluste“ gemacht, wobei die Unfallkosten in beiden Versionen gleich sind, da diese unabhängig sind von der Differenzierung der Zeitverluste). Die Zeitkosten machten in der letzten Untersuchung rund 80% bis 85% der Gesamtstaukosten aus; neu ist ihr Anteil von rund 70% zwar noch immer die Hauptkomponente. Namentlich die Unfall- und in geringerem Umfang die Energiekosten sind die beiden Komponenten, die aus heutiger Sicht stärker zu Buche schlagen als es noch vor knapp 10 Jahren der Fall war. Letztlich sind es methodische und inputdaten-spezifische Gründe, welche zu diesen Änderungen führen.

Abbildung 39: Abschätzungen von Staukosten für verschiedene Jahre gemäss verschiedenen Studien: ASTRA 1998 für 1995, ARE 2007 für die Jahre 2000 und 2005, die vorliegende Untersuchung ARE/ASTRA für das Jahr 2010.



Die Zahlen zur Abbildung finden sich in Annex C1.
Die Kolonnen mit dem Zusatz „*“ blenden kleine Zeitverzögerungen aus.

Annex A

Annex A1: Netzlängen und Fahrleistungen 2013

2013	Nationalstrassen	davon Autobahnen	Kantonsstrassen	Gemeindestrassen	Sum. Nicht-NatStr.
BFS	1'812	1'419	17'909	51'807	69'716
NPVM	1'908	1'529			19'046
TMC	1'950				17'508
ZSt	656	627			40

Zahlen zur Abbildung 9. Quellen:

BFS: <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/03.html> (Infrastruktur und Streckenlänge).

NPVM: eigene Auswertung des vom ARE zur Verfügung gestellten Datensatzes für 2013.

TMC: eigene Auswertung des vom ASTRA zur Verfügung gestellten Datensatzes für 2013.

ZSt: Summe der den Zählstellen zugeschriebenen Netzabschnittslängen (eigene Zuordnung von TMC-Abschnitten).

Fzkm (Mio)	PW	LI	PW+LI	LW+R'Bus
BFS	53'493	3'874	57'367	2'368
NPVM	51'841	4'878	56'719	2'529
TMC Netz	50'088	4'801	54'889	2'561
ZST	11'885		11'885	723

	PW	LI	PW+LI	LW+R'Bus
BFS	100%	100%	100%	100%
NPVM	97%	126%	99%	107%
TMC Netz	94%	124%	96%	108%
ZST	22%	0%	21%	31%

	PW	LI	PW+LI	LW+R'Bus
BFS/ASTRA	24'867		24'867	1'519
NPVM	22'575	2'736	25'311	1'606
TMC Netz	23'180	2'816	25'996	1'697
ZST	11'712		11'712	716

	PW	LI	PW+LI	LW+R'Bus
BFS/ASTRA	100%		100%	100%
NPVM	91%		102%	106%
TMC Netz	93%		105%	112%
ZST	47%		47%	47%

	PW	LI	PW+LI	LW+R'Bus
BFS/ASTRA	28'625	3'874	32'499	849
NPVM	29'266	2'142	31'408	923
TMC Netz	26'907	1'985	28'893	864
ZST	173	-	173	7

Zahlen zur Abbildung 10. Quellen:

BFS: <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11.html> (Leistungen im Personen- bzw. Güterverkehr).

NPVM: eigene Auswertung des vom ARE zur Verfügung gestellten Datensatzes für 2013.

TMC: eigene Auswertung des um die Nachfrage ergänzten TMC-Datensatzes; eigene Umlage der Nachfrage gemäss NPVM auf das TMC-Netz auf der Basis der „conflation“-Prozedur (Geologix 2014).

ZSt: eigene Auswertung der DTV-Zahlen der Zählstellen, ergänzt mit Abschnittslängen gemäss TMC-Netz, um Fzkm zu ermitteln.

Annex A2: Sensitivitätsrechnung 1: Fahrzeugstautunden/a

Tabelle 21: Daten zur Sensitivitätsrechnung 1

a) Fahrzeugstautunden (in Mio/a) in Abhängigkeit des Verhältnisses von v-Effektiv / v-Referenz
(Zahlen zu Abbildung 19)

Verh. v-eff/ v-Ref	LMW (AB)	LMW (übr.)	LMW (total)	SMW (AB)	SMW (übr.)	SMW (total)
0.40	7.29	1.03	8.32	0.37	0.03	0.40
0.50	8.66	1.99	10.64	0.44	0.05	0.49
0.60	10.12	4.06	14.18	0.50	0.10	0.60
0.65	10.88	5.63	16.50	0.53	0.13	0.66
0.70	11.75	7.94	19.69	0.56	0.17	0.73
0.75	12.92	11.23	24.15	0.59	0.22	0.81
0.80	14.45	16.35	30.80	0.62	0.27	0.89
0.90	20.01	31.61	51.62	0.68	0.32	1.01
1.00	26.98	45.76	72.74	0.74	0.34	1.08

b) Illustration der v-Verteilung (Link TMC +25308, Zollikon -> Zürich)
(Zahlen zu Abbildung 20)

v (km/h)	Std	abs. Summen- häufigkeit	rel. Summen- häufigkeit	Einzelklassen- werte
8	0.0	0.0	0%	0.0%
9	0.2	0	0%	0.0%
11	0.5	1	0%	0.0%
12	0.9	2	0%	0.0%
14	1.7	3	0%	0.0%
16	3.1	6	0%	0.0%
17	4.5	11	0%	0.1%
19	6.8	18	0%	0.1%
20	11.4	29	0%	0.1%
22	20.2	49	1%	0.2%
24	36.2	86	1%	0.4%
25	118.4	204	2%	1.4%
27	246.5	450	5%	2.8%
28	361.6	812	9%	4.1%
30	782.8	1'595	18%	8.9%
32	1'237.0	2'832	32%	14.1%
33	617.3	3'449	39%	7.0%
35	731.4	4'181	48%	8.3%
37	487.8	4'668	53%	5.6%
38	856.1	5'524	63%	9.8%
40	3'228.2	8'753	100%	36.9%
41	4.7	8'757	100%	0.1%
43	1.7	8'759	100%	0.0%
45	0.9	8'760	100%	0.0%
46	0.1	8'760	100%	0.0%

Annex A3: Herleitung der Entwicklung von Staudauer und Fahrzeugstaudunden

Tabelle 22: Herleitung der relativen Entwicklung der Staudauer anhand der Online-Daten

	Staudauer	Anz Fz	Staudauer	Fzkm/a	gew. Ind.	rel. Ind.
		(Mio)	pro Fz	(AB)		
2009	34'155	2'856	11'960	24'527	293	88%
2010	43'617	3'320	13'136	25'161	331	99%
2011	42'677	3'365	12'683	25'874	328	99%
2012	53'999	3'810	14'173	25'947	368	110%
2013	50'789	4'024	12'623	26'386	333	100%
2014	55'307	4'240	13'045	26'890	351	105%

Zahlen zu Abbildung 23. Eigene Auswertung der Online-Daten (Automatische Zählungen/Messungen des ASTRA).

Tabelle 23: Kenngrößen zur Herleitung der Entwicklung der Fahrzeugstaudunden (AB) anhand der Online-Daten

Jahr	Spezif. FzStauStd		Anz Fz (in Mio)		Ind. SpStauStd/Fz		Fzkm/a auf AB		gewicht. (Ind*Fzkm)		rel. Indikator		FzStauStd/a	
	LMW	SMW	LMW	SMW	LMW	SMW	LMW	SMW	LMW	SMW	LMW	SMW	LMW	SMW
2009	771'028	40'037	2'676	179	288	223	23'110	1'417	6'658	316	73%	65%	11.41	0.53
2010	1'166'038	64'778	3'111	209	375	310	23'653	1'508	8'864	467	97%	96%	15.19	0.79
2011	1'184'539	66'577	3'152	213	376	313	24'339	1'535	9'147	480	100%	99%	15.68	0.81
2012	1'405'744	77'369	3'579	231	393	334	24'436	1'511	9'599	505	105%	104%	16.45	0.85
2013	1'395'711	72'702	3'796	227	368	320	24'867	1'519	9'142	486	100%	100%	15.67	0.82
2014	1'530'984	79'859	4'004	236	382	339	25'364	1'526	9'698	517	106%	106%	16.62	0.87

Zahlen zu Abbildung 23. Eigene Auswertungen.

Annex A4: Entwicklung der Fahrzeugstautunden

Tabelle 24: Fahrzeugstautunden aktualisiert und im Vergleich zu den bisher verwendeten Werten gemäss der Studie 2012 (ARE 2012)								
		Fahrzeugstautunden (Mio/a)						
		AB		NichtAB		total		total
		LMW	SMW	LMW	SMW	LMW	SMW	alle
Aktualisiert	2009	11.41	0.53	11.23	0.22	22.64	0.75	23.39
"	2010	15.19	0.79	11.23	0.22	26.42	1.00	27.42
"	2011	15.68	0.81	11.23	0.22	26.90	1.03	27.93
"	2012	16.45	0.85	11.23	0.22	27.68	1.07	28.75
"	2013	15.67	0.82	11.23	0.22	26.90	1.04	27.93
"	2014	16.62	0.87	11.23	0.22	27.85	1.09	28.94
bisher	2009	12.40	1.08	14.10	0.28	26.5	1.4	27.9

Zahlen zu Abbildung 24.

Annex A5: Kenngrössen zur Herleitung der Kostensätze

Die aktualisierten Kostensätze orientieren sich an den drei VSS-Normen aus dem Kontext von Kosten-Nutzen-Analysen SN 641 822a (Zeitkosten Personenverkehr), SN 641 823 (Zeitkosten Güterverkehr) und SN 641 827 (Betriebskosten von Strassenfahrzeugen). Sie wurden für die Zeitreihe 2009-2014 ermittelt; die Angaben verstehen sich in Preisen für die jeweiligen Jahre. Konkret wurden die Kostensätze wie folgt berechnet (vgl. Tabelle 25):

- PW: der über alle Fahrtzwecke gemittelte Zeitwert gemäss Norm SN 641 822a beträgt 23.29 CHF/Personen-Stunde. Dieser Wert bezieht sich auf das Jahr 2007. Die Werte für die Folgejahre wurden auf der Basis der Nominallohnentwicklung hochgerechnet. Die Umrechnung von Zeitkosten pro Personen-Stunde in Zeitkosten pro Fahrzeug-Stunde erfolgte anhand von mittleren Besetzungsgraden, die aus Angaben des BFS (Pkm/Fzkm) abgeleitet wurden.
- Lieferwagen: Die Ermittlung dieser Werte basiert auf der Norm SN 641 827. Die Normwerte beziehen sich auf das Jahr 2005 (34.99 CHF/Fz-Std.). Die reallohnunabhängige Komponente wurde für die Folgejahre anhand der Teuerung (LIK) hochgerechnet, die reallohnabhängige anhand der Nominallohnentwicklung.
- SNF: der Kostensatz der Schweren Nutzfahrzeuge umfasst Betriebs- wie auch Zeitkostenkomponenten. Die Betriebskosten basieren auf der Norm SN 641 827 und beziehen sich auf das Jahr 2005 (fahrleistungsgewichteter Mittelwert von CHF 46.21/Fahrzeug-Std.). Die reallohnunabhängige Komponente wurde für die Folgejahre anhand der Teuerung (LIK) hochgerechnet, die reallohnabhängige Komponente anhand der Nominallohnentwicklung. Dazu kommt die Zeitkostenkomponente, welche die Verladersicht bzw. deren Zahlungsbereitschaft für Transportzeitverkürzungen repräsentiert. Die Norm SN 641 823 (Zeitkosten Güterverkehr) weist dafür einen Wert von CHF 15.03 pro Fahrzeug-Std. aus (Bezugsjahr 2005), welcher anhand der Teuerung (LIK) für die Folgejahre fortgeschrieben wurde.
- Car / Reisebusse: Auch dieser Kostensatz umfasst Betriebs- wie Zeitkostenkomponenten. Die Betriebskosten basieren auf der Norm SN 641 827 (CHF 58.08 pro Fahrzeug-Std. mit Bezugsjahr 2005). Die reallohnunabhängige Komponente wurde für die Folgejahre anhand der Teuerung (LIK) hochgerechnet, die reallohnabhängige Komponente anhand der Nominallohnentwicklung. Die zusätzliche Zeitkomponente der Passagiere basiert auf Angaben aus der Norm SN 641 822a (Zeitkosten Personenverkehr). Konkret wurde ein Kostensatz von 12.01 CHF/Personen-Stunde eingesetzt (Bezugsjahr 2007), entsprechend dem Kostensatz für Freizeitfahrten im öffentlichen Verkehr, da Reisebusse diesbezüglich eher mit dem öffentlichen Verkehr als mit dem motorisierten Individualverkehr vergleichbar sind. Dieser Wert wurde

für die Folgejahre auf der Basis der Nominallohnentwicklung fortgeschrieben. Der Besetzungsgrad von Reisebussen wurde aus Angaben des BFS (Pkm/FzKm) abgeleitet (rund 21 Pers./Reisebus) und um den Fahrer, d.h. 1 Person, reduziert (d.h. rund 20 Pers./Reisebus).

- PW und Lieferwagen wurden schliesslich entsprechend ihrer Fahrleistungsanteile zusammengefasst, ebenso wurden auch Schwere Nutzfahrzeuge und Reisebusse entsprechend ihren Fahrleistungsanteilen gewichtet.

Tabelle 25 zeigt die resultierenden Kostensätze für die jeweiligen Jahre sowie die für die Hochrechnung benötigten Zusatzindikatoren.

Kostensätze in CHF/Std.	2009	2010	2011	2012	2013	2014
PW	39.7	40.2	40.6	41.0	41.4	41.7
LI	37.4	37.8	38.1	38.4	38.7	39.0
LMW (Fzkm-gewichtet)	39.6	40.1	40.5	40.9	41.2	41.6
SNF	64.9	65.4	65.9	66.2	66.5	66.8
Car/Reisebus	313.5	316.0	318.8	321.3	323.4	325.5
SMW (Fzkm-gewichtet)	77.6	78.1	78.9	79.6	80.0	80.8
Verkehrsindikatoren	2009	2010	2011	2012	2013	2014
PWKm (Mio/a)	50'373	50'949	51'575	52'582	53'493	54'313
LIKm (Mio/a)	3'558	3'643	3'795	3'956	3'874	3'998
%PW	93.4%	93.3%	93.1%	93.0%	93.2%	93.1%
%LI	6.6%	6.7%	6.9%	7.0%	6.8%	6.9%
SNFKm (Mio/a)	2'164	2'226	2'258	2'229	2'243	2'236
Car/RbusKm (Mio/a)	116	118	122	124	125	128
%SNF	94.9%	95.0%	94.9%	94.7%	94.7%	94.6%
%Car/Rbus	5.1%	5.0%	5.1%	5.3%	5.3%	5.4%
Besetzungsgrad PW	1.64	1.64	1.65	1.65	1.65	1.65
Besetzungsgrad Car/Rbus (-1)	20.13	20.12	20.12	20.12	20.12	20.10
Weitere Indikatoren	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Teuerung/LIK (ggü. Vorjahr)	99.5%	100.7%	100.3%	99.3%	99.8%	99.9%
Nominallohn (ggü. Vorjahr)	102.1%	100.8%	100.9%	100.9%	100.7%	100.8%
Reallohn (ggü. Vorjahr)	102.8%	100.0%	101.0%	101.3%	101.0%	101.0%

Annex A6: Entwicklung der Stauzeitkosten

Tabelle 26: Stauzeitkosten aktualisiert und im Vergleich zu den bisher verwendeten Werten gemäss der Studie 2012 (ARE 2012) [Werte gerundet]

		Stauzeitkosten (Mio CHF/a)						
		AB		NichtAB		total	total	total
		LMW	SMW	LMW	SMW	LMW	SMW	alle
Aktualisiert	2009	451	41	444	17	896	58	954
"	2010	609	61	450	17	1'059	78	1'137
"	2011	634	64	454	17	1'089	81	1'170
"	2012	672	68	459	17	1'131	85	1'216
"	2013	646	66	463	17	1'108	83	1'191
"	2014	691	70	467	18	1'157	88	1'245
bisher	2009	404	125	420	33	824	158	982

Zahlen zu Abbildung 25.

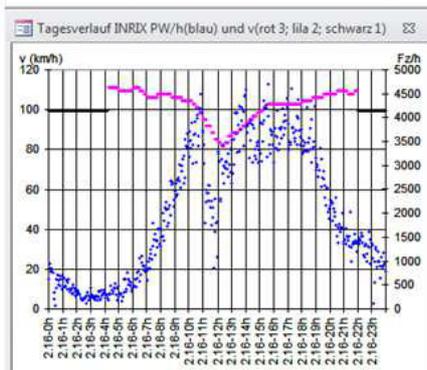
Annex A7: Datengrundlagen INRIX: der Einfluss von „Scores“

Die Geschwindigkeitsangaben von INRIX sind differenziert nach sog. Scores: je nach Datenverfügbarkeit liegen den Daten Real-time-Werte (=Score 30) zugrunde, modellierte Werte (=Score 20; NAS [=Nationwide Average Speeds], einer Modellierung aus historischen und Real-time-Daten) oder „freelfow“-Werte (=Score10). Die nachstehende Abbildung zeigt illustrativ anhand von zur Verfügung stehenden einzelnen Datensätzen, welche sowohl Score 20 als auch Score 30 enthielten, für zwei Strecken bzw. Tage den Vergleich der beiden Angaben. Demnach scheint die Modellierung für den Fall von hier speziell interessierenden Stausituationen eine systematische Überschätzung der Geschwindigkeiten auszuweisen, was entsprechend zu einer Unterschätzung von Verlustzeiten führt.

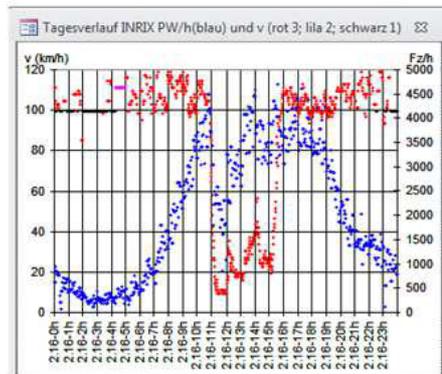
Abbildung 40: Vergleich von Daten mit „Score 20“ (= modellierte Daten, Mix aus historischen und real-time-Daten) und den Daten für den gleichen Ort bzw. Zeitpunkt mit „Score 30“ (real-time-Daten)

Bp. Muttenz A2, TMC-Link +10423, 16.2.2013

INRIX (modellierte Daten)

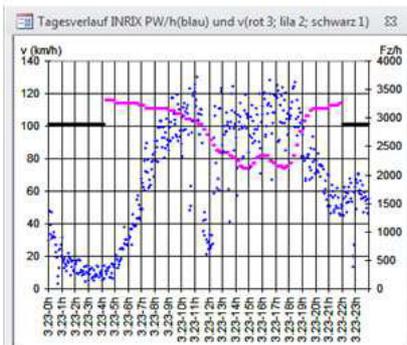


INRIX (inkl. real time data)

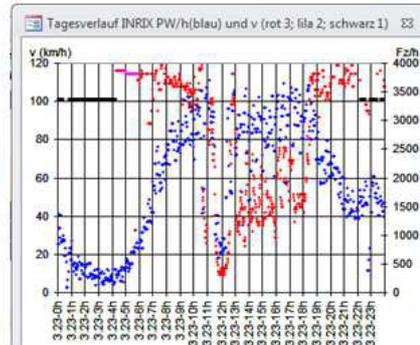


Bp. A1 Nordumfahrung Zürich, TMC-Link -10284, 23.3.2013

INRIX (modellierte Daten)



INRIX (inkl. real time data)



Annex A8: Erläuterungen zum Schwerverkehrsgewichtungsfaktor

Der Schwerverkehrsgewichtungsfaktor spielt bei der Ermittlung der Staukosten keine Rolle, hingegen sehr wohl bei der Berechnung des Anteils der durch den Schwerverkehr verursachten Stauzeitkosten. Die hier verwendete Methodik basiert im Wesentlichen auf den Capacity-Restrain-Funktionen. Diese bilden die Zunahme des Zeitbedarfs in Abhängigkeit der Auslastung auf den jeweiligen Strassenabschnitten ab. Die Auslastung ihrerseits ist das Verhältnis zwischen Nachfrage (in Fahrzeugen/Std.) und Kapazität. Für die Ermittlung der Nachfrage werden alle Fahrzeugkategorien in ein einheitliches Mass überführt. Üblicherweise wird von „Personenwageneinheiten“ gesprochen. Der Schwerverkehrsgewichtungsfaktor macht eine Aussage zur Äquivalenz von PW und Schwerverkehrsfahrzeugen. In der Studie 2012 wurde dafür der Faktor 2.5 PWE/Schwerverkehrsfahrzeug verwendet.

Im Rahmen des Rechtsmittelverfahrens, in welchem das Strassentransportgewerbe gegen den Einbezug der Stauzeitkosten in den Abgabetarif der LSVa Beschwerde erhob, wurde u.a. diese Annahme kritisiert und ein Faktor von 2.0 PWE/Schwerverkehrsfahrzeug postuliert. Das entsprechende Gutachten (ProgTrans 2011, Teilbericht 1, S. 21) hält allerdings explizit fest, dass „ein SMW (Schweres Motorfahrzeug) sich hinsichtlich Stauveranlassung im Mittel äquivalent verhält wie etwa 2.5 PW“. Der Faktor 2.0 wird begründet mit dem Umstand, dass die Bezugsbasis nicht PW, sondern „LMW“ (leichte Motorwagen, also PW einschliesslich Lieferwagen, Kleinbusse und PW mit Anhänger) umfasse, weshalb die LMW einem Äquivalent von 1.25 PW entsprechen. In der Folge betrage das Verhältnis „SMW“ zu „LMW“ 2.0 : 1. Folgt man dieser Argumentation und setzt beispielsweise für die Gruppe der Lieferwagen, Kleinbusse und PW mit Anhänger einen (eher hohen) Wert von 1.5 ein und geht gleichzeitig von einem (eher hohen) Anteilswert an der Fahrleistung von 10% aus⁴⁰, so ergibt sich für die Gruppe „LWM“ (PW+Lieferwagen u.a.) ein Wert von 1.05 und in der Folge ein Gewichtungswert „SMW“ zu „LMW“ von 2.38 zu 1 – und nicht 2.0 zu 1.

Der Wert von 2.5 wurde in Anlehnung an verschiedene Literatur-Quellen gewählt. Beispielsweise rechnet CE (2009) im Kontext von Stauberechnungen mit folgenden Gewichtungsfaktoren:

⁴⁰ Gemäss BFS machen die Lieferwagen 6.8% aus (für 2013: 53.5 Mrd. PWkm, 3.87 LNFkm). Für die übrigen (Kleinbusse und PW mit Anhänger) unterstellen wir hier weitere 3.2%, so dass der Anteil dieser Gruppe insgesamt 10% ausmacht.

PCEs of various modes	
Car	1
Motor-cycle	0.5
Bus	2
Van	1.5
HGV 3.5-7.5 t	2
HGV 7.5-16 t	2.5
HGV 16-32 t	3
HGV >32 t	3.5

Quelle: CE (2009), Kap. 4.7, Tab. 4

Gewichtet man die verschiedenen Gewichtsklassen der HGV (Heavy Goods Vehicles) mit ihrer Fahrleistung gemäss einer Auswertung von LSVA-Daten (Datensatz BAV), so resultiert ein Faktor von 3.1, also ein deutlich höherer Wert als die ursprünglich angenommenen 2.5.

Eine Forschungsstudie, welche sich mit Fahrmustern auf überlasteten Autobahnen beschäftigt (J+G/IVT 2010) zeigt, dass hohe Anteile von Fahrzeugen des Schwerverkehrs im Bereich höherer Verkehrsstärken zu einer deutlichen Absenkung des Geschwindigkeitsniveaus führen. Aus dort gezeigten Daten (J+G/IVT 2010, Abb.5.3, Kap. 5.3.4) kann man indirekt herauslesen, dass die Angaben kongruent sind mit einem PWE-Faktor von 2.6⁴¹.

Morlok nennt für „Trucks“ einen Wert von 2.0 für die Ebene, von 4.0 für hügeliges Gelände („rolling terrain“) und von 8.0 für gebirgiges Gelände („mountainous terrain“) [Morlok 1978, Kap. 5, Tab. 5-1]. Gewichtet man diese Werte mit Fahrleistungsanteilen von 80% für ebenes Gelände, 17.5% für hügeliges und 2.5% für gebirgiges Gelände⁴², so resultiert ein Wert von 2.5.

Trotzdem wird in der vorliegenden Studie ein Wert von 2.0 unterstellt, um dem „At least“-Ansatz Rechnung zu tragen, denn auch dieser Wert wird in der Literatur zuweilen genannt. So erwähnen beispielsweise Lindenmann und Spacek (2008, S. 4.32)⁴³ Fahrzeug-Äquivalente, die fahrleistungsgewichtet einen Wert von rund 2.0 ergeben.

⁴¹ Vergleich zweier Punkte mit unterschiedlichen Schwerverkehrsanteilen (10% bzw. 20%) und gleicher Geschwindigkeit ($v=80$ km/h bei signalisierter Geschwindigkeit von 120 km/h)

⁴² In Anlehnung an Auswertungen, wie sie für Energie- und Emissionsberechnungen verwendet werden (BAFU 2010a, BAFU 2010b): Verteilung der SNF-Fahrleistung Schweiz nach Neigungsklassen gemäss Handbuch für Emissionsfaktoren.

⁴³ Lindenmann und Spacek (2008) nennen für LW einen Wert von 1.5 und für Lastenzüge 2.0 bei Längsneigung 0%. Bei höheren Neigungen steigen die mittleren Werte (+% bzw. -% gemittelt) an, so dass ein nach Fahrzeugart und Längsneigung differenzierter, fahrleistungsgewichteter Wert von 2.0 resultiert.

Annex A9: Abschätzung von Zeitverlusten und Stauzeitkosten gemäss verschiedenen Untersuchungen

Tabelle 27: Abschätzungen von Zeitverlusten und Stauzeitkosten für verschiedene Jahre gemäss verschiedenen Studien: Daten 1995 gemäss ASTRA 1998, Daten 2000 und 2005 gemäss ARE 2007, Daten 2010 und 2014 gemäss der vorliegenden Untersuchung.								
Zeitverluste in Mio. Fz-Std.								
	1995*	1995	2000*	2000	2005*	2005	2010*	2014*
LMW	13.3	22.5	18.1	26.9	23.5	33.2	26.4	27.8
SMW	0.3	0.4	0.9	1.1	1.5	1.8	1.0	1.1
Total	13.6	22.9	19.0	28.0	25.0	35.0	27.4	28.9
Stauzeitkosten in Mio. CHF								
	1995*	1995	2000*	2000	2005*	2005	2010*	2014*
LMW	600	993	690	785	742	1'035	1'059	1'157
SMW	30	35	126	126	170	204	78	88
Total	630	1028	817	911	912	1'240	1'137	1'245

Zahlen zu Abbildung 31.

PS: Kolonnen mit einem „*“ nach der Jahreszahl blenden kleine Zeitverzögerungen aus. In den Untersuchungen ASTRA 1998 und ARE 2007 wurden diese Versionen als „Sensitivitäten“ bezeichnet, die Kolonnen ohne „*“ als „Basisrechnungen“.

Annex B

Annex B1: Grundlagen Umweltkosten

Emissionsfaktoren, Total AB und nicht-AB (BAFU 2010a, eigene Berechnungen)

PM10					
g/km	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	
PW	0.05	0.04	0.06	0.07	
SNF (LW+SS)	0.17	0.29	0.58	0.79	
Lieferwagen	0.10	0.08	0.10	0.13	
Zweiräder	0.01	0.01	0.01	0.01	
ÖV-Busse	0.41	0.53	0.69	0.74	
Car (Reisebus)	0.22	0.45	0.64	0.91	

NOx					
g/km	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	
PW	0.31	0.30	0.38	0.56	
SNF (LW+SS)	4.11	5.37	9.05	13.05	
Lieferwagen	1.22	0.89	1.00	1.16	
Zweiräder	0.23	0.09	0.08	0.08	
ÖV-Busse	10.31	11.29	13.69	15.95	
Car (Reisebus)	5.47	8.21	11.68	20.25	

SO2					
g/km	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	
PW	0.0010	0.0010	0.0013	0.0018	
SNF (LW+SS)	0.0046	0.0049	0.0072	0.0094	
Lieferwagen	0.0014	0.0013	0.0016	0.0021	
Zweiräder	0.0005	0.0004	0.0005	0.0005	
ÖV-Busse	0.0072	0.0076	0.0090	0.0092	
Car (Reisebus)	0.0047	0.0059	0.0076	0.0119	

NH3					
g/km	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	
PW	0.049	0.046	0.039	0.036	
SNF (LW+SS)	0.003	0.003	0.003	0.003	
Lieferwagen	0.017	0.019	0.016	0.015	
Zweiräder	0.002	0.002	0.002	0.002	
ÖV-Busse	0.003	0.003	0.003	0.003	
Car (Reisebus)	0.003	0.003	0.003	0.003	

NMHC					
g/km	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	
PW	0.030	0.037	0.053	0.077	
SNF (LW+SS)	0.131	0.183	0.338	0.542	
Lieferwagen	0.065	0.069	0.094	0.144	
Zweiräder	1.033	1.406	1.574	1.731	
ÖV-Busse	0.302	0.331	0.499	0.546	
Car (Reisebus)	0.199	0.349	0.521	0.908	

CO2					
g/km	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	
PW	181.6	183.8	222.6	335.2	
SNF (LW+SS)	716.9	771.7	1021.4	1474.9	
Lieferwagen	236.9	221.9	254.8	346.3	
Zweiräder	97.1	85.8	89.2	100.8	
ÖV-Busse	1183.9	1238.0	1464.3	1493.6	
Car (Reisebus)	740.0	924.7	1189.7	1867.1	

Treibstoffverbrauch					
g/km	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	
PW	57.8	58.5	70.8	106.7	
SNF (LW+SS)	227.6	245.0	324.3	468.2	
Lieferwagen	75.3	70.5	80.9	110.0	
Zweiräder	30.9	27.3	28.4	32.1	
ÖV-Busse	377.8	395.1	467.2	476.5	
Car (Reisebus)	234.9	293.5	377.7	592.7	

Die Definition der Verkehrssituation Autobahn, LOS 3 aus HBEFA 3.1 entspricht nicht der Definition von „stockendem Kolonnenverkehr“ der vorliegenden Studie. Deshalb wurde der Emissionsfaktor für LOS 3 angepasst (gewichtetes Mittel aus LOS 3 und LOS 4).

Annex B2: Eckwerte Verkehrs- und Emissionsmengengerüst

Fahrleistungen nach Verkehrsqualitätsstufen im Jahr 2010					
Mio. Fzkm/Jahr	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	Total
PW	38'330	17'365	1'292	431	57'418
Lieferwagen	2'567	931	81	27	3'607
SNF (LW+SS)	1'789	446	52	17	2'304
Car (Reisebus)	85	31	3	1	119
ÖV-Busse	118	125	6	2	250
Zweiräder	1'350	986	54	18	2'409
Total	44'238	19'885	1'487	496	66'107
PW	66.8%	30.2%	2.3%	0.8%	100.0%
Lieferwagen	71.2%	25.8%	2.3%	0.8%	100.0%
SNF (LW+SS)	77.6%	19.4%	2.3%	0.8%	100.0%
Car (Reisebus)	71.1%	25.9%	2.3%	0.8%	100.0%
ÖV-Busse	47.1%	49.9%	2.3%	0.8%	100.0%
Zweiräder	56.0%	41.0%	2.3%	0.8%	100.0%
Total	66.9%	30.1%	2.3%	0.8%	100.0%

Quelle: BAFU 2010b, eigene Berechnungen

Emissionsanteile (%) nach Verkehrsqualitätsstufen im Jahr 2010					
PM (Auspuff)	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	Total
PW	70%	26%	3%	1%	100%
Lieferwagen	75%	22%	2%	1%	100%
SNF (LW+SS)	64%	27%	6%	3%	100%
Car (Reisebus)	64%	27%	6%	3%	100%
ÖV-Busse	70%	26%	3%	1%	100%
Zweiräder	70%	26%	3%	1%	100%
Total	70%	26%	3%	1%	100%
NOx	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	Total
PW	67%	29%	3%	1%	100%
Lieferwagen	77%	21%	2%	1%	100%
SNF (LW+SS)	71%	23%	4%	2%	100%
Car (Reisebus)	71%	23%	4%	2%	100%
ÖV-Busse	67%	29%	3%	1%	100%
Zweiräder	67%	29%	3%	1%	100%
Total	69%	26%	3%	1%	100%
SO2	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	Total
PW	65%	30%	3%	1%	100%
Lieferwagen	72%	25%	3%	1%	100%
SNF (LW+SS)	75%	20%	3%	1%	100%
Car (Reisebus)	75%	20%	3%	1%	100%
ÖV-Busse	65%	30%	3%	1%	100%
Zweiräder	65%	30%	3%	1%	100%
Total	67%	28%	3%	1%	100%
NH3	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	Total
PW	69%	29%	2%	1%	100%
Lieferwagen	69%	28%	2%	1%	100%
SNF (LW+SS)	78%	19%	2%	1%	100%
Car (Reisebus)	78%	19%	2%	1%	100%
ÖV-Busse	69%	29%	2%	1%	100%
Zweiräder	69%	29%	2%	1%	100%
Total	69%	29%	2%	1%	100%
NMVOc	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	Total
PW	61%	33%	4%	2%	100%
Lieferwagen	69%	27%	3%	1%	100%
SNF (LW+SS)	69%	24%	5%	2%	100%
Car (Reisebus)	69%	24%	5%	2%	100%
ÖV-Busse	61%	33%	4%	2%	100%
Zweiräder	61%	33%	4%	2%	100%
Total	63%	32%	4%	2%	100%
CO2	LOS 1	LOS 2	LOS 3	LOS 4	Total
PW	66%	30%	3%	1%	100%
Lieferwagen	72%	25%	2%	1%	100%
SNF (LW+SS)	75%	20%	3%	1%	100%
Car (Reisebus)	75%	20%	3%	1%	100%
ÖV-Busse	66%	30%	3%	1%	100%
Zweiräder	66%	30%	3%	1%	100%
Total	67%	29%	3%	1%	100%

Quelle: BAFU 2010b, eigene Berechnungen

Annex B3: Ergebnisse Umwelt-, Klima- und Energiekosten

Tabelle 28: Staubedingte Umwelt-, Klima- und Energiekosten in Mio. CHF - 2010							
	PW	Lieferwagen	SNF (LW+SS)	Car (Reisebus)	ÖV-Bus	ZR	Total
Gesundheit Luft	6.4	0.3	4.5	0.3	0.3	0.0	11.9
Gebäude Luft	1.3	0.1	0.9	0.1	0.1	0.0	2.4
Ernteaussfälle Luft	0.2	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.5
Waldschäden Luft	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.4
Biodiversitätsverluste Luft	0.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	1.2
Klima	10.5	0.5	2.6	0.2	0.3	0.2	14.2
Total Umwelt	8.6	0.4	6.5	0.5	0.4	0.0	16.5
Total Klima + Umwelt	19.1	0.9	9.1	0.6	0.7	0.3	30.7
Total Energie	81.3	3.2	17.8	1.3	1.3	0.3	105.2

Basisrechnung

Annex B4: Detaillierte Ergebnisse zu den Unfallkosten

	Unfälle		Leichtverletzte		Schwerverletzte		Getötete	
	Autobahn / Autostrasse	Übrige Strassen						
Schleuder- oder Selbstunfall	7.38%	1.92%	8.11%	2.58%	10.22%	2.50%	4.11%	0.77%
Überholunfall oder Fahrstreifenwechsel	31.60%	13.90%	24.04%	10.47%	14.81%	11.39%	15.63%	6.67%
Auffahrunfall	63.47%	23.91%	63.81%	28.94%	53.79%	22.16%	34.21%	23.81%
Abbiegeunfall	13.04%	10.93%	26.92%	10.94%	0.00%	12.61%	0.00%	13.04%
Einbiegeunfall	8.45%	8.29%	10.71%	7.64%	0.00%	8.05%	0.00%	1.92%
Überqueren der Fahrbahn	0.00%	5.47%	0.00%	5.11%	0.00%	5.03%	0.00%	3.33%
Frontalkollision	9.23%	3.00%	10.14%	3.49%	4.31%	4.41%	9.52%	1.85%
Parkierunfall	6.98%	1.21%	9.09%	6.21%	0.00%	7.38%	0.00%	0.00%
Fussgängerunfall	6.52%	7.32%	0.00%	7.62%	7.14%	7.29%	5.56%	6.08%
Tierunfall	3.05%	1.97%	0.00%	0.61%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Andere	11.87%	3.03%	11.29%	8.19%	0.00%	2.80%	0.00%	2.78%

Tabelle 30: Anzahl staubedingte Unfälle und Unfallopfer nach Unfall- und Strassentyp und Verletzungsschwere: Unfallverursacher 2010								
Unfallverursacher	Unfälle		Leichtverletzte		Schwerverletzte		Getötete	
	Autobahn / Autostrasse	Übrige Strassen						
Schleuder- oder Selbstunfall	Aufteilung auf		51	76	13.6	30.2	0.4	0.8
Überholunfall oder Fahrstreifenwechsel	Unfallverursacher und		10	17	1.5	6.7	0.2	0.3
Auffahrunfall	Nicht-Unfallverursachern		126	188	12.4	24.6	0.7	1.2
Abbiegeunfall	nicht nötig		1	40	-	10.3	-	0.5
Einbiegeunfall			0	35	-	6.8	-	0.1
Überqueren der Fahrbahn			-	17	-	4.2	-	0.2
Frontalkollision			2	11	0.4	5.8	0.4	0.4
Parkierunfall			-	1	-	0.5	-	-
Fussgängerunfall			-	28	0.1	11.0	0.1	0.6
Tierunfall			-	0	-	-	-	-
Andere			0	8	-	1.4	-	0.2
Total	-	-	191	420	27.9	101.6	1.7	4.3

Tabelle 31: Anzahl staubedingte Unfälle und Unfallopfer nach Unfall- und Strassentyp und Verletzungsschwere: Nicht-Verursacher 2010								
Nicht-Unfallverursacher	Unfälle		Leichtverletzte		Schwerverletzte		Getötete	
	Autobahn / Autostrasse	Übrige Strassen						
Schleuder- oder Selbstunfall	Aufteilung auf		36	39	7.5	7.7	0.2	0.2
Überholunfall oder Fahrstreifenwechsel	Unfallverursacher und		38	50	2.4	12.9	-	0.5
Auffahrunfall	Nicht-Unfallverursachern		666	995	50.0	34.8	2.4	0.5
Abbiegeunfall	nicht nötig		2	135	-	38.6	-	0.8
Einbiegeunfall			1	137	-	23.6	-	0.2
Überqueren der Fahrbahn			-	38	-	7.7	-	0.1
Frontalkollision			4	22	0.8	7.8	0.4	0.2
Parkierunfall			-	5	-	1.0	-	-
Fussgängerunfall			-	103	0.1	37.5	0.1	3.3
Tierunfall			-	0	-	-	-	-
Andere			1	15	-	1.1	-	0.1
Total	-	-	746	1'539	60.8	172.7	3.1	5.9

Tabelle 32: Anzahl staubedingte Unfälle und Unfallopfer nach Unfall- und Strassentyp und Verletzungsschwere: Total 2010								
Total	Unfälle		Leichtverletzte		Schwerverletzte		Getötete	
	Autobahn / Autostrasse	Übrige Strassen						
Schleuder- oder Selbstunfall	316	335	86	115	21.1	38.0	0.6	1.0
Überholunfall oder Fahrstreifenwechsel	447	360	48	67	3.9	19.6	0.2	0.9
Auffahrunfall	1'509	1'800	792	1'183	62.4	59.4	3.1	1.7
Abbiegeunfall	2	342	2	175	-	48.9	-	1.3
Einbiegeunfall	3	421	1	172	-	30.4	-	0.3
Überqueren der Fahrbahn	-	118	-	55	-	11.9	-	0.3
Frontalkollision	8	67	6	33	1.2	13.5	0.8	0.6
Parkierunfall	2	50	-	6	-	1.5	-	-
Fussgängerunfall	1	172	-	131	0.2	48.6	0.2	3.9
Tierunfall	6	32	-	0	-	-	-	-
Andere	12	65	1	23	-	2.6	-	0.3
Total	2'307	3'762	937	1'959	88.7	274.2	4.8	10.2
Anteil staubedingte Unfälle an allen Unfällen	26.9%	7.5%	35.9%	11.4%	23.1%	6.7%	12.7%	3.5%
Anteil Unfallverursacher innerhalb staubedingter Unfälle			20.3%	21.4%	31.5%	37.0%	36.1%	42.1%

Tabelle 33: Soziale Kosten der staubedingten Unfälle – Sensitivitäten 2010

Soziale Kosten in Mio. CHF	Starker Verkehr nicht staubedingt			Starker Verkehr vollständig staubedingt		
	Autobahn / Autostrasse	Übrige Strassen	Total	Autobahn / Autostrasse	Übrige Strassen	Total
Schleuder- oder Selbstunfall	3.8	10.4	14.1	53.1	68.2	121.4
Überholunfall oder Fahrstreifenwechsel	10.9	13.6	24.5	36.3	46.0	82.3
Auffahrunfall	100.4	107.4	207.8	164.4	199.7	364.1
Abbiegeunfall	0.1	20.8	20.9	0.2	74.5	74.7
Einbiegeunfall	0.0	11.1	11.1	0.3	67.6	67.9
Überqueren der Fahrbahn	-	4.5	4.5	-	22.5	22.5
Frontalkollision	0.3	1.6	1.9	6.4	22.4	28.8
Parkierunfall	0.0	1.2	1.3	0.1	4.9	5.1
Fussgängerunfall	-	12.7	12.7	1.6	79.4	81.0
Tierunfall	-	0.0	0.0	0.6	2.8	3.3
Andere	0.1	1.6	1.6	1.1	9.9	11.0
Total	115.7	184.9	300.6	264.2	597.8	862.0

Tabelle 34: Soziale Kosten der staubedingten Unfälle – Sensitivitäten (zusammengefasst) 2010

Mio CHF/a	bei stehender oder stock. Kolonne			bei starkem Verkehr			inkl. starkem Verkehr (vollstd.)		
	AB/AS	übrige Strassen	Total	AB/AS	übrige Strassen	Total	AB/AS	übrige Strassen	Total
Auffahrunfall	100.4	107.4	207.8	64.0	92.3	156.3	164.4	199.7	364.1
übrige Arten	15.3	77.5	92.8	84.5	320.6	405.1	99.8	398.1	497.9
Total	115.7	184.9	300.6	148.5	412.9	561.4	264.2	597.8	862

Annex C

Annex C1: Abschätzung von Gesamtstaukosten in verschiedenen Untersuchungen

Tabelle 35: Abschätzungen von Staukosten für verschiedene Jahre gemäss verschiedenen Studien: Daten 1995 gemäss ASTRA 1998, Daten 2000 und 2005 gemäss ARE 2007, Daten 2010 gemäss der vorliegenden Untersuchung.							
Mio. CHF	1995*	1995	2000*	2000	2005*	2005	2010*
Zeitkosten	630	1'028	817	911	912	1'240	1'137
Energiekosten	29	29	38	61	55	84	105
Umweltkosten	5	5	10	14	15	20	30
Unfallkosten	68	68	115	115	121	121	329
Total Staukosten	732	1'130	980	1'102	1'103	1'464	1'601

Zahlen zu Abbildung 39

Die Kolonnen mit dem Zusatz „*“ blenden kleine Zeitverzögerungen aus.

Abkürzungsverzeichnis

AB	Autobahnen
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
ASTAG	Schweizerischer Nutzfahrzeugverband
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAV	Bundesamt für Verkehr
BFS	Bundesamt für Statistik
CR	Capacity Restraint-Funktion
DTV	Durschschnittlicher täglicher Verkehr
FCD	Floating car data
FPD	Floating Phone Data
FzH	Fahrzeug-Stunde
Fzkm	Fahrzeug-Kilometer
GPS	Global Positioning System
GV	Güterverkehr
GVM	Gesamtverkehrsmodell
INRIX	Anbieter von Verkehrsinformationen
KNA	Kosten-Nutzen-Analyse
LI	Lieferwagen (hier gleichgesetzt mit LNF)
LIK	Landesindex der Konsumentenpreise
LMW	Leichte Motorwagen (Überbegriff für PW, Lieferwagen, Motorräder)
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LOS	Level of Service (Verkehrslage-Indikator)
LSVA	Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe
LW	Lastwagen
LZ	Lastenzüge
MR	Motorräder
Nicht-AB	übriges Strassennetz (ohne Autobahnen)
NPVM	Nationales Personenverkehrsmodell
pE	Geschwindigkeits-Einbruchswahrscheinlichkeit
Pkm	Personen-Kilometer
PND	Personal Navigation Device
PV	Personenverkehr
PW	Personenwagen
PWE	Personenwageneinheit

SASVZ	Schweizerische automatische Strassenverkehrszählung
SMW	Schwere Motorwagen (Überbegriff für Schwere Nutzfahrzeuge und Busse)
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SVAG	Schwerverkehrsabgabegesetz
SZ	Sattelzüge
TMC	Traffic Message Channel
UAP	Unfallaufnahmeprotokoll
UVEK	Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
Viasuisse	Verkehrsinformationszentrale
VM-UVEK	Verkehrsmodellierung im UVEK (ARE, ASTRA und BAV)
ZSt	Zählstelle

Literatur

- ARE 2007:** Staukosten des Strassenverkehrs in der Schweiz. Aktualisierung 2000/2005. Ausgeführt durch Infrac im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, Sept. 2007.
- ARE 2012:** Neuberechnung der Stauzeitkosten. Ausgeführt durch Infrac im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, 20. April 2012.
- ARE 2015:** Nationale Personen- und Güterverkehrsmodelle UVEK, Durchschnittlicher Tagesverkehr 2013 für den Personen- und Güterverkehr auf der Strasse. Ausgeführt durch RappTrans, Basel, Dez. 2014.
- ASTRA 1998:** Staukosten im Strassenverkehr. Ausgeführt durch Infrac im Auftrag des Bundesamtes für Strassen. Bern, Dez. 1998.
- ASTRA 2010:** Instruktionen zum Unfallaufnahmeprotokoll (UAP). MISTRA Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr Fachapplikation Verkehrsunfälle (VU). Online: <http://www.astra.admin.ch/unfalldaten/04403/04409/index.html?lang=de> (11.11.2014).
- ASTRA 2015:** Verkehrsentwicklung und Verfügbarkeit der Nationalstrassen, Jahresbericht 2014, 28.8.2011.
- BAFU 2010a:** Handbuch Emissionsfaktoren Strassenverkehr HBEFA. Version 3.1. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- BAFU 2010b:** Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990-2035. Aktualisierung 2010. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- bfu Beratungsstelle für Unfallverhütung 2012:** Evaluation der Zweiphasenausbildung. Schlussbericht zuhanden des Bundesamts für Strassen (ASTRA). Online: <http://www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/28787.pdf> (11.11.2014).
- Brilon et.al. 2004:** Brilon, W.; Zurlinden, H.; Geistefeldt, J.: Ganzjahresanalyse des Verkehrsflusses auf Autobahnen. Straßenverkehrstechnik, Heft 11, Kirschbaum Verlag, 2004.
- Brilon et.al. 2007:** Brilon, W.; Geistefeldt, J.; Zurlinden, H.: Implementing the Concept of Reliability for Highway Capacity Analysis. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 2027, Washington D.C., 2007.
- Brilon/Estel 2008:** Brilon, Werner; Estel, Anja: Differenzierte Bewertung der Qualitätsstufen im HBS im Bereich der Überlastung, Heft 999, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Hrsg. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn.
- CE 2009:** CE Delft: Are trucks taking their toll? Jan. 2009 http://www.cedelft.eu/publiee/are_trucks_taking_their_toll/874?PHPSESSID=85969a496d797054620
- Ecoplan/INFRAS 2014:** Externe Effekte des Verkehrs 2010 - Monetarisierung von Umwelt-, Unfall- und Gesundheitseffekten. Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bern, Zürich und Altdorf.

- Ecoplan 2015:** Staubedingte Unfallkosten, im Auftrag ARE/ASTRA, Bern, 15.4.2015
- Geistefeldt 2009:** Geistefeldt, J.: Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen. Straßenverkehrstechnik, Heft 2, Kirschbaum Verlag, 2009.
- Geologix 2014:** Relation zwischen TMC Location Table und VMUVEK-Netz, Kurzbericht zuhanden ARE, Bern, 5. Dez. 2014.
- Infras 2009:** GPS-based Recording of Driving Behaviour (Pilot Study), im Auftrag des BAFU, 2. Dez. 2009.
- J+G/IVT 2010:** Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen, Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen; Jenni und Gottardi AG, IVT Heilbronn/Mannheim, Forschungsauftrag 2009/005_OBF, Eidg. Dept. UVEK (ASTRA), April 2010
- Lindenmann und Spacek 2008:** Betrieb und Erhaltung von Verkehrssystemen für den Individualverkehr, (Verkehr III), ETHZ, Institut für Verkehrsplanung und Transporttechnik, Ausgabe Sept. 2008
- Morlok 1978:** Morlok, E.K., Introduction to Transportation Engineering and Planning, McGraw-Hill Book Company, 1978
- ProgTrans 2011:** Neuermittlung der erlittenen und verursachten Stauzeitverluste und Stauzeitverlustkosten des Schwerverkehrs. Teilberichte 1 und 2, im Auftrag ASTAG, 2011.
- Schwietering 2010:** Schwietering Christoph: Verfahren zur Bestimmung der Einbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrsablaufs auf Autobahnen und Anwendung in der Verkehrssteuerung, Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen 2010.
- SN 641 822a 2009:** Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Zeitkosten im Personenverkehr.
- SN 641 823 2007:** Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr - Zeitkosten im Güterverkehr.
- SN 641 827 2009:** Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Betriebskosten von Strassenfahrzeugen.
- SN 641 824 2013:** Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Unfallraten und Unfallkostenätze. Schweizer Norm des VSS (Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute). Zürich.