



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Stauprognoseverfahren und -systeme

Bouchon prévision procédures et systèmes

Traffic jam forecast procedures and systems

ZHAW / IAS Institut für Angewandte Simulation, Wädenswil
Marcel Burkhard
Thomas Ott
Norbert Stoop
Peter Kauf
Clare Jackson
Simone Frei

Rapp Trans AG, Zürich
Martin Ruesch
Philipp Hegi
Gianni Moreni
Thorsten Koy

**Forschungsprojekt ASTRA 2011/010 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen (ASTRA)**

November 2014

1499

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Stauprognoseverfahren und -systeme

Bouchon prévision procédures et systèmes

Traffic jam forecast procedures and systems

ZHAW / IAS Institut für Angewandte Simulation, Wädenswil

Marcel Burkhard

Thomas Ott

Norbert Stoop

Peter Kauf

Clare Jackson

Simone Frei

Rapp Trans AG, Zürich

Martin Ruesch

Philipp Hegi

Gianni Moreni

Thorsten Koy

**Forschungsprojekt ASTRA 2011/010 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen (ASTRA)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Marcel Burkhard, ZHAW / IAS Institut für Angewandte Simulation

Mitglieder

Martin Ruesch, Rapp Trans AG

Philipp Hegi, Rapp Trans AG

Gianni Moreni, Rapp Trans AG

Thorsten Koy, Rapp Trans AG

Thomas Ott, ZHAW / IAS Institut für Angewandte Simulation

Norbert Stoop, ZHAW / IAS Institut für Angewandte Simulation

Peter Kauf, ZHAW / IAS Institut für Angewandte Simulation

Clare Jackson, ZHAW / IAS Institut für Angewandte Simulation

Simone Frei, ZHAW / IAS Institut für Angewandte Simulation

Begleitkommission

Präsident

Heinz Suter, Bundesamt für Strassen ASTRA, Verkehrsmanagement

Mitglieder

Ruedi Stoop, ETH Eidg. Technische Hochschule, Zürich

Frank Rüede, Verkehrsplanung Kanton Aargau, Aarau

Mark Bögli, ViaSuisse, Biel

Nikolaus Bischofberger, Amt für Verkehr, Kanton Zürich, Zürich

Marc Wijnhoff / Peter Schirato, Bundesamt für Strassen ASTRA, Verkehrsmanagement-Zentrale

Markus Brunner, ASTAG Schweizerischer Nutzfahrzeugverband (bis 2012)

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Inhaltsverzeichnis	5
Résumé..	20
Summary	33
1 Einführung	43
1.1 Ausgangslage.....	43
1.2 Forschungsbedarf und -ziele.....	44
1.3 Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes	45
1.4 Generelles Vorgehen und Methoden	46
1.5 Verwendete Grundlagen	47
1.6 Begriffe und Definitionen.....	47
1.7 Aufbau des Berichts	48
2 State of the Art Stauprognoseverfahren und - systeme	49
2.1 Einleitung.....	49
2.1.1 Allgemeine Arbeitsmethodik.....	49
2.2 State of the Art Prognoseverfahren.....	49
2.2.1 Vorgehen.....	49
2.2.2 Übersicht und Beurteilung von Verkehrs- und Stauprognoseverfahren	50
2.2.3 Simulationsbasierte Methoden.....	54
2.2.4 Statistische Methoden.....	55
2.2.5 Vergleich der unterschiedlichen Methodentypen	57
2.3 State of the Art Stauprognosesysteme	58
2.3.1 Einleitung.....	58
2.3.2 Übersicht untersuchte Stauprognosesysteme	59
2.3.3 Anwendungszwecke und Methoden	61
2.3.4 Quellen von Verkehrsdaten.....	63
2.3.5 Inputparameter der Prognosesysteme.....	64
2.3.6 Outputvariablen der Prognosesysteme und Prognosehorizonte	65
2.3.7 Erfahrungen und Beurteilung	66
2.4 Folgerungen	69
2.4.1 Verfahren.....	69
2.4.2 Systeme	71
2.5 Forschungsbedarf	72
3 Bedürfnisanalyse: Anforderungen an Stauprognosesysteme	73
3.1 Einleitung.....	73
3.1.1 Ziel und Zweck der Bedürfnisanalyse	73
3.1.2 Vorgehen und Methodik	73
3.2 Nutzergruppen und Interviewleitfaden	74
3.2.1 Nutzerkategorien	74
3.2.2 Interviewleitfaden	76
3.2.3 Durchgeführte Interviews	77
3.3 Bedürfnisse in Bezug auf Stauprognosesysteme	78
3.3.1 Vorbemerkungen zu Interviewergebnissen.....	78
3.3.2 Output.....	79
3.3.3 Input	88
3.3.4 System	91
3.3.5 Weiteres	92
3.3.6 Kritische Würdigung der Ergebnisse.....	93
3.3.7 Künftige Entwicklung der Bedürfnisse	94
3.4 Gewichtung der Bedürfnisse und Einschätzungen	95
3.4.1 Output.....	95
3.4.2 Input	96
3.4.3 System	96
3.4.4 Weiteres	97

3.5	Folgerungen.....	97
4	Prognoseverfahren und Prognosevariablen.....	98
4.1	Einleitung	98
4.2	Verkehrsdaten von ASTRA-Zählern	100
4.3	Multivariate Eigenschaften von Verkehrsdaten	104
4.4	Generelle Prognosestrategien und Prognosequalität.....	106
4.5	Univariate statistische Prognosen	108
4.6	Univariate Modelle für unterschiedliche Prognosehorizonte	109
4.7	Multivariate (lineare) Zeitreihenmodelle.....	110
4.8	Reisezeitprognosen mit neuronalen Netzwerken	110
4.9	Schlussfolgerungen für das Systemkonzept.....	113
5	Datenverfügbarkeit und -bereitstellung.....	116
5.1	Einleitung	116
5.1.1	Ziel der Abklärungen.....	116
5.1.2	Vorgehen und Methodik.....	116
5.1.3	Strukturierung der Datenerfassungssysteme	116
5.2	Untersuchte Datenerfassungssysteme.....	117
5.2.1	Datenerfassungssysteme	117
5.2.2	Verkehrsdaten.....	118
5.2.3	Umfelddaten.....	119
5.2.4	Ereignisse und Gefahren (planbar).....	119
5.2.5	Ereignisse und Gefahren (nicht planbar)	120
5.3	Verkehrsdaten für das Verkehrsmonitoring, die Verkehrsinformation und das Verkehrsmanagement	120
5.3.1	Einleitung	120
5.3.2	Verkehrsdaten für das Verkehrsmonitoring	121
5.3.3	Verkehrsdaten für die Verkehrsinformation (ViaSuisse).....	123
5.3.4	Verkehrsdaten für das Verkehrsmanagement.....	124
5.4	Beurteilung der Datenerfassungssysteme.....	127
5.4.1	Beurteilungskriterien und –skala.....	127
5.4.2	Beurteilung der Eignung der Datenerfassungssysteme für Stauprognosesysteme	128
5.4.3	Risiken	133
5.5	Folgerungen für das Systemkonzept	134
6	Systemkonzept für ein Verkehrs- und Stauprognosesystem	136
6.1	Einleitung	136
6.1.1	Ziele	136
6.2	Analyse vorheriger Arbeiten.....	138
6.2.1	Methodenseitige Abdeckung der Bedürfnisse aus AP2	139
6.2.2	Dateneignung für Prognoseverfahren.....	140
6.3	Allgemeine Aspekte des Systems	142
6.3.1	Teildienste und Basissystem	142
6.3.2	Allgemeiner Aufbau der Systemarchitektur	149
6.4	Etappierungs- bzw. Anwendungskonzept.....	153
6.4.1	Realisierbarkeit und Etappierungsvorschlag	153
6.4.2	Etappierung Basissystem und Teildienste	157
6.4.3	Analyse Rechen- und Datenbedarf.....	160
6.4.4	Kostenanalyse für die Etappierungsvarianten	163
6.5	Prognosekonzept.....	164
6.5.1	Vorstrukturierung & Basisprognose	165
6.5.2	Automatische Kurzfrist-Modellkombination.....	168
6.5.3	Hybridprognose.....	170
6.6	IT-Konzept	173
6.6.1	Parallele Datenverarbeitung und Modulsynchronisation	173
6.6.2	Zeitkritische Abläufe, Fehlerbehandlung und Ausfallsicherheit.....	176
6.6.3	Schnittstellen und Einbindung in die ASTRA-Systemlandschaft.....	179
6.6.4	Datenbank und Datenablage	185
6.6.5	Zusammenfassung Systemarchitektur und Module	186

7	Beurteilung des Konzeptes für ein Stauprognosesystem	193
7.1	Einleitung.....	193
7.1.1	Ziel der Abklärungen	193
7.2	Vorgehen.....	193
7.2.1	Generelle Beurteilungsmethodik.....	193
7.3	Abdeckungsgrad der Anforderungen	194
7.3.1	Beurteilungsmethodik und -kriterien	194
7.3.2	Ergebnisse	196
7.4	SWOT-Analyse.....	199
7.5	Argumentarium pro / contra	200
7.6	Grobe quantitative Bewertung des Nutzens für die Verkehrsteilnehmer	202
7.6.1	Einleitung.....	202
7.6.2	Stautunden und Staukosten in der Schweiz	203
7.7	Vorschlag für Testanwendungen	205
7.7.1	Anforderungen.....	205
7.7.2	Testanwendungen.....	205
7.8	Folgerungen	207
8	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	208
8.1	Schlussfolgerungen.....	208
8.2	Forschungsbedarf	210
8.3	Empfehlungen	211
	Anhänge	212
	Abkürzungen und Glossar	315
	Literaturverzeichnis	321
	Projektabschluss	329
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	332

Zusammenfassung

Ausgangslage

Jährlich gingen 2005 in der Schweiz ca. 20'000 Stunden im Stau verloren. Dies verursacht mit rund 1.5 Mia. CHF enorme volkswirtschaftliche Staukosten, wobei etwa die Hälfte der Kosten auf Autobahnen anfällt [ARE 2007]. Die Stautunden auf dem Nationalstrassennetz haben zwischen 2005 und 2012 um 80% zugenommen (vgl. folgende Abbildung). Die für das Jahr 2005 ermittelten Staukosten sind somit in der Zwischenzeit weiter stark angestiegen.

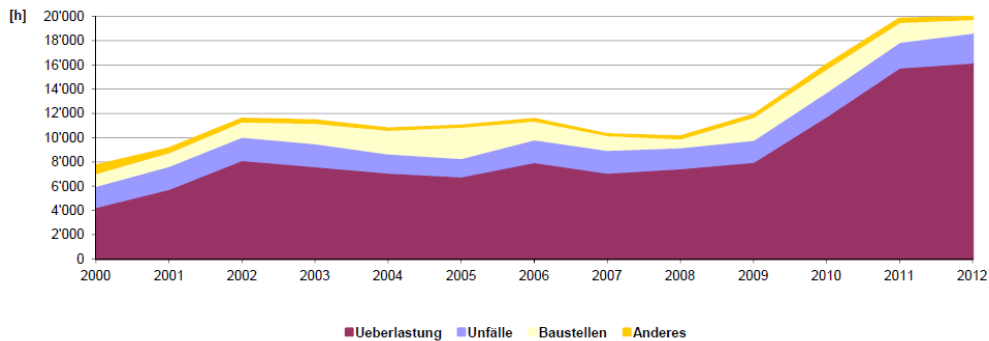


Abbildung: Entwicklung der Stautunden in der Schweiz

Mittels Verkehrsmanagement-Massnahmen wird versucht, Staus zu vermeiden und den Verkehr möglichst flüssig und sicher zu gestalten sowie die Strassenbenützer über die aktuelle und künftige Verkehrslage zu informieren.

Verlässliche Stauprognoseverfahren und -systeme können das Verkehrsmanagement auf National- und Hauptverkehrsstrassen unterstützen und nachhaltig verbessern. Ein **Stauprognosesystem** macht gestützt auf historische und aktuelle gemessene und berechnete Kenngrössen zum Verkehr und zu relevanten Einflussfaktoren (Wetter, Witterung, Baustellen, Ferienkalender etc.) Vorhersagen zur zu einem bestimmten Zeitpunkt herrschenden Verkehrssituation, insbesondere Stausituationen. Kann die Entstehung und Entwicklung von Stausituationen genau genug antizipiert werden, so lässt sich die Nutzung der Strasseninfrastruktur aus der Sicht von Strassenbetreibern und von Strassenbenützern optimieren. Lassen sich durch ein Stauprognosesystem **die Staukosten auch um nur 1% reduzieren**, ergeben sich bei einer konservativen Rechnung auf Basis der Zahlen aus 2005 **jährliche Einsparungen in der Grössenordnung von 10 bis 15 Mio. CHF**.

Heute fehlt für die Schweiz ein verlässliches Stauprognosesystem, welches den Strassenbetreibern und Strassenbenützern die notwendige Unterstützung für ein zweckmässiges Verkehrsmanagement und eine sinnvolle Reiseplanung bietet. Bestehende Verkehrsinformationssysteme in der Schweiz beschränken sich weitgehend auf die Darstellung der aktuellen oder historischen Verkehrslage, welche in die Zukunft extrapoliert wird. Diese rudimentären Prognosen können die Verkehrs- und Stauentwicklung häufig nicht richtig erfassen - der Verkehr kann so lediglich reaktiv informiert bzw. gesteuert werden und Stausituationen lassen sich kaum proaktiv verhindern. Erste Szenarienstudien zeigen hingegen, dass eine proaktive, d.h. prognosebasierte Steuerung des Verkehrs erlauben würde, Verkehrsspitzen so zu brechen, dass Staus ganz verhindert oder zumindest Stautunden reduziert würden.

Die nationale und internationale Literatur über Verkehrs- und Stauprognosen zeichnet sich durch eine Vielfalt von unterschiedlichen Methoden aus. Viele Studien sind allerdings erst akademischer Natur und wurden höchstens eingeschränkt in eine echte Anwendung transferiert. Es besteht daher ein erhebliches Potential für zukünftige Anwendungen zur Reduktion der Stautunden. Ein Ziel des Projektes war es, zu klären, wie weit und wie sich dieses Potential für ein Stauprognosesystem in der Schweiz nutzen lässt und wie ein solches System aussehen könnte.

Mit dem Projekt sollen unter anderem die folgenden Leitfragen beantwortet werden:

- Was ist der State of the Art bezüglich Stauprognoseverfahren und -systeme? Welches sind die Vor- und Nachteile, insbesondere in Bezug auf die Schweiz?
- Welche Bedürfnisse/Anforderungen an Stauprognoseverfahren und -systeme bestehen aus der Sicht des Strassenbetreibers und des Strassenbenützers?
- Welches sind die massgeblichen Einflussfaktoren/Parameter für den Stau auf Nationalstrassen (Kalendertag, Witterung, Event etc.)?
- Welche Daten werden idealerweise benötigt für eine verlässliche Stauprognose auf dem Nationalstrassennetz? Welche Datenquellen sind wie relevant?
- Welche Daten (Verkehr, Witterung, Events etc.) liegen in welcher Form vor und können für die Stauprognose genutzt werden? Wie ist die Situation heute und was ist künftig zu erwarten? Wie zugänglich sind die Daten verschiedener Datenlieferanten?
- Welche Algorithmen sind für die Stauprognosen und die Datenintegration für Nationalstrassen am besten für verlässliche Prognosen geeignet?
- Wie sollte ein Stauprognosesystem ausgestaltet sein? Welche Elemente und Funktionalitäten sollte es aufweisen? Wie könnte es in das Verkehrsmanagement CH integriert werden?
- Wie ist ein solches System in seiner Funktion und Wirkung zu beurteilen?

Forschungsergebnisse

Vorgreifend kann festgehalten werden, dass sich das methodische Potential für ein Stauprognosesystem in der Schweiz gewinnbringend nutzen liesse und die Umsetzung eines solchen Systems möglich ist. Hinsichtlich der Leitfragen können die Erkenntnisse folgendermassen zusammengefasst werden:

State of the Art Stauprognoseverfahren

Eine umfassende Literatur-Studie ergab das folgende Bild:

- Auf konzeptioneller Ebene kann man zwischen verschiedenen Arten von Prognosemethoden für den Verkehr unterscheiden, nämlich simulationsbasierte Methoden und statistische Methoden. Es sind auch hybride Methoden beschrieben worden.
- Bei den **simulationsbasierten Prognosemethoden** wird zwischen mikroskopischen, mesoskopischen und makroskopischen Simulationen unterschieden. Simulationsmethoden werden typischerweise eingesetzt für strategische Langzeitprognosen oder Szenarienrechnungen. Sie können aber auch für Kurzzeitprognosen eingesetzt werden. Der Vorteil der Methoden liegt bei der guten raum-zeitlichen Auflösung der Prognosen. Der flächendeckende Einsatz von Simulationsmethoden für Kurzzeitprognosen wäre allerdings sehr daten- und rechenintensiv und mit Unsicherheiten bei der Kalibrierungsgenauigkeit der Simulationen verbunden. In der Praxis werden Simulationsansätze daher oftmals in Kombination mit statistischen Methoden verwendet.
- Bei den **statistischen Methoden** wird zwischen heuristischen, nicht-parametrischen und parametrischen Methoden unterschieden. Unter die Kategorie der statistischen Methoden fallen auch Ganglinienklassifikationsmethoden, die aufgrund ihrer Effizienz in der Praxis häufig eingesetzt werden. Statistische Methoden eignen sich sowohl für Kurzzeitprognosen, als auch für längere Prognosehorizonte. Der Vorteil dieser Methoden gegenüber simulationsbasierten Methoden liegen beim kleineren Daten- und Rechenbedarf, der i.d.R. einfacheren Kalibrierung und der Möglichkeit einer relativ einfachen Einbindung externer Grössen (wie Wetter etc.). Eine genaue Beschreibung der Verkehrsdynamik insbesondere in Stausituationen ist aber nur eingeschränkt möglich.
- Die Arbeiten zu hybriden Methoden zeigen, dass **hybride Methoden oder allgemein Kombinationen verschiedener Ansätze besser abschneiden als einzelne Methoden**.
- Ein grosser Teil der wissenschaftlich beschriebenen Methoden kommt bisher in der Praxis nur beschränkt zum Einsatz. Dies deutet daraufhin, dass viele Verfahren entweder ungeeignet sind für den praktischen Einsatz oder aber noch ein erhebliches

Potential für den Praxistransfer besteht. Es ist davon auszugehen, dass beide Punkte zutreffen.

State of the Art Stauprognosesysteme

Die Analyse von 12 Stauinformations- und prognosesystemen hat folgende Erkenntnisse gebracht:

- Die heutigen Stauprognosesysteme nutzen statistische oder simulationsgestützte oder kombinierte Verfahren. Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme entsprechen den Vor- und Nachteilen der verwendeten Methoden (vgl. vorher).
- Nur einzelne Stauprognosesysteme werden heute neben der reinen Verkehrsinformation auch für das Verkehrsmanagement genutzt. Es ist ein grosser **Unterschied**, ob ein Stauprognosesystem nur für die **Verkehrsinformation** oder auch für das **Verkehrsmanagement** eingesetzt wird. Da beim Verkehrsmanagement in kurzen Intervallen aktualisierte Stauprognosen sehr hoher Qualität benötigt werden, sind auch die Systemanforderungen höher als bei der reinen Verkehrsinformation. Weniger genaue Stauprognosen wirken sich hier weniger stark aus.
- Die „**grossen Anbieter**“ von Stauprognosesystemen verfügen über **Standardprodukte**, die weit verbreitet sind und welche die **aktuelle Verkehrslage gut abdecken**. Im Vordergrund steht die Verkehrsinformation und nicht die Nutzung für das Verkehrsmanagement. **Defizite** bestehen jedoch **bei der Prognosefähigkeit** und in der **Anpassungsfähigkeit an spezifische lokale Rahmenbedingungen** in der Schweiz. Die verwendeten Prognoseverfahren und -methoden und die berücksichtigten Einflussgrössen für die Prognosen sind meist eine „Black Box“.
- Die „**kleinen Anbieter**“ stellen eher ein wissenschaftlich abgesichertes und hoch qualitatives Prognoseverfahren in den Vordergrund, welches eine gute Übereinstimmung von Prognosewerten mit effektiven Messwerten erreicht. Eine **Berücksichtigung von speziellen lokalen Rahmenbedingungen** scheint eher gegeben. Aufgrund der eher besseren Qualität der Prognosegrössen erscheint auch eine Nutzung dieser Systeme für das Verkehrsmanagement erfolgversprechender.
- Die meisten der untersuchten Stauprognosesysteme nutzen **Verkehrsdaten aus verschiedenen Quellen**. Aufgrund der Entwicklungen bezüglich Verkehrsdatenerfassungstechnologien und der zahlreichen verschiedenen Datenquellen müssen Stauprognosesysteme sehr flexibel in der Nutzung verschiedener Verkehrsdaten sein. Dies gilt grundsätzlich auch bezüglich der Umfelddaten (Wetter, Baustellen, Anlässe etc.).
- Die untersuchten Stauprognosesysteme liefern unterschiedliche Outputgrössen in unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Die meisten liefern als **zentrale Grundgrössen Verkehrszustände und Reisezeiten**. Nur wenige liefern auch noch Reisegeschwindigkeiten und insbesondere Staulängen.
- Die untersuchten Stauprognosesysteme liefern **Prognosen für verschiedene Prognosehorizonte** und nutzen für die Prognosen auch in unterschiedlichem Ausmass historische, aktuelle und „künftige“ Daten. Für die Auslegung des Systems ist es entscheidend, welche Prognosehorizonte für welche Anwendungszwecke Priorität haben.
- **Von zentraler Bedeutung ist** – nicht überraschend - die **Datenverfügbarkeit**. Dies gilt für Verkehrs- und Umfelddaten, sowie für historische, aktuelle und künftige Daten (vgl. dazu auch den Abschnitt zur Datenverfügbarkeit).
- **Wichtige Erfolgsfaktoren** sind ein **ausreichender Testbetrieb** (bei noch nicht etablierten Systemen), **Kooperationen mit Datenlieferanten** (z.B. für mobile Verkehrsdaten), die Glaubwürdigkeit der Datenquellen sowie die **Qualität und Belastbarkeit der Outputgrössen**. Breit einsetzbare Lösungen (mit geringer Individualisierung) sind nur für die „grossen Anbieter“ ein wichtiger Erfolgsfaktor.
- Neben der Datenverfügbarkeit sind als Hindernisse die Ermittlung von Netzkapazitäten, die Investitionen in die Software- und Systementwicklung sowie die beschränkte Zahlungsbereitschaft für Verkehrsinformationen relevant.
- Grundsätzlich können sämtliche der untersuchten Systeme in der Schweiz eingesetzt werden. Die Systeme der grossen Anbieter sind bereits heute im Einsatz (INRIX, TomTom, Google). Das System TTVMS wäre nur dann einsetzbar, wenn erhebliche

Investitionen in die Verkehrsdatenerfassung auf der Basis der Nummernschilderkennung getätigt würden.

Anforderungen an ein Stauprognosesystem

Die Analyse der Bedürfnisse für ein Stauprognosesystem aus der Sicht der Strassenbenützer und Strassenbetreiber hat folgende Erkenntnisse gezeigt:

- Bezüglich **Anwendungszwecke** stehen die **Verkehrsinformation**, die **Reise- und Routenplanung** sowie das **Verkehrsmanagement** gegenüber der Baustellen-/Unterhaltsplanung, Strassennetzplanung und dem Verkehrsmonitoring im Vordergrund.
- Als Kenngrössen aus einem Stauprognosesystem haben **Reisezeiten/Reisezeitverluste, Staulängen, Verkehrslage, Staudauer** eine höhere Priorität als Reisesgeschwindigkeit, Auslastung und Verkehrsqualität.
- Bezüglich Prognosehorizonte stehen **Kurzfristprognosen** (Minuten bis Stunden) im Vordergrund, welche durch **Mittel- und Langfristprognosen ergänzt** werden (Tage bis Monate).
- Für die **räumliche Abdeckung** steht die **Schweiz** mit dem grenznahen Ausland im Vordergrund.
- Bezüglich Strassenklassen sollten in erster Priorität **Autobahnen und Hauptverkehrsstrassen** abgedeckt werden.
- Bei den Fahrzeugklassen sind **Personenwagen und Lastwagen zu unterscheiden**; insbesondere auch bei den Output-Kenngrössen (z.B. Reisezeiten).
- Als **Zeitintervall für eine Aktualisierung** stehen für Kurzfristprognosen 1 bis 5 Minuten im Vordergrund (Verkehrsmanagement, Verkehrsinfo On-trip). Für Mittel- und Langfristprognosen können die Aktualisierungsintervalle auch länger sein.
- Bezüglich **Zuverlässigkeit** sollten für Kurzfristprognosen die Reisezeiten nicht mehr als 10% vom effektiven Wert abweichen. Für Staulängen dürfen die Abweichungen auch etwas grösser sein. Bei Mittel- und Langfristprognosen werden grössere Abweichungen in Kauf genommen. Gegenüber Falschmeldungen sind Strassenbetreiber und -nutzer empfindlicher; von 100 Meldungen sollten nicht mehr als 5 falsch sein, da sonst die Akzeptanz des Systems rasch abnimmt.
- Das Stauprognosesystem sollte **beim Input Schnittstellen zur Verkehrsdaten-Erfassung, zum Verkehrsmonitoring, zu Wetterprognosen, Witterungsmessstellen** etc. aufweisen.
- Das Stauprognosesystem sollte **beim Output Schnittstellen zu Verkehrsinformationssystemen, Verkehrsmanagementsystemen, Ereignisdiensten** etc. aufweisen.
- Die identifizierten Entwicklungstrends bezüglich der Bedürfnisse führen grundsätzlich zu einem eher **zunehmenden Bedarf nach Stauprognosesystemen sowie zu einer Erhöhung der Systemanforderungen** (bez. verarbeiteten Informationen, räumlicher Auflösung und Zuverlässigkeit).

Evaluation von Prognoseverfahren und Prognosevariablen

Für ein zuverlässiges und universell einsetzbares Prognosesystem sollten verschiedene Verfahren kombiniert werden. Je nach Verkehrssituation können so die für die jeweilige Situation geeigneten Verfahren gewählt bzw. optimal kombiniert werden. Die Verfahren sollen möglichst adaptiv auf die jeweilige lokale Verkehrssituation reagieren können und online kalibrierbar sein. Dies gilt auch für die Methodik der Auswahl der relevanten externen Faktoren, die für die Prognose herangezogen werden sollen. Vor diesem Hintergrund hat eine Evaluation verschiedener Methoden anhand von Testszenarien mit realen Daten die folgenden Erkenntnisse gebracht:

- **Ganglinienklassifikationsmethoden** eignen sich gut für (lokale) **Basisprognosen** bzw. zur Identifikation des aktuellen oder prognostizierten „Verkehrsregimes“. Darauf aufbauend können weitere Verfahren gezielt ausgewählt werden.
- Für **Kurzzeitprognosen** (bis ca. 30 min) der Verkehrsdichte und der Geschwindigkeiten auf einzelnen Strassenabschnitten eignen sich **univariate statistische**

- Methoden.** Für längere Prognosehorizonte ist eine Kombination mit anderen Methoden nötig.
- **Reisezeitprognosen** lassen sich aus den abschnittsbasierten Prognosen für die Verkehrsdichte und Geschwindigkeiten ableiten. Ergänzend dazu lassen sich die Reisezeiten aber auch direkt für ganze Netzabschnitte prognostizieren, etwa mittels **neuronaler Netze**. Dieser **netzbasierter Ansatz** kann die globale Verkehrssituation besser erfassen als rein lokale Prognosen. Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass dies gerade im Falle von Stausituationen zu einer Verbesserung der Prognosen beitragen kann.
 - Für **mittel- und langfristige Prognosen** wird der aktuelle lokale Verkehrszustand immer weniger relevant. Daher wird für längere Prognosehorizonte der Einbezug von Methoden, die aufgrund **historischer Daten** das Muster der Verkehrslage erkennen und erfassen, entscheidend.
 - Ein **Einbezug** möglichst vieler **externer Faktoren** kann zu grossem Datenbedarf führen und die Prognosen unter Umständen sogar verschlechtern. Es ist daher empfehlenswert auf wenige relevante Einflussfaktoren zu fokussieren. Für Kurzzeitprognosen sind die externen Faktoren häufig bereits in der aktuellen Verkehrssituation abgebildet und müssen unter Umständen gar nicht mehr berücksichtigt werden (fallabhängig). Bei längeren Prognosehorizonten sind externe Faktoren entscheidend. Für die Identifikation relevanter Einflussfaktoren wird vorgeschlagen mit **Filtertechniken** zu arbeiten, die die wichtigsten Faktoren für die aktuelle Situation herausfiltern. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene, z.T. neuartige wissenschaftliche Methoden evaluiert. Ein echter Praxistest steht aber noch aus.
 - Relativ einfache statistische Methoden können auch für die Prognose einer Stauentwicklung verwendet werden (im Sinne eines **Stauwarners**). Prognosen der Entwicklung einer **Staudynamik** müssen aber wahrscheinlich **simulationsbasiert** erfolgen.

Datenverfügbarkeit für ein Stauprognosesystem

Die Analyse der Verfügbarkeit und Eignung von Verkehrs- und Umfelddaten für einen Einsatz in Stauprognosesystemen hat folgende Erkenntnisse gezeigt:

- Aus dem **Verkehrsmonitoring** lassen sich nur **historische Verkehrsdaten** für die Entwicklung und Validierung eines Stauprognosesystems sowie für langfristige Prognosen nutzen. Für ein gutes Prognosesystem bilden sie eine wichtige Grundlage in Kombination mit anderen historischen Daten.
- Der **Abdeckungsgrad durch Verkehrszähler** (mit Induktionsschleifen) wird sich in Zukunft weiter verbessern; dies auch im Bereich von Baustellen. Das Stauprognosesystem sollte deshalb flexibel bezüglich Anzahl Zählstellen ausgestaltet sein und auch mobile Erfassungsgeräte im Bereich von Baustellen berücksichtigen können. Für das System ist ein gewisser Abdeckungsgrad auf dem ganzen Netz notwendig (z.B. für die Detektion von Ereignissen und Gefahren), ein hoher Abdeckungsgrad ist bei kritischen Netzabschnitten entscheidend.
- Die **Verbreitung von Floating Car Data (FCD) und Floating Phone Data (FPD)** wird sich weiter verbessern und damit auch die Abdeckung von weniger stark belasteten Strassenabschnitten. Die Qualität der erfassten Verkehrsdaten dürfte weiter steigen.
- Die zu erwartende weitere **Standardisierung der Verkehrsdatenerfassung** führt zu einer Vereinheitlichung der Qualität der Outputkenngrößen.
- Durch die **vermehrte streckenbezogene Verkehrsdatenerfassung** (Reisezeiten, Reisegeschwindigkeiten etc.) verbessern sich die Inputdaten für ein Stauprognosesystem erheblich.
- Verkehrsdaten: In einem **ersten Schritt** steht die Nutzung von Verkehrsdaten aus **Verkehrszählern** im Vordergrund. In einem **zweiten Schritt** sollten **FCD bzw. FPD-Daten** oder Bluetooth-Daten genutzt werden.
- Umfelddaten: **Wetterdaten** sollten soweit als möglich schon in einer frühen Phase genutzt werden. Der Einbezug des Strassenzustandes erscheint erst zu einem späteren Zeitpunkt sinnvoll.

- Ereignisse und Gefahren (planbar): Informationen zu Ferienkalender, Veranstaltungen und Baustellen können im Stauprognosesystem berücksichtigt werden.
- Ereignisse und Gefahren (nicht planbar): Auf den **Einbezug von Unfalldaten, polizeiliche Meldungen und Betriebszustände von VM-Massnahmen** sollte in einem ersten Schritt aufgrund der Komplexität eher verzichtet werden. Die Option für einen späteren Einbezug sollte offengehalten werden. Hier ist auch zu beachten, dass die Wirkung von Ereignissen auf das Verkehrsgeschehen auch wieder unmittelbar über die Verkehrserfassung detektiert wird.
- Bei der Verwendung von Inputdaten für ein Stauprognosesystem sind zahlreiche **Risiken** zu beachten (Ungenügende Datenqualität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung etc.) welche die Qualität der Outputkenngrößen reduzieren. Durch Kontrollroutinen sollten diese Risiken möglichst minimiert werden.

Eine genaue Quantifizierung der Eignung der einzelnen Datenquellen und der Risiken hinsichtlich der Prognosequalität muss in einem Testbetrieb erfolgen.

Systemkonzept für ein Stauprognosesystem

Das vorgeschlagene Systemkonzept berücksichtigt die unterschiedlichen technischen Möglichkeiten, Bedürfnisse und Entwicklungsunsicherheiten und schlägt eine modulartige Architektur und 4 Ausbautetappen des Systems vor. Die wichtigsten Eigenschaften des Konzeptes lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- **Allgemeine Aspekte:** Um den unterschiedlichen Nutzergruppen und Anwendungszwecken gerecht zu werden, sieht das System aus Anwendersicht drei unterschiedliche Prognoseeinheiten im Sinne von Teildiensten vor (vgl. folgende Abbildung):

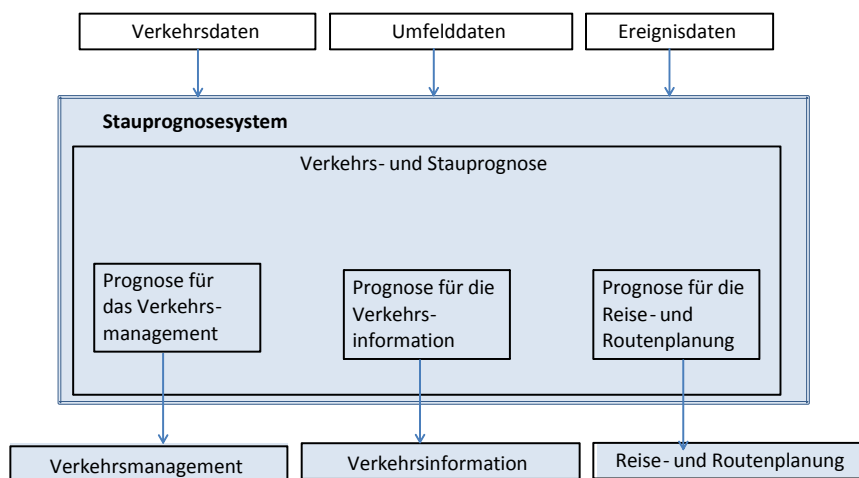


Abbildung: Teildienste des Stauprognosesystems

1. **Teildienst Verkehrsinformationsprognose:** Berechnung des zukünftigen Verkehrszustandes für Strassenbenutzer
2. **Teildienst Reise- und Routenplanung:** Unterstützung des Anwenders bei der pre-trip und on-trip Reiseplanung
3. **Teildienst Verkehrsmanagementprognose:** Spezielle Export- und Analysedaten sowie Feedback- und Interventionsmöglichkeiten für das Verkehrsmanagement

Eine geeignete Systemarchitektur mit einem Basissystem dient allen Teildiensten als technischer Unterbau.

- **Systemarchitektur:** Das System ist auf einen **modularen Aufbau** ausgelegt, der eine flexible Erweiterung ermöglicht. Dabei wird zwischen Preprocessing-Modulen

(oder Tools), Postprocessing-Modulen, eigentlichen Prognosemodulen und weiteren technischen Unterstützungsmodulen unterschieden (siehe folgende Abbildung).

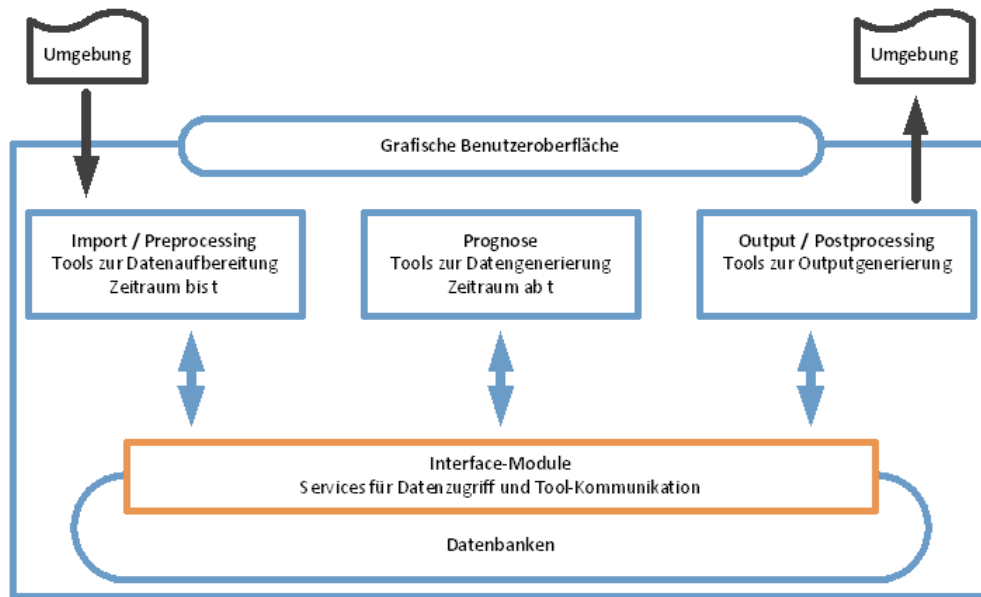


Abbildung: Modularisierte Systemarchitektur

- Auf IT-Seite ist aufgrund der grossen erforderlichen Rechenleistung und für die Ausfallsicherheit eine Parallelisierung der Datenverarbeitung notwendig. Zur Sicherstellung der Modulsynchronisation und für das Datenmanagement wird ein Message Queue Konzept vorgeschlagen in Kombination mit einer GRID-Lösung.
- Die Einbindung des Stauprognosesystems in die ASTRA-Systemlandschaft soll in Form einer **eigenständigen Fachapplikation** erfolgen. Dafür stehen drei Integrationsvarianten mit variierendem Autonomiegrad der Fachapplikation zur Diskussion.
- Das **Etappierungskonzept** orientiert sich an einer Einschätzung, wie gut sich die Bedürfnisse in Hinblick auf die Datenlage und Verfügbarkeit geeigneter Methoden in der zeitlichen Entwicklung des Projektes abdecken lassen. Bedürfnisse, die sich mit bestehenden Datenquellen und Prognoseverfahren bereits gut und mit wenig Unsicherheiten abdecken lassen, werden so zeitlich priorisiert. Die wichtigsten Merkmale der Etappen lassen sich wie folgt zusammenfassen:
 1. Etappe:
 - Verkehrszustandsprognose als Basis
 - Beschränkung auf Detektordaten und Basisumfelddaten
 - Nationalstrassen und ausgewählte kantonale HLS
 2. Etappe:
 - Direkte Reisezeitprognosen
 - Erweiterung auf FPD (oder FCD)
 3. Etappe:
 - Erweiterung auf kantonale HLS/HVS
 - Routingfunktionen (mit rudimentärem Rerouting)
 4. Etappe:
 - Simulation von neuralgischen Punkten
 - Volles Rerouting
 - Umfassende Umfelddaten
 - Automatisierte VM-Schnittstellen
- **Prognosekonzept:** Der Fokus des Prognosekonzepts liegt zunächst auf der ersten Ausbaustufe (Etappe 1). Vorgeschlagen wird eine Kombination einer musterbasierten Methode mit statistischen Kurzfristprognosen. Der Vorschlag umfasst eine Methodik zur Einbindung externer Faktoren und auch Methodiken zur optimalen Kombination

verschiedener Prognosemethoden für unterschiedliche Verkehrsregime und Prognosehorizonte. Damit ist das Prognosekonzept ein guter Grundstein für weiterführende Entwicklungen.

Beurteilung des Systemkonzepts für ein Stauprognosesystem

Die Beurteilung des Systemkonzeptes für ein Stauprognosesystem führte zu folgenden Erkenntnissen:

- Die folgende Abbildung fasst die Bewertungsergebnisse für alle vier Etappen graphisch zusammen. Dabei ist ersichtlich, welche Etappe bezüglich welcher Kriterien Fortschritte erlaubt.

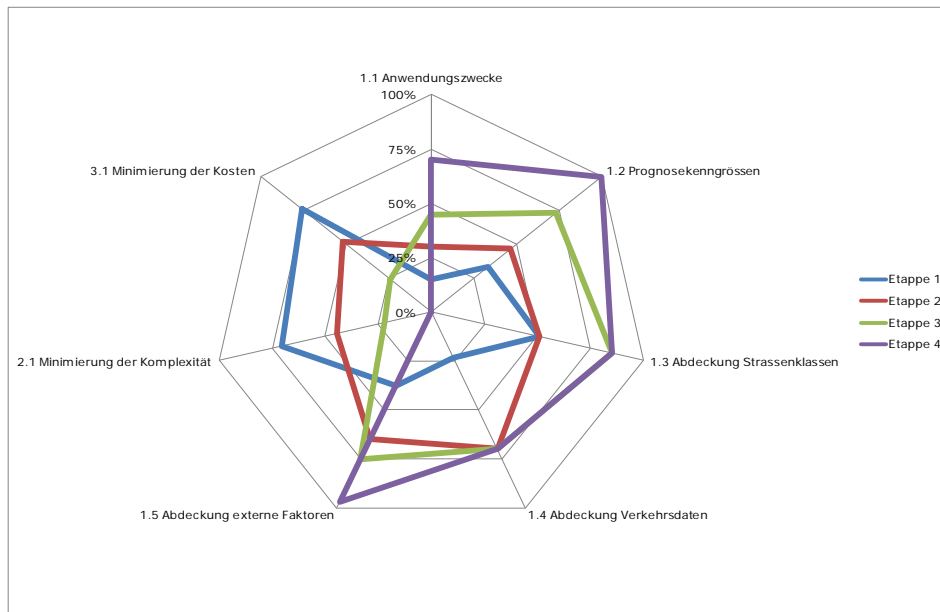


Abbildung: Überblick zum Abdeckungsgrad der Anforderungen aller vier Etappen

- **Etappe 1** erlaubt die Erreichung der **Mindestanforderungen** mit einem relativ **kleinen Aufwand** und einer überschaubaren Komplexität.
- **Etappe 2** ist etwas teurer und komplexer, erlaubt aber insbesondere beim Teilkriterium „Abdeckung Verkehrsdaten“ mit der Berücksichtigung von Streckendaten (Floating Car Data / Floating Phone Data) einen grossen Sprung nach vorne. Die nächsten Etappen bringen bezüglich dieses Teilkriteriums keinen weiteren Vorteil mehr mit sich. Bei den externen Faktoren ist mit der Berücksichtigung von Wetter, Baustellen und Ferienkalender Ausland auch ein grosser Fortschritt gegenüber Etappe 1 zu registrieren.
- **Etappe 3** ist noch etwas teurer und komplexer als Etappe 2, führt aber zu wichtigen Fortschritten bezüglich der Teilkriterien Prognosekenngrößen (direkte Prognose der Staulänge und der Staudauer) und Abdeckung Strassenklassen (kantonale HLS/HVS vollständig abgedeckt).
- **Etappe 4** bringt gegenüber Etappe 3 deutliche Fortschritte bezüglich der Anwendungszwecke (Rerouting, automatisierte Schnittstelle für VM-Massnahmen usw.), der Prognosekenngrößen (Berechnung Staulängen und Staudauer mittels Simulationen) und der Berücksichtigung der externen Faktoren (Unfälle / Störungen, automatisierte Schnittstelle zu VM-Massnahmen) mit sich.

Eine **SWOT Analyse** identifizierte folgende Stärken und Schwächen:

- Die Stärken der ersten Etappe: die wesentlichen Funktionalitäten sind abgedeckt; der Aufwand ist minimal; Umsetzbarkeit ist gegeben; minimale Betriebsrisiken; Ausbaufähigkeit.
- Die Schwächen der ersten Etappe sind: nicht alle Anwendungszwecke abgedeckt; geringe räumliche Auflösung da nur Querschnittsdaten berücksichtigt werden; nur

- abgeleitete Prognosen mit beschränkter Qualität; kantonale HLS/HVS nur teilweise abgedeckt.
- Gegenüber der ersten Etappe bietet die vierte Etappe bei den Stärken eine Reihe von Vorteilen / zusätzlichen Funktionalitäten (bessere Auflösung dank Nutzung von Streckendaten, Berücksichtigung aller relevanten externen Faktoren, Verbesserung Prognosequalität).
 - Zu den Schwächen der 4. Etappe gehört der hohe Aufwand für den Aufbau und Betrieb des Systems und insbesondere die heute noch eingeschränkte Umsetzbarkeit.
 - Die **Chancen** eines Stauprognosesystems liegen einerseits beim Problemdruck, der voraussichtlich hoch bleiben bzw. sich verschärfen wird. Die technologische Entwicklung wird das Projekt sowohl beim Systeminput als auch bei der Nutzung des Systemoutputs unterstützen. Die Flexibilisierung der Arbeitszeiten und der erhöhte Bedarf nach Informationen zur Optimierung des Zeitmanagements sind weitere Faktoren, welche die Entwicklung eines Stauprognosesystems begünstigen werden.
 - Die **Risiken** liegen bei den knappen Ressourcen (personell / finanziell), bei möglichen Ziel- bzw. Interessenkonflikten und bei der Akzeptanz. Bei fehlenden Alternativen, sei es bezüglich Routen/Verkehrsmittel, sei es bezüglich Abfahrtszeiten, reduziert sich der Nutzen des Stauprognosesystems.
 - Folgende **Argumente** sprechen **für ein Stauprognosesystem**:
 1. Strassenbenützer sind besser über die künftige Verkehrslage auf dem berücksichtigten Strassennetz informiert, dadurch können sie:
 - Ihre Fahrten / Transporte / Einsätze besser planen
 - Zuverlässiger die Fahrzeiten planen / einschätzen
 - Ihr Fahrverhalten rechtzeitig auf die prognostizierte Verkehrslage anpassen
 2. Strassenbetreiber sind besser über die künftige Verkehrslage auf dem berücksichtigten Strassennetz informiert, und können das Verkehrsmanagement und die betrieblichen Tätigkeiten optimieren.
 3. Ist das Stauprognosesystem ins ASTRA integriert, kann man direkt das System steuern und ins Verkehrsmanagement integrieren.
 - Folgende **Argumente** sprechen **gegen ein Stauprognosesystem**:
 1. Das Stauprognosesystem benötigt eine gewisse Investition sowie einen gewissen Aufwand für die Entwicklung und den Betrieb des Systems
 2. Unerwünschte Verkehrsverlagerungen können nicht vollständig ausgeschlossen werden (z. B. auf das untergeordnete Strassennetz)
 - Lassen sich durch ein Stauprognosesystem die **Staukosten auch um nur 1% reduzieren**, ergeben sich bei einer konservativen Rechnung **jährliche Einsparungen in der Grössenordnung von 10 bis 15 Mio. CHF**. Dies zeigt das **hohe volkswirtschaftliche Potential hinter der Reduktion der Staustunden**. Auch eine kleine Verbesserung kann zu einem beträchtlichen Nutzen führen.

Forschungsbedarf

Im Rahmen des Projektes wurden weitere Forschungslücken identifiziert. Diese können grob unterteilt werden in

1. notwendige Entwicklungsarbeiten bei Algorithmen
2. datenabhängige Abklärungen, die erst im Rahmen eines Testbetriebs erfolgen können
3. vertiefende Abklärungen in Bezug auf die Wirkung des Systems

Forschungsbedarf besteht vor allem in folgenden Bereichen:

- Die identifizierten Bedürfnisse und Anforderungen der Strassenbenützer und Strassenbetreiber sollten anhand eines grösseren Samples von Strassenbenützern und Strassenbetreibern konkretisiert und verifiziert werden.
- Im Rahmen eines Testbetriebs sind verschiedene Verkehrsdatenquellen (Querschnitts- und Streckendaten) als Inputdaten zu prüfen und deren Eignung zu

beurteilen. Dabei sind auch die Risiken hinsichtlich der Prognosequalität genauer zu quantifizieren.

- Im Rahmen eines Testbetriebs sind mittels entsprechender Begleituntersuchungen die Prognosefähigkeit, die Qualität (statistische Güte, Abbildungstiefe etc.), die Flexibilität (bezogen auf die Inputdaten, Erweiterung etc.) und die Zuverlässigkeit/Stabilität des Systemkonzeptes mit verschiedenen Ausprägungen zu ermitteln.
- Als Grundlage für die quantitative Bewertung des Stauprognosesystems sind die Wirkungen auf die Verkehrsteilnehmer (zum Beispiel Wirkungen der Stauinformation auf das Verkehrsverhalten) und die Betreiber für verschiedene Netzkonfigurationen und verwendete Kommunikationskanäle näher zu analysieren. Dies könnte mittels Simulationen, Fahrsimulatoren und im Rahmen von Begleituntersuchungen zum Testbetrieb erfolgen.
- Insbesondere treten Rückkopplungseffekte zwischen Verkehrsaufkommen und Verkehrsprognose auf, wenn die Verkehrsteilnehmenden ihr Verhalten aufgrund der Prognose (wie allenfalls erwünscht) anpassen und dadurch die ursprüngliche Prognose ihre Gültigkeit verliert. Die vorgeschlagenen lernfähigen Methoden können diese Selbst-Modifikation der Prognose berücksichtigen, wenn die Reaktion der Verkehrsteilnehmenden bei ähnlichen Prognosen jeweils einem ähnlichen Muster folgt. Das Ausmass und die Auswirkung von Rückkopplungseffekten verursacht durch prognosebedingte Verhaltensänderungen der Strassenbenutzer sind allerdings offene Forschungspunkte. Insbesondere ist unklar, unter welchen Bedingungen die Prognosen die erwünschte Wirkung optimal erreichen. Allenfalls müssen gewisse Informationen mit Vorteil zurückgehalten werden, um ein Übersteuern des Systems zu verhindern. Weiter ist offen, in welchen Situationen aufgrund der Prognosen neue und gegebenenfalls erwünschte stabile Gleichgewichtszustände erreicht werden oder wann allenfalls Schwingungszustände zwischen Verkehrsaufkommen und Verkehrsprognose auftreten. Die Fragen können empirisch zum Teil in einem Testbetrieb des Systems adressiert werden. Für ein allgemeines Systemverständnis der Effekte wäre aber unter Umständen auch eine Simulationsstudie nützlich, die es erlauben würde, Szenarien des Verhaltens aufzuzeigen.
- In Zusammenhang mit den unterschiedlichen Prognosemethodiken, die in späteren Ausbautappen realisiert werden sollen, gibt es zum Teil noch Forschungs- bzw. Entwicklungsbedarf, da die Methoden zum Teil noch nie in real funktionierenden Systemen eingesetzt wurden. Dies betrifft insbesondere
 - die Methodik der direkten Reisezeitprognose aufgrund von Streckendaten (FCD/FPD) (Etappe 2)
 - die Methodik zur Klassifikation von Staulängen und Staudauer (Etappe 3)
 - die Methodik des dynamischen prognosebasierten Reroutings für die individuelle Routenoptimierung (Etappe 3)
 - die Kalibrierung von simulationsbasierten Prognosen in Echtzeit (Etappe 4).

Empfehlungen

Aus dem Projekt lassen sich folgende Empfehlungen für den Einsatz eines Stauprognosesystems in der Schweiz ableiten:

- Es ist empfehlenswert, ein **Stauprognosesystem umzusetzen**. Angesichts der sehr hohen volkswirtschaftlichen Staukosten ist mit einem positiven Nutzen – Kosten – Verhältnis zu rechnen.
- Die Entwicklung eines **massgeschneiderten Systems für die Schweiz** erlaubt eine optimale Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse als Vorteil gegenüber Standardlösungen von internationalen Systemanbietern.
- Für das Systemkonzept empfiehlt sich ein **modulbasierter Ansatz mit verschiedenen Ausbautappen**. Dadurch kann einerseits schnell ein zwar rudimentäreres, aber funktionierendes System realisiert werden und andererseits besteht für den Systemausbau eine Risikokontrolle bei grösstmöglicher Flexibilität. Der Modulansatz erlaubt es insbesondere, zur Zeit noch nicht erprobte oder bekannte Prognosemethoden zu einem späteren Zeitpunkt ins System zu integrieren.

- Von zentraler Bedeutung für ein Stauprognosesystem ist die **Datenverfügbarkeit**. Dies gilt für Verkehrs- und Umfelddaten, sowie für historische, aktuelle und künftige Daten. Die laufenden Anstrengungen zur Verbesserung der Verkehrsdatenerfassung sind zu intensivieren und noch stärker auf die Anforderungen eines Stauprognosesystems auszurichten.
- Die **Testanwendungen** bauen auf dem modularen Ansatz auf und sollten in erster Linie die 1. Etappe des Stauprognosesystems abdecken. Soweit möglich sollten auch Elemente späterer Etappen einbezogen werden (z.B. Einbezug von Streckendaten, Einbezug weiterer Einflussfaktoren, Einbezug HVS). Es bestehen verschiedene Möglichkeiten von Testanwendungen, welche in Zusammenarbeit mit dem ASTRA und den Kantonen zu konkretisieren sind.
- Die **Forschungslücken** sollten mit Anschlussprojekten und einem Testbetrieb **geschlossen werden**.

Résumé

Introduction

En 2005, environ 33 millions d'heures ont été perdues dans les bouchons en Suisse. Pour l'économie nationale, cela représente un coût considérable de près de CHF 1,5 milliards, dont environ la moitié sont engendrés sur les autoroutes [ARE, 2007]. Entre 2005 et 2012 le nombre d'heures de bouchons a augmenté d'environ 80% sur le réseau des routes nationales (cf. illustration ci-dessous). Cela signifie que le coût relatif aux bouchons a lui aussi nettement augmenté depuis 2005.

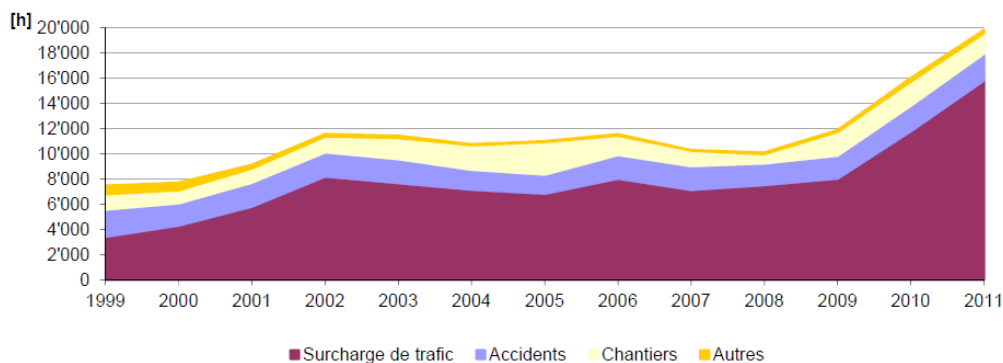


Illustration : Evolution des heures de bouchons en Suisse

Des mesures de gestion du trafic sont appliquées pour essayer d'éviter les bouchons et pour maintenir le trafic le plus fluide et le plus sûr possible, mais aussi pour informer les usagers de la route de la situation du trafic actuelle et à venir.

Des procédés et systèmes de prévision des bouchons fiables permettent de soutenir et d'améliorer durablement la gestion du trafic sur les routes nationales et les routes à grande circulation. Un **système de prévision des bouchons** se base sur des mesures et des calculs de données historiques et actuelles étant liées spécifiquement au trafic et à des facteurs externes déterminants (prévisions météorologiques, conditions météorologiques, chantiers, calendriers des vacances scolaires etc.) et permet de faire des prévisions concernant la situation du trafic à un moment précis, et notamment en cas de formation de bouchons. Lorsque la formation et l'évolution des bouchons peuvent être anticipées avec suffisamment de précision, cela permet, de l'avis des exploitants de routes et des usagers de la route, d'optimiser l'utilisation des infrastructures routières. Un calcul effectué avec les chiffres datant de 2005 montre qu'**une réduction du coût induit par les bouchons, ne serait-ce que d'un pour-cent, se traduit par des économies annuelles de l'ordre de CHF 10 à 15 milliards.**

En Suisse, il manque aujourd'hui un système de prévision des bouchons fiable qui apporte aux exploitants de routes et aux usagers de la route l'aide nécessaire pour une gestion du trafic adéquate tout en leur permettant de planifier des itinéraires adaptés. Actuellement, les systèmes de prévision des bouchons qui sont utilisés en Suisse se limitent en grande partie à une représentation historique ou actuelle de la situation du trafic et à une simple extrapolation de ces données pour représenter la situation à venir. Ces prévisions rudimentaires ne sont souvent pas en mesure de rendre compte précisément de l'évolution du trafic et des bouchons ; si bien que le trafic ne peut être informé et piloté que de manière réactive et que les situations de bouchons ne peuvent quasiment pas être évitées de manière proactive. Or, des analyses de scénarios montrent qu'un pilotage du trafic proactif, autrement dit **un pilotage basé sur des prévisions réelles, permettrait** de minimiser les affluences de trafic et ainsi d'éviter complètement les bouchons ou du moins **de réduire le nombre d'heures de bouchons.**

La littérature nationale et internationale qui se consacre aux prévisions du trafic et des bouchons se caractérise par une multitude de méthodes différentes. Toutefois, beaucoup

de ces méthodes étudiées n'en sont pour l'instant qu'au stade académique et n'ont été appliquées que de manière restreinte à des situations réelles. Il existe donc un potentiel considérable pour des applications futures visant la réduction du nombre d'heures de bouchons. L'un des objectifs du présent projet était d'évaluer ce potentiel, d'identifier de quelle manière il pourrait profiter à un système de prévision des bouchons en Suisse et aussi, de définir comment un tel système pourrait être conçu.

Ce projet doit notamment permettre de répondre aux questions directrices suivantes :

- Quel est l'état de l'art en matière des procédés et systèmes de prévision des bouchons ? Quels sont les avantages et les inconvénients, en particulier pour la Suisse ?
- Quels sont, du point de vue des exploitants de routes et des usagers de la route, les besoins et exigences en matière des procédés et systèmes de prévision des bouchons ?
- Quels sont les facteurs et paramètres déterminants par rapport aux bouchons sur les routes nationales (jour calendaire, conditions météorologiques, événements, etc.) ?
- Quelles sont les données idéales à utiliser pour établir une prévision fiable sur le réseau des routes nationales ? Quelles sources de données sont pertinentes, et à quel point le sont elles ?
- Quelles données sont disponibles (trafic, conditions météorologiques, événements etc.) pour la prévision des bouchons, et sous quelle forme le sont-elles ? Quelle est la situation actuelle et à quoi peut on s'attendre pour l'avenir ? Les données des différents fournisseurs de données sont-elles facilement accessibles ?
- Quels algorithmes conviennent le mieux pour des prévisions fiables et pour l'intégration des données relatives aux bouchons sur les routes nationales ?
- De quelle manière devrait être conçu un système de prévision des bouchons ? Quels éléments et fonctionnalités devrait-il comporter ? De quelle manière pourrait-il être intégré au système de gestion du trafic en Suisse (VM-CH) ?
- De quelle manière le fonctionnement et l'impact d'un tel système sont-ils à évaluer ?

Résultats de la recherche

En préambule on peut retenir qu'en Suisse le potentiel d'un système de prévision des bouchons pourrait être utilisé de manière bénéfique et que la mise en application d'un tel système est possible. Les conclusions qui ont été faites par rapport aux questions directrices sont résumées ci-dessous:

Etat de l'art en matière de procédés pour la prévision des bouchons

Une étude approfondie de la littérature montre que :

- Il existe différents types de méthodes pour la prévision du trafic, à savoir des méthodes basées sur des simulations et des méthodes statistiques. Des méthodes hybrides ont également été décrites.
- Pour **les méthodes de prévision basées sur des simulations** on fait la distinction entre les simulations microscopiques, mésoscopiques et macroscopiques. Les méthodes basées sur des simulations sont surtout utilisées pour des prévisions stratégiques à long terme ou pour des calculs de scénarios, mais elles peuvent aussi être utilisées pour des prévisions à court terme. L'avantage de ces méthodes est qu'elles permettent une bonne représentation spatio-temporelle des prévisions. Toutefois, pour une application généralisée des prévisions à court terme, les méthodes basées sur des simulations nécessiteraient un très grand nombre de données et de calculs et seraient synonymes d'incertitudes concernant la précision du calibrage des simulations. C'est pourquoi, dans la pratique, les méthodes basées sur des simulations sont souvent combinées avec des méthodes statistiques.
- Pour les **méthodes statistiques** on fait la distinction entre les méthodes heuristiques, non-paramétriques et paramétriques. La catégorie des méthodes statistiques comprend aussi les méthodes de classification des courbes de variation qui, du fait de leur efficacité, sont souvent appliquées dans la pratique. Les méthodes statistiques conviennent aussi bien pour des prévisions à court terme que pour des prévisions à plus long terme. L'avantage de ces méthodes, comparé aux méthodes

basées sur des simulations, est qu'elles nécessitent moins de données et de calculs, que le calibrage est généralement plus simple et qu'il est relativement aisé d'y intégrer des données externes (telles que par exemple les conditions météorologiques). Toutefois, la représentation précise de la dynamique du trafic, notamment dans les situations de bouchons, n'est possible que de manière restreinte.

- Les travaux de recherche effectués montrent que les résultats obtenus sont généralement meilleurs en utilisant des méthodes hybrides ou, plus généralement, en combinant différentes approches, qu'en utilisant des méthodes individuelles.
- A ce jour, une grande partie des méthodes décrites de manière scientifique n'ont été mises en pratique que de manière restreinte. Cela indique que de nombreux procédés sont soit inadaptés pour une mise en pratique, soit qu'il existe encore un très grand potentiel pour une mise en pratique. On peut partir du principe que les deux hypothèses sont valables.

Etat de l'art en matière de systèmes pour la prévision des bouchons

L'analyse de 12 systèmes d'information sur les bouchons et de prévisions des bouchons a abouti aux conclusions suivantes :

- Les systèmes de prévision des bouchons actuels utilisent soit des méthodes statistiques, soit des méthodes basées sur des simulations, soit des méthodes combinées. Les avantages et inconvénients des différents systèmes coïncident avec les avantages et inconvénients des méthodes utilisées (cf. ci-dessus).
- Actuellement seul quelques rares systèmes de prévision des bouchons sont utilisés aussi bien pour l'information sur le trafic que pour la gestion du trafic. Il y a en effet une grande **différence** entre un système de prévision des bouchons qui n'est utilisé que pour **l'information sur le trafic** et un système qui, en plus, est utilisé pour **la gestion du trafic**. En effet, la gestion du trafic requiert des prévisions de très grande qualité et une réactualisation des données à intervalles courts ; les exigences envers un tel système sont donc plus grandes que pour un système fournissant uniquement des informations sur la situation du trafic, et avec lequel des prévisions des bouchons moins précises ont des conséquences moindres.
- Les **'grands fournisseurs'** de systèmes de prévision des bouchons proposent généralement des **produits standard** ; ceux-ci sont très répandus et **reflètent correctement la situation actuelle du trafic**. Avec ces systèmes-là, c'est l'information sur le trafic qui prime et non pas la gestion du trafic. Ils présentent des lacunes de part leur **capacité prévisionnelle** et leur **capacité d'adaptation aux conditions locales et spécifiques** en Suisse. Les procédés et méthodes de prévision et les facteurs déterminants qui sont pris en compte pour les prévisions manquent souvent de transparence (black-box).
- Les **'petits fournisseurs'** mettent plutôt en avant des procédés de prévision de haute qualité qui bénéficient de garanties scientifiques et qui permettent d'avoir une bonne concordance entre les valeurs prévisionnelles et les valeurs effectivement relevées. Ces procédés semblent mieux convenir pour la **prise en compte des conditions locales et spécifiques**. Du fait que les valeurs prévisionnelles des systèmes utilisant ces procédés sont plutôt de meilleure qualité il apparaît que ces systèmes-là permettent d'obtenir également de meilleurs résultats dans le cadre de la gestion du trafic.
- La plupart des systèmes de prévision des bouchons qui ont été analysés utilisent **des données de trafic provenant de différentes sources**. Du fait de l'évolution des technologies relatives à la collecte des données de trafic et du grand nombre de sources de données différentes, les systèmes de prévision de bouchons doivent être très flexibles pour pouvoir utiliser les différentes données de trafic, mais aussi les différentes données environnementales (conditions météorologiques, chantiers, événements etc.).
- Les systèmes de prévision des bouchons qui ont été analysés fournissent des données sortantes avec des degrés de détail différents. La plupart d'entre eux **représentent l'état du trafic et indiquent les temps de parcours**. Ils ne sont que très peu à indiquer en plus la vitesse de croisière pour un trajet et surtout aussi la longueur des bouchons.

- Les systèmes de prévision des bouchons qui ont été analysés fournissent des **prévisions pour différents horizons de prévision** et utilisent les données historiques, actuelles et à venir à des degrés variés. Pour la conception du système il est important de savoir quels horizons de prévision sont prioritaires pour quels types d'utilisation.
- La **disponibilité des données** – et ce n'est pas surprenant – est un **critère essentiel**. Cela vaut aussi bien pour les données du trafic que pour les données environnementales, et tout autant pour les données historiques, actuelles et à venir (cf. paragraphe sur la disponibilité des données).
- Parmi les **facteurs garants d'efficacité** il y a une **période de test suffisamment longue** pour les systèmes pas encore établis, la coopération **avec les fournisseurs de données** (p.ex. pour les données de trafic mobiles), la crédibilité des sources de données ainsi que la **qualité des données sortantes**. Les solutions pouvant être appliquées de manière générale (avec un faible degré d'individualisation) représentent un facteur garant d'efficacité uniquement pour les 'grands fournisseurs'.
- La disponibilité des données, mais aussi l'identification des capacités des réseaux, l'investissement dans le développement de logiciels et de systèmes ainsi que la faible disposition à payer sont des facteurs qui peuvent se révéler comme étant des obstacles.
- En principe, tous les systèmes analysés peuvent être utilisés en Suisse. Les systèmes des grands fournisseurs sont d'ores et déjà utilisés (INRIX, TomTom, Google). Le Système TTVMS serait utilisable à condition que des investissements considérables soient faits par rapport à la collecte des données du trafic basée sur la reconnaissance des plaques d'immatriculations.

Exigences envers un système de prévision des bouchons

Du point de vue des usagers de la route et des exploitants de routes les exigences envers un système de prévision des bouchons sont les suivantes :

- Concernant les **types d'utilisation** on constate que **l'information sur le trafic, la planification du voyage et de l'itinéraire** ainsi que la **gestion du trafic** priment sur la planification des chantiers et des travaux d'entretien, la planification du réseau routier et le monitoring du trafic.
- Concernant les données fournies par un système de prévision des bouchons ce sont les **temps de parcours, les pertes de temps, la longueur des bouchons, la situation du trafic** et la **durée des bouchons** qui priment sur la vitesse de croisière, la densité et la qualité du trafic.
- Concernant les horizons de prévision, les **prévisions à courts terme** (minutes, heures) priment sur les **prévisions à moyen et à long terme** (jours, mois).
- Concernant la **couverture géographique** des systèmes, la **Suisse** et ses pays limitrophes sont prioritaires.
- Concernant les catégories des routes, ce sont les **autoroutes et les routes à grande circulation** qui devraient être couvertes en priorité.
- Concernant les catégories de véhicules, il faudrait **faire la distinction entre les véhicules de tourisme et les poids-lourds**, notamment pour les données sortantes (p.ex pour les temps de parcours).
- Pour les prévisions à court terme les **intervalles entre les réactualisations** se situent idéalement entre 1 et 5 minutes (gestion du trafic, infos sur le trafic On-trip). Pour les prévisions à moyen et à long terme les intervalles entre les réactualisations peuvent être plus longs.
- Concernant la **fiabilité** des prévisions à court terme, les temps de parcours ne devraient pas dévier de plus de 10% des valeurs effectives, tandis que pour la longueur des bouchons, les différences peuvent être un peu plus importantes. Pour les prévisions à moyen et à long terme des différences plus importantes sont acceptées. Les usagers de la route et les exploitants de routes sont en revanche plus pointilleux par rapport à des informations erronées : sur 100 informations fournies il ne faudrait pas qu'il y en ait plus de 5 qui soient erronées ; cela ferait très vite baisser le degré d'adhésion au système.

- Un système de prévision des bouchons devrait, **au niveau des données entrantes**, comporter des **interfaces avec la collecte des données de trafic, le monitoring du trafic, les prévisions météorologiques, les stations de mesures météorologiques** etc.
- Un système de prévision des bouchons devrait comporter, **au niveau des données sortantes**, des **interfaces avec les systèmes d'information sur le trafic, les systèmes de gestion du trafic, des services relatifs à des événements** etc.
- La tendance actuelle, telle qu'elle a été identifiée, montre un **besoin grandissant en matière de systèmes de prévision des bouchons et des exigences accrues envers les systèmes** (par rapport aux informations traitées, à la résolution spatiale et à la fiabilité).

Evaluation des procédés de prévision et des variables des prévisions

Pour disposer d'un système de prévision fiable et utilisable universellement il est indiqué de combiner plusieurs procédés. Cela permet de choisir ou de combiner les procédés adaptés aux différentes situations du trafic. Les procédés doivent pouvoir s'adapter au mieux à une situation locale du trafic et doivent pouvoir être calibrés en ligne. Cela vaut aussi pour la méthode de sélection des facteurs externes déterminants qui sont utilisés pour la prévision. Une évaluation de différentes méthodes effectuée à l'aide de scénarios tests et de données réelles apporte les conclusions suivantes :

- **Les méthodes de classification des courbes de variation** sont bien adaptées pour effectuer des prévisions (locales) basiques, autrement dit, pour l'identification du 'régime de circulation' actuel ou pronostiqué. A partir de cette base, d'autres procédés peuvent être appliqués de manière ciblée.
- Les **méthodes statistiques univariées** conviennent pour les **prévisions à court terme** (jusqu'à env. 30 min.) se rapportant à la densité du trafic et aux vitesses sur différents tronçons. Pour des horizons de prévision plus lointains une combinaison avec d'autres méthodes est nécessaire.
- Les **prévisions relatives aux temps de parcours** peuvent être déduites à partir des prévisions se rapportant à la densité du trafic et aux vitesses relevées. En complément, les temps de parcours peuvent aussi être pronostiqués directement pour des parties de réseaux toutes entières, par exemple avec les **réseaux neuronaux** ; une approche qui permet, comparée à des prévisions purement locales, de mieux saisir la situation globale du trafic. Les analyses qui ont été faites montrent que cela permet d'améliorer les prévisions, notamment en cas de formation de bouchons.
- Pour les **prévisions à moyen et à long terme** la situation locale du trafic sera de moins en moins pertinente. En conséquences, pour les prévisions à plus long terme, il sera nécessaire d'avoir de plus en plus recours à des méthodes permettant de mieux reconnaître et de mieux définir le schéma de la situation du trafic, notamment grâce à l'utilisation de **données historiques**.
- **L'intégration** d'un grand nombre de **facteurs externes** nécessite a priori une grande quantité de données et peut éventuellement altérer la qualité des prévisions. Il est donc recommandé de se focaliser sur un petit nombre de facteurs d'influence pertinents. Pour les prévisions à court terme les facteurs externes sont souvent déjà représentés dans la situation actuelle du trafic et ne doivent (selon les cas) a priori pas être pris en compte spécifiquement. Pour les prévisions à plus long terme les facteurs externes sont décisifs. Pour l'identification des facteurs d'influence pertinents il est conseillé de recourir à des **techniques de filtrage** qui sélectionnent les facteurs les plus importants de la situation actuelle. D'ailleurs, plusieurs méthodes scientifiques, dont certaines sont inédites, ont d'ores et déjà été évaluées, or aucun test pratique n'a encore été effectué.
- Des méthodes statistiques relativement simples peuvent aussi être utilisées pour la prévision de la formation d'un bouchon (dans le sens d'un **avertisseur de bouchon**). Toutefois, les prévisions relatives à l'évolution d'une **dynamique de bouchon** doivent a priori être effectuées **sur base de simulations**.

Disponibilité des données pour un système de prévision des bouchons

Une analyse sur la disponibilité et la compatibilité des données de trafic et des données environnementales pouvant être utilisées dans les systèmes de prévision des bouchons apporte les conclusions suivantes :

- Les **données de trafic historiques** provenant du **monitoring du trafic** ne peuvent être utilisées que pour le développement et la validation d'un système de prévision des bouchons et pour des prévisions à long terme. Toutefois, combinées avec d'autres données historiques, elles constituent une base solide pour un bon système de prévision.
- Le **degré de couverture des compteurs de trafic** (avec boucles d'induction) continuera d'augmenter à l'avenir, et ce également dans les secteurs où il y a des chantiers ou des travaux. C'est pourquoi le système de prévision des bouchons devrait être conçu de sorte à pouvoir s'adapter au nombre de postes de comptage et prendre en compte également les appareils de comptage mobiles dans les secteurs où il y a des travaux/chantiers. Un certain degré de couverture est nécessaire pour l'ensemble du réseau (p.ex. pour la détection d'événements et de dangers) et un degré de couverture élevé est décisif pour des secteurs critiques.
- Les **Floating Car Data (FCD)** et les **Floating Phone Data (FPD)** vont continuer à se répandre et à s'améliorer, et par là même, permettre une meilleure couverture des tronçons de routes où la circulation est moins dense. La qualité des données de trafic devrait elle aussi s'améliorer.
- La **standardisation en matière de la collecte de données de trafic** semble se poursuivre et devrait donc conduire à une uniformisation de la qualité des données sortantes.
- La **collecte de données de trafic se rapportant à des tronçons** (durées des parcours, vitesses de croisière etc.) se répand de plus en plus et conduit à une nette amélioration de la qualité des données entrantes d'un système de prévision des bouchons.
- Données de trafic : Dans un **premier temps** c'est l'utilisation des données de trafic provenant de **compteurs de trafic** qui prime ; dans un **deuxième temps** il faudrait utiliser **des données FCD ou FPD** ou des données bluetooth.
- Données environnementales : Les **données météorologiques** devraient être utilisées autant que possible dès les premières phases. La prise en compte de l'état des routes semble n'avoir de sens que lors d'une phase ultérieure.
- Événements et dangers (planifiables) : Les informations relatives aux calendriers des vacances scolaires, à des événements et à des chantiers peuvent être pris en compte dans le système de prévision des bouchons.
- Événements et dangers (non-planifiables) : Dans un premier temps il est conseillé, du fait de la complexité que cela représenterait, de ne pas intégrer les **données relatives aux accidents, les informations diffusées par la police et les données relatives aux mesures de gestion du trafic**. L'option d'une prise en compte ultérieure de ces données devrait cependant être retenue. Il est à noter que l'impact que les événements ont sur la circulation peut être détecté immédiatement par le biais du comptage du trafic.
- L'utilisation de données entrantes comporte de nombreux **risques** pour un système de prévision des bouchons (qualité insuffisante des données, données erronées, pas de données communiquées pour cause de défaillance, communication tardive des données etc.) ; cela peut altérer la qualité des données sortantes. Il est donc conseillé d'effectuer régulièrement des contrôles de routine pour minimiser le plus possible ces risques.

La quantification précise des sources de données fiables et la quantification des risques relatifs à la qualité des prévisions doit être faite lors d'une utilisation test.

Concept système pour un système de prévision des bouchons

Le concept système proposé tient compte des différentes possibilités techniques, des besoins et des capacités d'évolution, et suggère une architecture modulaire et 4 étapes

pour l'extension du système. Les principales caractéristiques du concept sont résumées ci-dessous :

- **Aspects généraux** : Afin de pouvoir convenir aux différentes catégories d'utilisateurs et aux différents types d'utilisation, le système prévoit trois unités de prévisions différentes, adaptées aux besoins des utilisateurs (sous forme de services partiels) (cf. illustration suivante) :

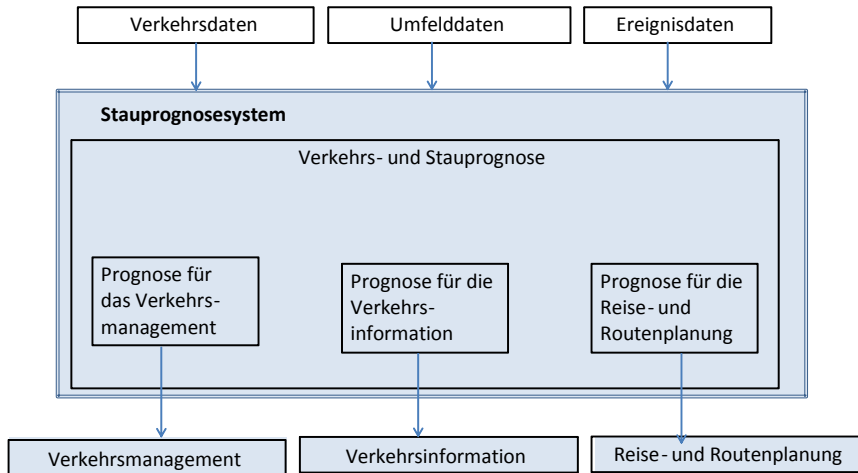


Illustration : Services partiels du système de prévision des bouchons

Verkehrsdaten = Données de trafic

Umweltdaten = Données environnementales

Ereignisdaten = Données relatives à des événements

Stauprognosesystem = Système de prévision des bouchons

Verkehrs- und Stauprognose = Prévision du trafic et des bouchons

Prognose für das Verkehrsmanagement = Prévisions pour la gestion du trafic

Prognose für die Verkehrsinformation = Prévision pour l'information sur le trafic

Prognose für die Reise- und Routenplanung = Prévision pour la planification du voyage et de l'itinéraire

Verkehrsmanagement = Gestion du trafic

Verkehrsinformation = Information sur le trafic

Reise- und Routenplanung = Planification du voyage et de l'itinéraire

1. **Service partiel 'Prévision pour l'information sur le trafic'** : Calcul de la situation du trafic à venir, pour les usagers de la route
2. **Service partiel 'Prévision pour la planification du voyage et de l'itinéraire'** : Aide à la planification du voyage et aide pendant le voyage
3. **Service partiel 'Prévisions pour la gestion du trafic'** : Exportation de données et d'analyses spécifiques, ainsi que possibilités de feedback et d'intervention pour la gestion du trafic

Tous les services s'appuient sur un système de base identique et sur une architecture système appropriée.

- **Architecture système** : Le système repose sur une **architecture modulaire** qui permet une extension flexible du système. On distingue alors les modules de prétraitement (les outils), les modules de post-traitement, les modules pour la prévision à proprement parler et les modules techniques de prises en charge (cf. illustration suivante).

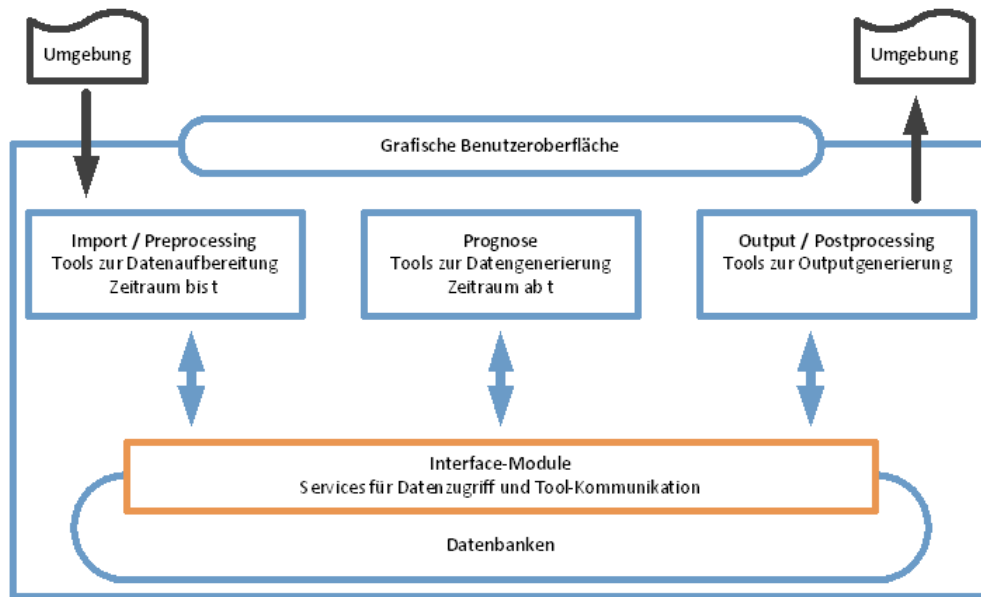


Illustration : Architecture système modulaire

Umgebung = Environnement

Grafische Benutzeroberfläche = Interface graphique

Import / Preprocessing = Import / Prétraitement

Tools zur Aufbereitung der Daten = Outils pour le traitement des données

Zeitraum bis t = Laps de temps jusqu'à t

Prognose = Prévision

Tools zur Generierung der Daten = Outils pour la génération des données

Output / Postprocessing = Données sortantes / Post-traitement

Tools zur Outputgenerierung = Outils pour la génération des données sortantes

Interface Modul = Interface Module

Services für Datenzugriff und Tool-Kommunikation = Services pour accès aux données et communication interne entre les outils

Datenbanken = Banques de données

- Côté TI il est nécessaire de prévoir une parallélisation du traitement des données en raison de l'important travail de calcul qui est requis et afin de palier à une éventuelle défaillance. Pour assurer la synchronisation des modules et pour la gestion des données c'est un **concept message queue** combiné avec une **solution GRID** qui est proposé.
- L'intégration du système de prévision des bouchons dans l'environnement informatique de l'OFROU devrait se faire sous forme d'une **application spécifique et autonome**. Trois variantes d'intégration avec différents degrés d'autonomie de l'application sont actuellement en discussion.
- Le **concept d'étapisation** à été élaboré pour faire coïncider au mieux le temps qui est nécessaire pour couvrir les besoins concernant la disponibilité des données et les méthodes appropriées avec l'évolution du projet. Les besoins qui peuvent d'ores et déjà être couverts avec les sources de données et les procédés de prévision existants sont prioritaires. Les principales étapes sont résumées comme suit :
 - 1^{ère} étape :
 - Prévision de l'état du trafic (servant de base)
 - Limitation à des données de détecteurs et des données environnementales basiques
 - Routes nationales et sélection de routes cantonales à grand débit
 - 2^{ème} étape :
 - Prévisions directes des temps de parcours
 - Extension à FPD (ou FCD)

3e étape :

- Extension aux routes cantonales principales et à grand débit
- Fonctions de routage (avec reroutage rudimentaire)

4^e étape :

- Simulation de points névralgiques
- Reroutage complet
- Données environnementales complètes
- Interfaces gestion du trafic automatisées
- **Concept relatif aux prévisions** : Dans un premier temps, le concept relatif aux prévisions se focalise sur la première étape. On propose de combiner une méthode utilisant des schémas avec des méthodes de prévisions statistiques à court terme. Cette proposition comprend une méthodologie pour l'intégration des facteurs externes ainsi que des méthodologies aboutissant à la combinaison optimale de différentes méthodes de prévision pour différents régimes de trafic et horizons de prévision. Un tel concept relatif aux prévisions représente une bonne base pour les évolutions futures.

Evaluation du concept système d'un système de prévision des bouchons

L'évaluation du concept système d'un système de prévision des bouchons apporte les connaissances suivantes :

- L'illustration ci-dessous résume les résultats de l'évaluation des quatre étapes. On peut voir quelles étapes représentent une évolution par rapport à quels critères.

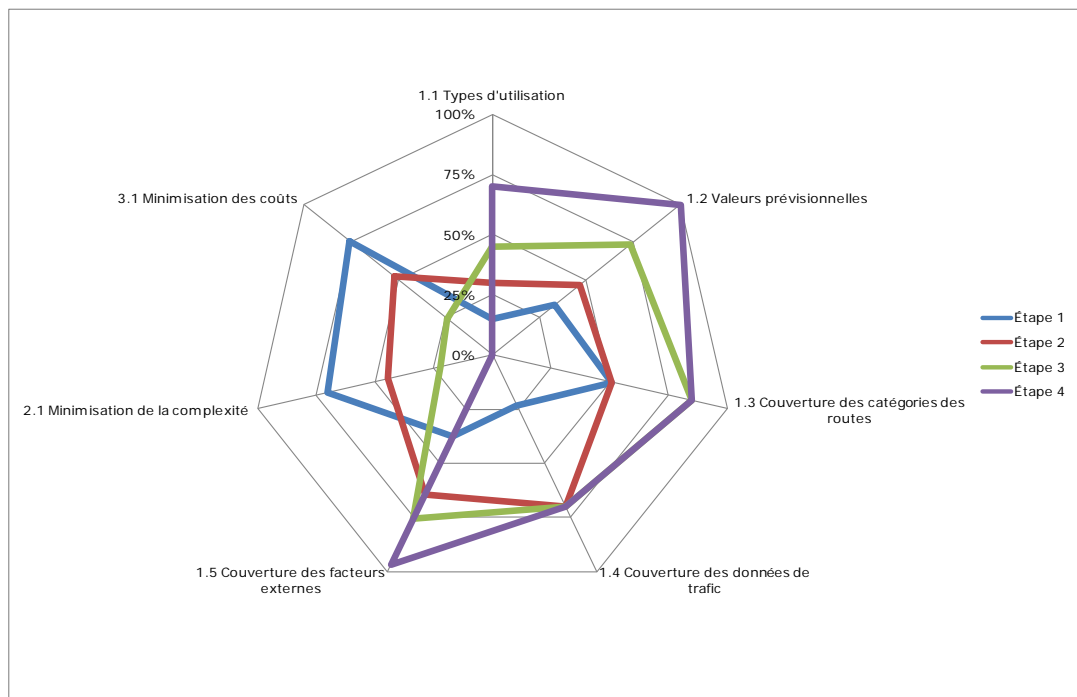


Illustration : Aperçu des degrés de couverture des besoins des quatre étapes

- **L'étape 1** permet d'atteindre les **minimas requis** avec un **investissement relativement faible** et une complexité moindre.
- **L'étape 2** est un peu plus chère et plus complexe, mais marque, grâce à la prise en compte des données se rapportant à des tronçons (Floating Car Data / Floating Phone Data) une évolution significative, notamment pour le sous-critère 'couverture des données de trafic'. Les étapes suivantes n'apportent pas d'avantages supplémentaires par rapport à ce sous-critère. La prise en compte des conditions météorologiques, des chantiers et des calendriers des vacances scolaires à l'étranger marque

- quant à elle une évolution significative pour le sous-critère 'facteurs externes' par rapport à l'étape 1.
- **L'étape 3** est encore un peu plus chère et plus complexe que l'étape 2, mais marque une évolution significative pour le sous-critère 'valeurs prévisionnelles' (prévision directe de la longueur et de la durée des bouchons) et pour le sous-critère 'couverture des catégories des routes' (couverture intégrale des routes cantonales principales et à grand débit).
 - **L'étape 4** permet une évolution nette par rapport à l'étape 3 pour ce qui est des 'types d'utilisation' (reroutage, interface automatisée pour mesures liées à la gestion du trafic etc.), des 'valeurs prévisionnelles' (calcul de la longueur et de la durée des bouchons basées sur de simulations) et de la prise en compte des facteurs externes (accidents / incidents, interface automatisée pour mesures liées à la gestion du trafic).
 - Une **analyse SWOT** a permis d'identifier les **points forts de la première étape** : les principales fonctionnalités sont couvertes, investissement minimal, faisabilité assurée, risques minimales par rapport au fonctionnement, capacités d'extension. Les **points faibles de la première étape** sont : les types d'utilisation ne sont pas tous couverts, résolution spatiale faible étant donnée que seules des données transversales sont prises en compte, prévisions faites à partir de déductions et de ce fait de faible qualité, les routes cantonales principales et à grande circulation ne sont couvertes que partiellement. Comparée à la première étape, **la quatrième étape apporte toute une série d'avantages et de fonctionnalités supplémentaires** (meilleure définition grâce à l'utilisation de données se rapportant à des tronçons, prise en compte de tous les facteurs externes déterminants, amélioration de la qualité des prévisions). Parmi les **points faibles de la quatrième étape** on peut citer l'investissement important que représente l'application et la gestion du système et surtout le degré de faisabilité qui actuellement est faible.
 - Parmi les **points qui parlent en faveur** d'un système de prévision des bouchons il y a la pression ressentie face à la problématique de la situation actuelle et qui, a priori, devrait perdurer, voire s'accroître. L'évolution technologique représente un atout, aussi bien pour les données entrantes du système que pour l'utilisation des données sortantes. L'aménagement du temps de travail et le besoin accru en informations en vue d'optimiser la gestion du temps sont également des facteurs qui favorisent le développement d'un système de prévision des bouchons.
 - Parmi les **points qui ne parlent pas en faveur** d'un tel système il y a les ressources limitées (personnel, financement), d'éventuelles conflits d'objectifs et d'intérêts et le degré d'acceptation. Si des alternatives ne sont pas proposées, que ce soit au niveau des itinéraires, des moyens de transport ou pour des heures de départ, l'intérêt que représente un système de prévision des bouchons s'amenuise.
 - Voici les **arguments qui plaident pour un système de prévision des bouchons** :
 1. Les usagers de la route sont mieux informés de la situation du trafic à venir sur le réseau routier qu'ils empruntent et peuvent ainsi :
 - mieux planifier leurs voyages, transports, interventions...
 - prévoir et estimer les temps de parcours de manière plus fiable
 - s'adapter suffisamment tôt à la situation du trafic telle qu'elle est prévue
 2. Les exploitants de routes sont mieux informés de la situation du trafic à venir sur le réseau routier qu'ils exploitent et peuvent ainsi optimiser la gestion du trafic et les activités liées à l'exploitation.
 3. Si le système de prévision des bouchons est intégré dans les systèmes de l'OFROU, il est alors possible de le piloter directement et de l'intégrer à la gestion du trafic.
 - Voici les arguments qui plaident contre un système de prévision des bouchons :
 1. Pour que le développement et le fonctionnement d'un système de prévision des bouchons soient garantis il faut prévoir un certain investissement (financier et humain)
 2. Des transferts du trafic non souhaités ne peuvent pas être complètement exclus (p.ex. vers le réseau routier secondaire)

- Une **réduction du coût relatif** aux bouchons ne serait-ce que d'un pour-cent, obtenue grâce à un système de prévision des bouchons, se traduit par **des économies annuelles de l'ordre de CHF 10 à 15 milliards**. La réduction du nombre d'heures de bouchons représente un grand potentiel pour l'économie du pays. Même une petite amélioration peut entraîner de grands profits.

Lacunes en matière de la recherche

Dans le cadre de ce projet des lacunes en matière de la recherche ont été identifiées. Celle-ci sont subdivisées comme suit :

1. travaux nécessaires sur les algorithmes
2. clarifications concernant les données, mais qui ne peuvent être faites que dans le cadre d'un test
3. clarifications par rapport à l'efficacité du système

Les lacunes en matière de la recherche subsistent notamment dans les domaines suivants :

- Les **besoins et exigences** qui ont été exprimés par les usagers de la route et les exploitants de routes devraient être vérifiés et précisés à l'aide d'un échantillon plus grand.
- Certaines sources de données de trafic entrantes (données transversales, données de se rapportant à des tronçons) sont à vérifier dans le cadre d'un **test de fonctionnement** et à évaluer quant à leur compatibilité. Parallèlement, les risques relatifs à la qualité des prévisions doivent être quantifiés plus précisément.
- La **capacité prévisionnelle**, la **qualité** (qualité des statistiques, représentation spatiale etc.), la **flexibilité** (par rapport aux données entrantes, à l'extension etc.) et la **fiabilité/stabilité** du système doivent être identifiées dans le cadre d'un test de fonctionnement et d'analyses complémentaires.
- **L'impact** du système de prévision des bouchons **sur les usagers de la route** (p.ex. l'impact de l'information relative aux bouchons sur le comportement des automobilistes et sur la fluctuation du trafic) et sur les exploitants de routes doit être analysé plus en détail pour différentes configurations de réseaux. Ces analyses pourraient être effectuées à l'aide de simulations, de simulateurs de conduite et dans le cadre d'analyses complémentaires effectuées lors du test de fonctionnement.
- Des **effets de rétroaction** entre le trafic et la prévision sur l'état du trafic surviennent notamment lorsque les usagers de la route adaptent (comme éventuellement souhaité) leur comportement du fait de la prévision et que la prévision initiale devient caduque. Les méthodes proposées permettent de prendre en compte cette auto-modification de la prévision si les usagers réagissent de manière similaire lors de prévisions similaires. Toutefois, l'ampleur et l'impact des effets de rétroaction provoqués par des changements de comportement des usagers de la route suite à des changements de prévisions restent à étudier. Il reste notamment à clarifier dans quelles conditions les prévisions aboutissent de manière optimale à l'effet souhaité. Dans certains cas, il faudrait bloquer certaines informations pour éviter une sur-modulation du système. Il reste également à clarifier dans quelles situations les prévisions aboutissent à de nouvelles situations d'équilibre stables, et dans quelles situations se produisent des situations de flottement entre la circulation et la prévision du trafic. Ces questions peuvent en partie être étudiées de manière empirique dans le cadre d'un test de fonctionnement du système. Une étude réalisée à l'aide de simulations pourrait éventuellement être utile pour révéler différents scénarios du comportement, et ainsi mieux comprendre les effets produits par le système.
- Concernant les **différentes méthodologies de prévision** qui sont adoptées lors des étapes ultérieures, il existe encore des lacunes en matière de la recherche et des besoins d'amélioration, étant donnée que certaines d'entre elles n'ont encore jamais été utilisées avec des systèmes fonctionnant en situation réelle. Cela concerne notamment :
 - la méthodologie pour la prévision directe du temps de parcours à l'aide de données se rapportant à des tronçons (FCD/FPD) (étape 2)

- la méthodologie pour la classification des longueurs et des durées des bouchons (étape 3)
- la méthodologie pour le reroutage dynamique basé sur les prévisions en vue de l'optimisation individuelle des itinéraires (étape 3)
- la calibration en temps réel des prévisions basées sur des simulations (étape 4)

Recommandations

Le présent projet permet de faire les recommandations suivantes par rapport à l'utilisation d'un système de prévision des bouchons en Suisse :

- Il est recommandé de **mettre en pratique un système de prévision des bouchons**. Au vu des coûts très importants que représentent les bouchons pour l'économie nationale, on peut s'attendre à un bon rapport coûts-avantages.
- Le développement d'un **système fait sur mesure pour la Suisse** permet une prise en compte optimale des conditions locales ; cela représente un avantage par rapport aux solutions standard des fournisseurs de systèmes internationaux.
- Concernant la conception du système, il est recommandé d'opter pour une **solution modulaire permettant des extensions du système par étapes**. Cela pour garantir, d'une part, la mise en place rapide d'un système certes rudimentaire, mais fonctionnel, et, d'autre part, d'avoir la maîtrise des risques pour les extensions du système, tout en disposant d'une grande flexibilité. La solution modulaire permet surtout d'intégrer ultérieurement des méthodes de prévision au système qui n'ont pas encore été testées ou qui ne sont pas encore connues à ce jour.
- La **disponibilité des données** est un point crucial pour un système de prévision des bouchons. Cela vaut aussi bien pour les données de trafic que pour les données environnementales, et tout autant pour les données historiques, actuelles et à venir. Les efforts qui sont faits actuellement pour améliorer la collecte des données de trafic doivent être intensifiés et aller encore plus dans le sens des exigences d'un système de prévision des bouchons.
- Les **tests de fonctionnement** sont basées sur la solution modulaire et devraient en premier lieu couvrir la première étape du système de prévision des bouchons. Dans la mesure du possible, il faudrait aussi intégrer certains éléments des étapes ultérieures (p.ex. intégration de données se rapportant à des tronçons, intégration de facteurs d'influence supplémentaires, intégration des routes cantonales à grande circulation). Il existe plusieurs possibilités pour les tests de fonctionnement; celles-ci doivent être étudiées et définies conjointement avec l'OFROU et les cantons.

Les **lacunes en matière de recherche** devraient être **comblées** grâce à des projets additionnels et à un test de fonctionnement.

Summary

Initial position

In 2005 approximately 20'000 hours per year were lost in Switzerland due to traffic congestion. This creates enormous costs of approximately CHF 1.5 billion, about half of which are incurred on motorways [ARE, 2007]. The hours lost to traffic congestion on the national road network increased by 80% between 2005 and 2012 (see figure below), so that the 2005 costs are now much higher.

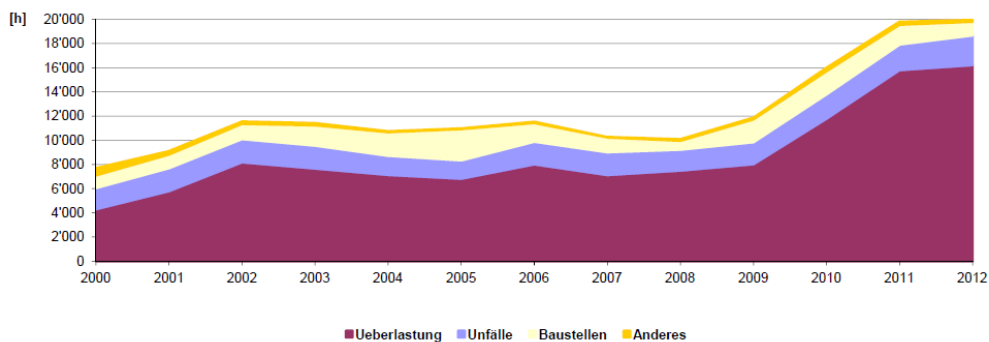


Figure: Development of hours lost to traffic congestion in Switzerland

Traffic management measures are applied to avoid congestion, to ensure that traffic moves as smoothly and safely as possible, and to keep road users informed about current and future traffic conditions.

Reliable congestion forecasting methods and systems can support and sustainably improve traffic management on national motorways and major roads. In order to make forecasts about the traffic conditions that will prevail at a particular time - in particular traffic jams - **traffic congestion forecasting systems** use historically and currently measured and calculated parameters for traffic and the relevant influencing factors (weather, atmospheric conditions, construction sites, public holidays etc.). If the origin and development of congestion situations can be accurately anticipated, the use of the road infrastructure can be optimised from the point of view of road operators and road users. Moreover, if a traffic congestion forecasting system could **reduce congestion costs by just 1%**, conservative calculations suggest **annual savings in the order of CHF 10 to 15 million**, on the basis of the 2005 figures.

Switzerland does not currently have a reliable congestion forecasting system to provide road operators and users with the necessary support in achieving effective traffic management and useful journey planning. Existing traffic information systems in Switzerland are largely restricted to the representation of current or historical traffic situations, which are then extrapolated into the future. These rudimentary forecasts are often unable to predict the development of traffic and congestion situations correctly: road users are merely informed or controlled reactively and there is little chance of preventing congestion situations in proactive ways. However, initial scenario studies show that proactive - i.e. forecast-based - control of traffic would enable traffic peaks to be levelled to the extent that congestion times could be prevented completely or at least reduced.

The national and international literature on traffic and congestion forecasts describes a considerable variety of different methods. Many studies are only academic in nature and could only be applied to real situations in very limited ways. There is therefore considerable potential for future applications designed to reduce congestion times. One goal of the project was to determine the extent to which a congestion forecasting system could be used in Switzerland and what its features might be.

Among other things, the project should provide answers to the following central questions:

- What is the state of the art with respect to congestion forecasting methods and systems? What are their advantages and disadvantages, particularly in relation to Switzerland?
- What are the needs/requirements of congestion forecasting methods and systems from the perspective of road operators and road users?
- What are the most significant influencing factors/parameters for traffic congestion on national roads (calendar day, weather, events, etc.)?
- What data are ideally required for reliable congestion forecasts for the national road network? What data sources are relevant and in what ways?
- What data (traffic, weather, events, etc.) are available for congestion forecasting, and in what form? What is the situation today and what can be expected in the future? How accessible are the data from different data providers?
- What algorithms are most suitable for reliable congestion forecasts and data integration for national highways?
- What form should a congestion forecast system take? What elements and functionalities should it have? How could it be integrated into the Swiss traffic management system (VM-CH)?
- How can such a system be evaluated, in terms of its functioning and effect?

Research results

It can be stated at the outset that the methodological potential of a Swiss traffic congestion forecasting system could be harnessed profitably and that the implementation of such a system is possible. With regard to the key questions the findings can be summarised as follows:

State of the art traffic congestion forecasting methods

A comprehensive literature study gives the following picture:

- At a conceptual level, there are two main forecasting methods for traffic: simulation-based and statistical. Hybrid methods are also described.
- With **simulation-based** forecasting methods, a distinction is made between microscopic, mesoscopic and macroscopic simulations. Simulation methods are typically used for long-term strategic forecasts or scenario calculations. However, they can also be used for short-term forecasts. The advantage of this method lies in the good spatial and temporal resolution of the forecasts. Extensive use of simulation methods for short-term forecasts, however, would be very demanding in terms of data and computation and would involve uncertainty about the calibration accuracy of the simulations. In practice, simulation approaches are therefore often used in combination with statistical methods.
- With **statistical methods**, a distinction is made between heuristic, non-parametric and parametric methods. Hydrograph classification methods, which are widely used due to their efficiency in practice, also belong to the statistical methods category. Statistical methods are suitable for both short- and longer-term forecast horizons. The advantage of these methods compared to simulation-based ones lies in their smaller data and computational requirements, their normally simpler calibration and the possibility to integrate external variables (such as weather, etc.) fairly easily. However, a detailed description of traffic dynamics, especially in traffic congestion situations, is only possible to a limited extent.
- **The work on hybrid methods shows that such methods, or combinations of different approaches, generally perform better than individual methods.**
- A large number of the scientifically described methods have so far found only limited application in practice. This suggests that many methods are either unsuitable for practical use or that there is still considerable potential for the transfer of theory to practice. It can be assumed that both these possibilities apply.

State of the art traffic congestion forecasting systems

Analysis of 12 traffic congestion information and forecasting systems produced the follow-

ing findings:

- Today's traffic congestion forecasting systems use statistical, simulation-based or combined procedures. The pros and cons of each system correspond to the advantages and disadvantages of the methods used (see above).
- Only a few individual forecasting systems are now used for **traffic management** as well as **purely for traffic information**. **However, this distinction of purpose makes a considerable difference**. Since traffic management requires very high quality congestion forecasts, updated at short intervals, the system requirements are correspondingly higher than for pure traffic information, where less accurate congestion forecasts do not have such a marked effect.
- The "**major providers**" of congestion forecasting systems offer **standard products** which are widely distributed and **cover the current traffic situation well**. Traffic information rather than traffic management is their major focus. However, there are **deficits** in the **forecasting ability** of these systems and their **adaptability to specific local conditions** in Switzerland. The forecasting procedures and methods used and the influencing factors considered for the forecast are mostly a "black box".
- The "**small providers**" focus more on scientifically based, high-quality prediction methods, which achieve good agreement between forecast figures and actual measured values. **Consideration of specific local conditions seems more likely**. Due to their generally better forecasting quality, the use of these systems appears to be a more promising option for traffic management.
- Most of the traffic congestion forecasting systems examined use **traffic data from various sources**. Due to the developments in traffic data collection technologies and in the variety of data sources, congestion forecasting systems need to be very flexible in the use of all kinds of traffic data. This also applies in principle to the use of environmental data (weather, construction sites, events, etc.).
- The traffic congestion forecasting systems examined provide various output values in various degrees of detail. Most of them provide **traffic conditions and travel times as their main parameters**. Only a few also cover travel speeds and in particular queue lengths.
- The traffic congestion forecasting systems examined provide **forecasts for different forecast horizons** and use historical, current and "future" data in varying degrees. For the purpose of system design, it is vital to know which forecast horizons have priority for which intended uses.
- Not surprisingly, **data availability is of prime importance**. This applies to traffic and environmental data, as well as to historical, current and future data (see also the section on data availability).
- **Important success factors** are an **adequate test mode** (for systems that are not yet established), **cooperation with data providers** (e.g. for mobile traffic data), the credibility of data sources and the **quality and robustness** of the output figures. Broadly applicable solutions (with limited individualization) are only an important success factor for "major providers".
- In addition to the availability of data, hindrances to consider are the calculation of network capacities, investments in software and systems development, and limited willingness to pay for traffic information.
- In principle, all of the systems investigated can be used in Switzerland. The systems offered by the major vendors are already in use today (INRIX, TomTom, Google). The TTVMS system would only be usable if significant investments could be made in the collection of traffic data based on number plate recognition.

Requirements of a traffic congestion forecasting system

The analysis of the needs for a congestion forecast system from the perspective of road users and road operators produced the following findings:

- Regarding **application purposes, traffic information, travel and route planning and traffic management** have higher priority than construction site and maintenance planning, road network planning and traffic monitoring.

- Regarding the parameters for a traffic congestion forecasting system, **travel time / travel time losses, queue lengths, traffic conditions and congestion duration** have a higher priority than travel speed, utilisation rates and traffic quality.
- Regarding forecast horizons, **short-term forecasts** (minutes to hours) are the main priority, **complemented by medium-and long-term forecasts** (days to months).
- Regarding **spatial coverage**, the focus is on **Switzerland** and its neighbouring countries.
- Regarding road classes, coverage of **motorways and main roads** is most important.
- Regarding vehicle classes, a distinction needs to be made between **passenger cars and lorries**, especially considering output figures (e.g. travel times).
- The **time intervals for updating** should be 1 to 5 minutes for short-term forecasts (traffic management, on-trip traffic information). For medium-and long-term forecasts, the update intervals can be longer.
- Regarding **reliability**, the travel times in short-term forecasts should not deviate from the actual times by more than 10%. For queue lengths, the deviations may be somewhat larger. For medium-and long-term forecasts, larger variations are acceptable. Road operators and users are sensitive to incorrect reports; no more than 5 reports out of 100 should be incorrect, otherwise the acceptance of the system quickly diminishes.
- The congestion forecast system should have **input interfaces for traffic data collection, traffic monitoring, weather forecasts, weather monitoring sites** etc.
- The congestion forecast system should have **output interfaces to traffic information systems, traffic management systems, emergency services**, etc.
- The development trends identified for needs suggest an **increasing demand for traffic congestion forecasting systems as well as an increase in system requirements** (with regard to information processed, spatial resolution and reliability).

Evaluation of forecasting methods and forecasting variables

Various methods should be combined to produce a reliable and universally applicable forecasting system. The methods should be selected or optimally combined to suit particular traffic situations. They should be able to react adaptively to local conditions and online calibration should be possible. This also applies to the methodology used to select the relevant external factors to be used for forecasting. Against this background, an evaluation of different methods has produced the following findings, on the basis of test scenarios with real data:

- **Hydrograph classification methods** are suitable for (local) **basic predictions** and for identifying current or projected "traffic regimes." Using these as a basis, other methods can be selected as required.
- For **short-term predictions** (up to 30 min) of traffic density and speeds on individual road sections **univariate statistical methods** are suitable. For longer forecast horizons, combination with other methods is necessary.
- **Travel time predictions** can be derived from segment-based forecasts of traffic density and speeds. In addition to this, travel times can also be predicted directly for entire network segments, for example by means of **neural networks**. This **network-based approach** can comprehend the global traffic situation better than purely local forecasts. Our investigations indicate that this approach is especially likely to produce improved forecasts for congestion situations.
- For **medium-and long-term forecasts**, the current local traffic situation becomes increasingly less relevant. For longer forecast horizons, therefore, the inclusion of methods that detect and record traffic patterns based on **historical data** is crucial.
- **Inclusion** of many **external factors** can lead to large data requirements and even worsen the forecasts under certain circumstances. It is therefore advisable to focus on a few relevant factors. For short-term forecasts, the external factors are often already reflected in the current traffic situation and may no longer need to be considered under certain circumstances. For longer forecast horizons external factors are crucial. To identify relevant influencing factors, **filtering techniques** that filter out the most im-

portant factors for the current situation are recommended. In this context, various scientific methods, some novel, were evaluated. A real practical trial is still pending, however.

- Relatively simple statistical methods can also be used to forecast congestion development (in the sense of **congestion warnings**). Nevertheless, forecasts of the development of **congestion dynamics** will probably need to be **based on simulations**.

Data availability for a traffic congestion forecasting system

Analysis of the availability and suitability of traffic and environmental data for use in congestion forecasting systems has produced the following findings:

- From **traffic monitoring**, only **historical traffic data** can be used for the development and validation of a traffic congestion forecasting system, and for long-term forecasts. This data forms an important basis for a good forecasting system, in combination with other historical data.
- The **degree of coverage by traffic counters** (with induction loops) will improve in the future; this also applies to construction sites. The congestion forecasting system should therefore be flexibly designed regarding the number of counting stations and should be able to take mobile recording devices in the field of construction sites into account. A certain degree of coverage throughout the network is required for the system (forexample for the detection of events and dangers); a high degree of coverage is vital for critical sections of the network.
- The **spread of Floating Car Data (FCD) and Floating Phone Data (FPD)** will continue to improve, and thereby the coverage of less heavily used sections of road. The quality of traffic data recorded is likely to increase further.
- The expected further **standardisation of traffic data collection** will lead to harmonisation of the quality of output parameters.
- The **increase in route-based traffic data recording** (travel times, travel speeds, etc.) is leading to considerable improvements in the input data available for congestion forecasting systems.
- Traffic data: In a **first step** the use of traffic data from traffic counters is the main priority. In a **second step, FCD or FPD data**, or bluetooth data should be used.
- Environmental data: **weather data** should as far as possible be used already in an early phase. The inclusion of road conditions appears to be sensible only at a later date.
- Events and hazards (predictable): information on public holidays, events and construction sites can be taken into account in the congestion forecasting system.
- Events and dangers (not predictable): the inclusion of **data on accidents, police reports and operating states of traffic management measures** should be omitted in a first step, due to the complexity of such information. The option for its future inclusion should be kept open, however. Here it should be noted that the effect of events on traffic situations will also be detected directly by traffic monitoring.
- When using input data for a traffic report system numerous **risks** need to be considered (insufficient data quality, incorrect data, no data delivery as a result of failure, late delivery of data, etc.), which reduce the quality of the output parameters. These risks should be minimized by checking routines.

Precise quantification of the suitability of individual data sources and of the risks to forecast quality must be performed in test mode.

System concept for a congestion forecasting system

The proposed system concept takes into account the different technical possibilities, needs and development uncertainties and proposes a modular architecture and four expansion stages for the system. The main features of the concept can be summarized as follows:

- **General aspects:** In order to meet the needs of the different user groups and application purposes, the system should have three distinct forecasting units, seen from the user's point of view, in the sense of services (see the following figure):

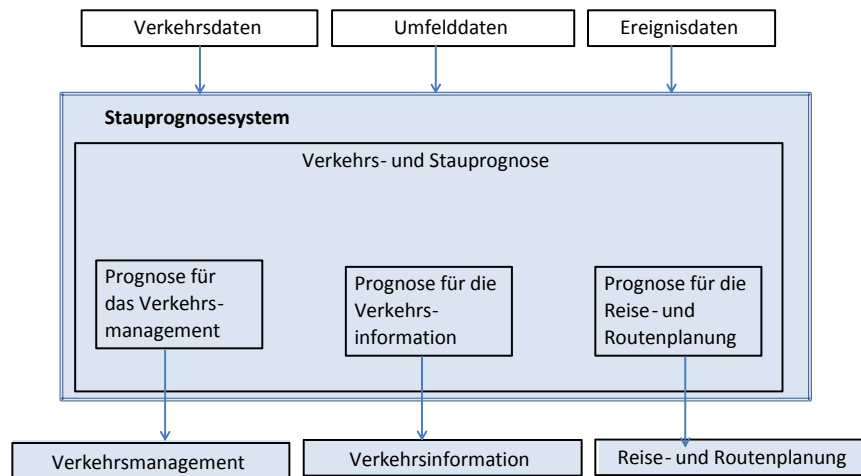


Figure: Services of the congestion forecasting system

1. **Traffic information forecasting service:** calculation of future traffic conditions for road users
2. **Journey and route planning service:** support for the user in pre-trip and on-trip travel planning
3. **Traffic management forecast service:** special export and analysis data and feedback and intervention options for traffic management

A suitable system architecture including a basic system is the technical foundation of all the services.

- **System architecture:** the system has a **modular design** that allows for flexible expansion. A distinction is made between pre-processing modules (or tools), post-processing modules, actual forecasting modules, and other technical support modules (see figure below).

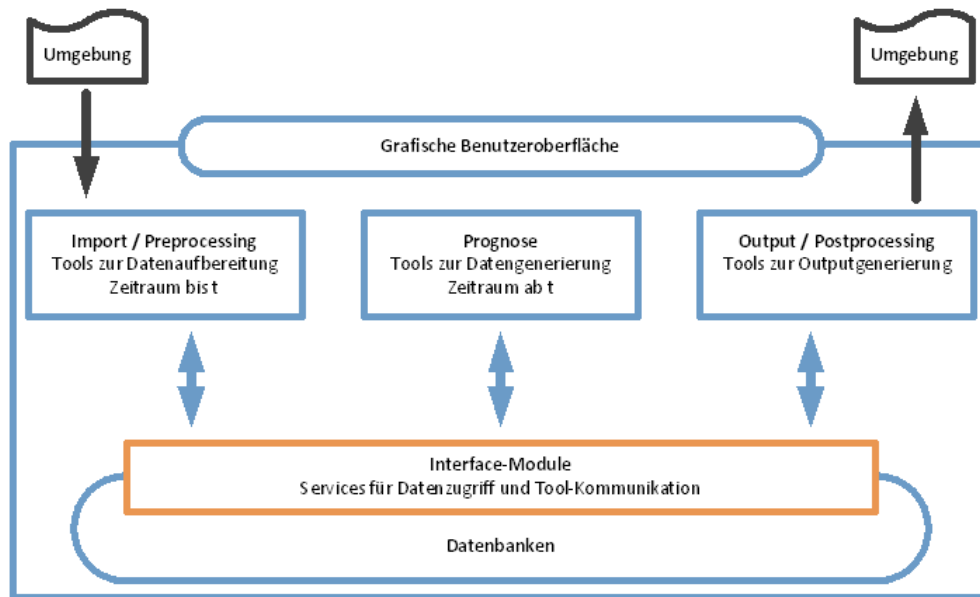


Figure: Modularised system architecture

- On the IT side, parallel processing of data is necessary because of the considerable computational complexity and the need to safeguard against failure. To ensure module synchronisation and data management, a message queue concept is proposed in combination with a GRID solution.
- The integration of a congestion forecasting system into the ASTRA system landscape should take place in the form of an **independent specialist application**. Three basic integration variants can be considered, with varying degrees of autonomy for the specialist application.
- The **staged concept** is based on an assessment of how well the needs can be covered in terms of the data situation and the availability of suitable methods as the project develops over time. Needs which can already be covered well and with few uncertainties by existing data sources and forecasting methods are given first priority. The main features of the stages can be summarized as follows:
 - Stage 1:
 - Traffic situation forecast as a basis
 - Restriction to detector data and basic environmental data
 - National roads and selected cantonal high-capacity roads
 - Stage 2:
 - Direct travel time predictions
 - Extension to FPD (or FCD)
 - Stage 3:
 - Extension to cantonal high-capacity roads / connecting roads
 - Routing functions (with rudimentary rerouting)
 - Stage 4:
 - Simulation of critical points
 - Full rerouting
 - Comprehensive environmental data
 - Automated traffic management interfaces
- **Forecast concept:** the initial focus of the forecast concept is on the first expansion stage (Stage 1). A combination of a sample-based method with statistical short-term forecasts is proposed. The proposal includes a methodology for the integration of external factors and methodologies for the optimal combination of various forecasting methods for different traffic regimes and forecast horizons. The forecast concept is thus a good foundation for further developments.

Evaluation of the system concept for a congestion forecasting system

The evaluation of the system concept for a congestion forecasting system produced the following findings:

- The following figure graphically summarises the evaluation results for all four stages. It shows which stage allows progress with respect to which criteria.

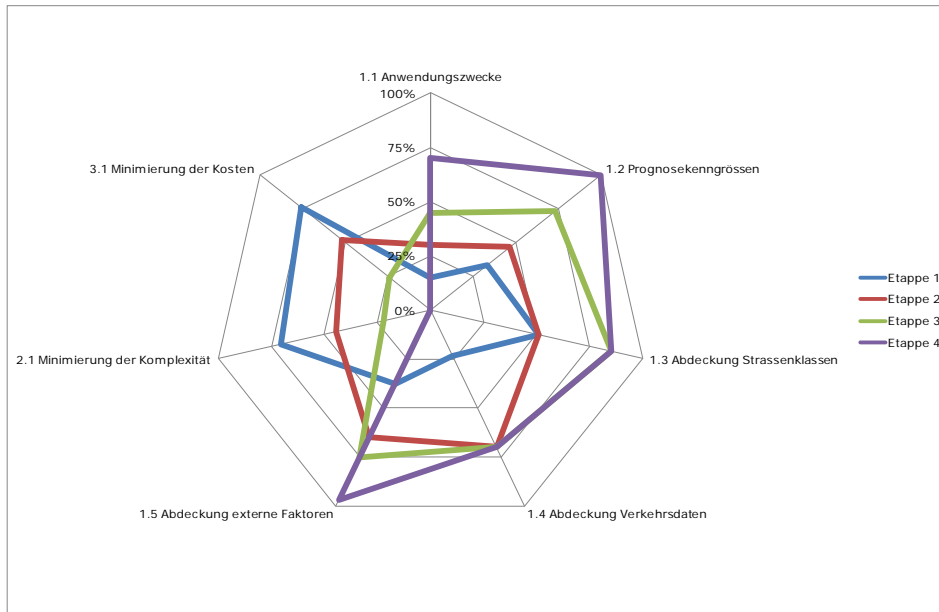


Figure: Overview of coverage of the requirements of all four stages

- **Stage 1** allows the achievement of **minimum requirements** with a relatively **small effort** and manageable complexity.
- **Stage 2** is slightly more expensive and complex, but allows a major leap forward, in particular in the sub-criterion "coverage of traffic data" with the consideration of route data (Floating Car Data / Floating Phone Data). The next stages bring no further advantages with regard to this sub-criterion. Regarding external factors, consideration of weather, construction sites and public holidays provide a considerable improvement over Stage 1.
- **Stage 3** is rather more expensive and complex than Stage 2, but leads to important advances with respect to the sub-criteria forecast parameters (direct prediction of queue length and congestion time) and coverage of road classes (cantonal high-capacity roads and connecting roads completely covered).
- **Stage 4** brings significant progress over Stage 3 regarding application purposes (re-routing, automated interface for traffic management measures, etc.), forecast parameters (calculation of queue lengths and congestion time using simulations) and the consideration of external factors (accidents / incidents, automated interface to traffic management measures).

A **SWOT analysis** identified the following strengths and weaknesses:

- The strengths of the first stage: essential functionalities are covered; the cost is minimal; feasibility is given; minimum operating risks; expandability.
- The weaknesses of the first stage are: not all applications are covered; low spatial resolution because only cross-sectional data are taken into account; only derived predictions with limited quality; cantonal high-capacity and connecting roads only partially covered.
- Compared to the strengths of the first stage, the fourth stage provides a number of benefits / additional functionalities (better resolution thanks to the use of route data, consideration of all relevant external factors, and improvement of forecast quality).
- One of the weaknesses of the 4th stage is the high cost of the development and operation of the system, and in particular its still limited feasibility.

- The **opportunities** of a traffic report system are firstly the urgency of the problem, which is expected to remain high or worsen. Technological developments will support the project both in the system input and in the use of the system outputs. Increasingly flexible working hours and the increased demand for information to optimise time management are further factors which will favour the development of a traffic congestion forecasting system.
- The **threats** lie in the scarcity of human and financial resources, possible goal and interest conflicts, and in acceptance of the system. In the absence of alternatives, whether with respect to routes / means of transportation, or in terms of departure times, the benefits of a congestion forecasting system are reduced.
- The following are the **arguments for a congestion forecasting system**:
 1. Road users are better informed about future traffic conditions on the road network under consideration, so they can:
 - plan their trips / transportation / work assignments better
 - plan / estimate travel times more reliably
 - adjust their driving behaviour in good time to the predicted traffic situation
 2. Road operators are better informed about future traffic conditions on the road network under consideration, and can optimise traffic management and operational activities.
 3. If the congestion forecast system is integrated into ASTRA, it will be possible to control the system directly and integrate it into traffic management.
- The following are **arguments against a congestion forecasting system**:
 1. The traffic congestion forecasting system requires a certain investment and output of time and energy for the development and operation of the system.
 2. Undesirable traffic transfer (e.g. to the secondary road network) cannot be completely excluded.
- If **congestion costs are only reduced by 1%** by a congestion forecasting system, this would result in conservatively estimated **annual savings in the order of CHF 10 to 15 million**. This shows the **high economic potential in reducing congestion hours**. Even a small improvement can lead to significant benefits.

Research needs

As part of the project, further research gaps were identified. These can be roughly divided into:

1. Necessary development work on algorithms
2. Data-dependent investigations that can be done only within a test mode
3. Detailed investigations into the effect of the system

Research is particularly needed in the following areas:

- The identified needs and requirements of road users and road operators should be specified and verified using a larger sample of road users and road operators.
- As part of a trial in test mode, several traffic data sources (cross-sectional and route data) need to be tested as input data and their suitability assessed. In this case, the threats regarding forecast quality need to be quantified more accurately.
- As part of a trial in test mode, the forecasting ability, quality (statistical quality, imaging depth, etc.), flexibility (based on the input data, extension, etc.) and the reliability / stability of the system concept need to be determined, using various designs.
- As a basis for the quantitative assessment of the congestion forecasting system the effects on road users (for example, effects of congestion information on transport behaviour) and road operators need to be analysed for different network configurations and communication channels. This could be done by means of simulation and driving simulators, and in the context of studies accompanying the trial in test mode.
- In particular, feedback effects between traffic volume and traffic forecasts occur when road users adapt their behaviour on the basis of the forecast (as is desired) and thereby cause the original forecast to lose its validity. The proposed adaptive methods

can take this self-modification of the forecast into account, if the reaction of road users follows a similar pattern with similar forecasts. However, the extent and impact of feedback effects caused by forecast-related changes in road users' behaviour are open research points. In particular, it is unclear under what conditions the forecasts best achieve the desired effect. Some information may need to be withheld, in order to prevent overloading of the system. In addition, it is not clear in which situations new and possibly desired stable equilibrium states can be achieved due to the forecasts, or when oscillation states between traffic volume and traffic forecast may occur. These questions can be addressed empirically in part in a trial of the system in test mode. However, for a general systems understanding of effects, a simulation study that would allow the identification of behavioural scenarios might also be useful.

- In connection with the various forecasting methodologies that are to be realized in later development stages, there are still some research and development needs, because some of the methods have never been used in real working systems. This applies in particular to:
 - the methodology of direct travel time prediction on the basis of distance data (FCD / FPD) (Stage 2)
 - the methodology for classification of queue lengths and congestion duration (Stage 3)
 - the methodology for dynamic forecast-based rerouting for individual route optimisation (Stage 3)
 - the calibration of simulation-based forecasts in real time (Stage 4).

Recommendations

The following recommendations for the use of a traffic congestion forecasting system in Switzerland can be derived from the project:

- It is recommended that a **congestion forecasting system be implemented**. Given the very high economic costs of congestion a positive cost-benefit ratio can be expected.
- The development of a **tailor-made system for Switzerland** will allow optimum consideration of local conditions as an advantage over the standard solutions offered by international system providers.
- For the system design, a **module-based approach with various expansion stages** is recommended. This will quickly allow a rudimentary but functional system to be realized and will also provide risk control with the greatest possible flexibility as the system is expanded. In particular, the modular approach will allow currently unproven or unknown forecasting methods to be incorporated into the system at a later date.
- **Data availability** is of central importance to a congestion forecasting system. This applies to traffic and environmental data, as well as to historical, current and future data. The ongoing efforts to improve the collection of traffic data should be intensified and oriented still more strongly to the needs of a traffic congestion forecasting system.
- The **test applications** are based on the modular approach and should cover the first stage of the forecasting system as a priority. As far as possible elements from later stages should be also included (e.g. inclusion of route data, inclusion of other factors, inclusion of connecting roads). There are various ways of testing applications, which need to be concretised in collaboration with the ASTRA and the cantons.

The **research gaps should be closed** with follow-up projects and a trial of the system in test mode.

1 Einführung

1.1 Ausgangslage

Jährlich gingen 2005 in der Schweiz ca. 20'000 Stunden (ca. 33 Mio. Fahrzeugstunden) im Stau verloren. Dies verursacht mit rund 1.5 Mia. CHF enorme volkswirtschaftliche Staukosten [ARE 2007]. Diese haben in den letzten Jahren aufgrund der zunehmenden Stautunden weiter zugenommen (siehe Abbildung 1 und Abbildung 69). Ca. 85% der Kosten werden durch Zeitverluste und 10% durch Unfälle verursacht. Ca. 75% dieser Kosten entfallen auf den Individualverkehr, ca. 25 % auf den Strassengüterverkehr. Hauptursache für den Stau ist die Überlastung des Verkehrsnetzes. Unfälle, Baustellen und andere Ursachen sind im Vergleich zur Überlastung weniger relevant.

STAUZEITVERLUSTE UND STAUKOSTEN 1995 – 2000 – 2005

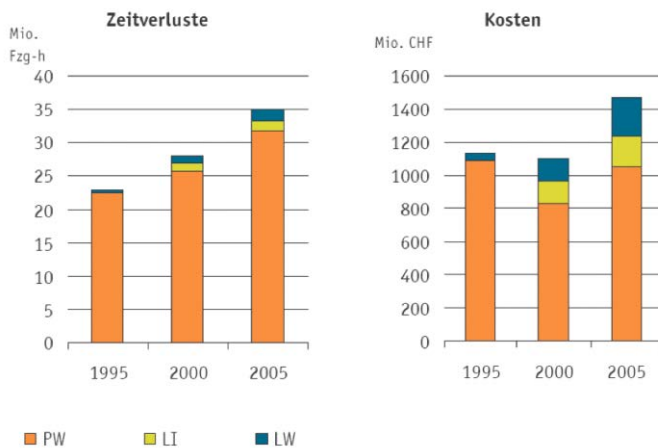


Abbildung 1 Entwicklung der staubedingten Zeitverluste und Kosten in der Schweiz

Die Staumeldungen konzentrieren sich entsprechend den Verkehrsbelastungen auf die Agglomerationen, Verbindungen zwischen den grossen Agglomerationen sowie auf Alpenübergänge, dabei insbesondere den Gotthard (siehe Abbildung 2):

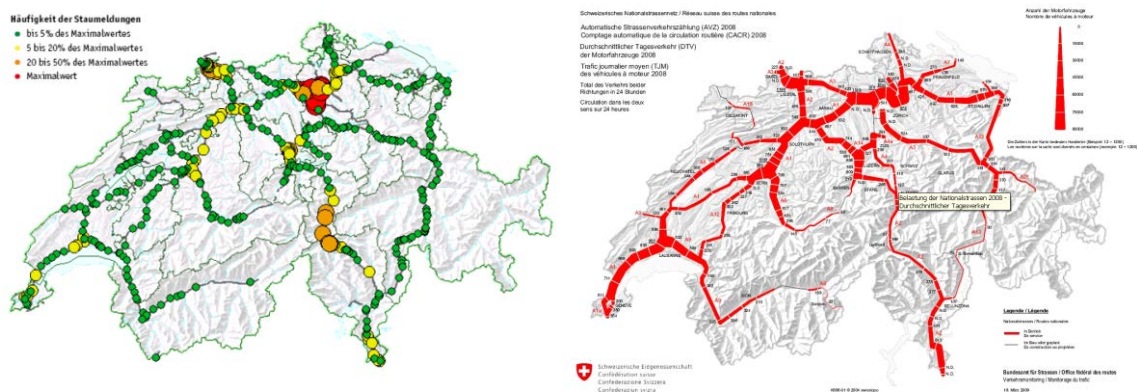


Abbildung 2 Stauhäufigkeit und Verkehrsaufkommen in der Schweiz

Mittels Verkehrsmanagement-Massnahmen wird versucht, den Stau zu vermeiden, den Verkehr möglichst flüssig und sicher zu gestalten und die Strassenbenützer über die aktuelle und künftige Verkehrslage zu informieren. Zentrale Funktionen des Verkehrsmanagements auf Nationalstrassen sind Verkehrslenkung (Ebene Netz), Verkehrsleitung (Ebene Strecken), Verkehrssteuerung (Ebene Knoten oder Objekte) und die Verkehrsinformation (ASTRA 2005). Für eine zweckmässige Erfüllung dieser Funktionen werden aktuelle Daten zur Verkehrslage und Prognosen zu künftigen Verkehrszuständen benötigt.

Im Rahmen des Projektes „Integrierte Applikationen“ wird zurzeit im ASTRA eine umfassende Systemlösung für die Unterstützung des Verkehrsmanagement auf den Nationalstrassen und die Einbindung der beteiligten Verkehrsmanagementzentralen erarbeitet. Dieses Projekt hat zahlreiche Schnittstellen zum Thema Stauprognose.

Mittels verlässlichen Stauprognoseverfahren und –systemen könnte das Verkehrsmanagement auf National- und Hauptverkehrsstrassen unterstützt und nachhaltig verbessert werden. Es wird erwartet, dass die Nutzung der Strasseninfrastruktur optimiert und die Stausituationen minimiert werden können. Dies nützt einerseits dem Strassenbetreiber beim Betrieb des Strassennetzes und andererseits dem Strassenbenützer bei der Reiseplanung und –durchführung. Heute fehlt für die Schweiz ein verlässliches Stauprognosesystem, welches den Strassenbetreibern und Strassenbenützern die notwendige Unterstützung für ein zweckmässiges Verkehrsmanagement und eine sinnvolle Reiseplanung bietet.

Heute im Betrieb stehende Verkehrsinformationssysteme für die Schweiz oder für Gebiete in der Schweiz beschränken sich weitgehend auf die Darstellung der aktuellen Verkehrslage. Erst wenige Systeme beinhalten eine statische (auf der Basis von historischen Daten) oder dynamische Stauprognose (auf der Basis von aktuellen Daten). Die Kurzzeitprognosemethodik vieler Systeme (z.B. für Reisezeiten), falls überhaupt verfügbar, beruht häufig einfach auf der Annahme, dass sich der momentane Verkehrszustand unverändert in die Zukunft extrapolieren lässt. Alternativ stützt sie sich lediglich auf historische Daten und lässt die aktuelle Verkehrssituation unberücksichtigt. Die zeitliche Verkehrsentwicklung wird dadurch gerade im Falle von Stausituation falsch antizipiert.

Die nationale und internationale Literatur über Prognose-Methoden im Verkehrsbereich zeichnet sich durch eine Vielfalt von unterschiedlichen Methoden aus. Unterschiede bestehen insbesondere hinsichtlich Prognosehorizonte (kurzfristig, mittelfristig, langfristig), Detaillierungsgrad (z.B. räumlichen Auflösung) sowie der Anforderungen an die Inputdaten und den Prognosegrössen. Es fällt auf, dass sich die meisten Methoden auf eine Prognosevariable, typischerweise den Verkehrsfluss, konzentrieren. Stauwahrscheinlichkeiten (und davon abgeleitete Grössen) sind dagegen seltener Gegenstand der Prognosen. Ebenso werden externe Einflussfaktoren (wie Wetter etc.) in der Regel nicht bzw. nur implizit in die Prognosen einbezogen. Viele Studien sind zudem akademischer Natur und wurden nicht in eine echte Anwendung transferiert.

1.2 Forschungsbedarf und -ziele

Aus der Ausgangslage kann folgender Forschungsbedarf abgeleitet werden:

- Für Stauprognoseverfahren und die massgebenden Prognosegrössen (Verkehrsaufkommen, Auslastung, Reisezeiten, Staulängen, Verlustzeiten, Staudauern etc.) fehlen heute Kenntnisse über die Bedeutung möglicher entscheidender Parameter wie Kalendertag/Tageszeit, Wetter/Witterung, Grossanlässe, Unfälle etc.; dies für verschiedene Prognosezeitpunkte (kurz-, mittel- und langfristig).
- Es ist heute unklar, welche Verfahren und Algorithmen für möglichst verlässliche Stauprognosen und die Datenintegration, unter Berücksichtigung der in der Schweiz heute (und künftig) verfügbaren Daten, geeignet sind. Entsprechend steht kein System, das auf solchen Forschungsergebnissen aufbaut, für Anwendungen zur Verfügung.
- Es ist auch unklar, wie effektiv und effizient ein solches Stauprognoseverfahren wäre; also welchen Beitrag dieses an die Staureduktion leisten könnte. Es ist heute offen welche Kosten und Nutzen ein Stauprognosesystem aus der Sicht des Strassenbenützers, des Strassenbetreibers u. der Allgemeinheit hat.

Mit dem Projekt sollen folgende Leitfragen beantwortet werden können:

- Was ist der State of the Art bezüglich Stauprognoseverfahren und -systeme? Welches sind die Vor- und Nachteile? Wie ist deren Eignung für das Strassennetz der Schweiz zu beurteilen?
- Welche Bedürfnisse/Anforderungen an Stauprognoseverfahren und –systeme bestehen aus der Sicht des Strassenbetreibers und des Strassenbenützers?

- Welches sind die massgeblichen Einflussfaktoren/Parameter für den Stau auf Nationalstrassen (Kalendertag, Witterung, Event etc.?) Welche Faktoren haben welche Bedeutung?
- Welche Daten werden idealerweise benötigt für eine verlässliche Stauprognose auf dem Nationalstrassennetz? Welche Datenquellen sind wie relevant?
- Welche Daten (Verkehr, Witterung, Events etc.) liegen in welcher Form vor und können für die Stauprognose genutzt werden? Wie ist die Situation heute und was ist künftig zu erwarten? Wie zugänglich sind die Daten verschiedener Datenlieferanten?
- Welche Algorithmen sind für die Stauprognosen und die Datenintegration für Nationalstrassen am besten für verlässliche Prognosen geeignet?
- Wie sollte ein Stauprognosesystem ausgestaltet sein? Welche Elemente und Funktionalitäten sollte es aufweisen?
- Wie könnte ein Stauprognosesystem in das Verkehrsmanagement CH integriert werden?

1.3 Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes

Inhaltliche Abgrenzung: Im Fokus der Bearbeitung stehen Stauprognoseverfahren sowie Stauinformations- und Stauprognosesysteme.

Räumliche Abgrenzung: Der Fokus liegt auf Anwendungen für das Nationalstrassennetz. Die Übertragbarkeit auf Hauptstrassen in urbanen Gebieten wird grob betrachtet.

Zeitliche Abgrenzung: Historische Analysen (ca. letzte 3 bis 6 Jahre), Prognosehorizonte (ca. 10 Min. bis einige Monate).

Stauprognosesysteme und –verfahren können thematisch von reinen Verkehrsinformationssystemen und Systemen/Verfahren zur Verkehrsflussprognose abgegrenzt werden:

- **Verkehrsinformationssysteme:** Gegenstand dieser Systeme ist die Sammlung von aktuellen Verkehrsdaten und die Darstellung des momentanen Ist-Zustandes. Verkehrsinformationssysteme haben dadurch keinen Verkehrsprognosecharakter. Sie erlauben in der Anwendung dennoch oft eine rudimentäre Reisezeitabschätzung basierend auf der momentanen, statischen Verkehrssituation. Die Reisezeitberechnung ist zuverlässig, wenn sich die Verkehrssituation während der Fahrt nicht ändert, oder es auf der gesamten Strecke zu keinen Behinderungen kommt, da die Reisegeschwindigkeit dann einzig durch die zulässige Höchstgeschwindigkeit bestimmt ist. Die Zuverlässigkeit wird sehr schlecht, wenn sich die Verkehrssituation während der Fahrt ändert (z.B. Stauentstehung oder –auflösung) und es kann keine zuverlässige Prognose für die Reisedauer an einem Datum in der Zukunft angestellt werden.
- **Verkehrsflussprognose** (auch: Verkehrsstärkeprognose): Klassische Verkehrsprognosesysteme und –verfahren versuchen aufgrund aktueller und historischer Daten primär den Verkehrsfluss (Fz/h) und davon abgeleitet die Verkehrsstärke zu prognostizieren. Sie erlauben eine bessere Reisezeitprognose als reine Verkehrsinformationssysteme, da zur Berechnung die prognostizierte Verkehrssituation verwendet wird. Typischerweise wird aber die Stausituation nicht explizit behandelt. Es wird im Allgemeinen keine Prognose über die Staudynamik (Propagation der Staufront, Staulänge, Auflösung, durchschnittliche Geschwindigkeit) angestellt.
- **Stauprognosesysteme** erweitern die Verkehrsflussprognose um eine detailliertere Betrachtung von Stausituationen. Typischerweise sollen dafür, z.B. basierend auf der Verkehrsflussprognose auch Stau-Kenngrößen prognostiziert werden (z.B. Stauwahrscheinlichkeiten, Länge und Dauer eines Staus). Die Information kann einerseits verwendet werden, um Reisezeitprognosen zu verbessern und erhöht andererseits gleichzeitig den Informationsgehalt der Prognosen.

Die Unterscheidung zwischen Systemen mit reiner Verkehrsflussprognose und Stauprognosesystemen ist in der Praxis nicht scharf, da sich ja aus Verkehrsflussprognosen in der Regel auch Stauinformationen ableiten lassen. Die Untersuchungen im Rahmen

dieses Projektes tragen dem Umstand Rechnung und fassen den Begriff „Stauprognose-system“ entsprechend im weiteren Sinne als Verkehrsprognosesystem mit einer gewissen (aber nicht zwingend umfassenden) Stauinformationsfunktionalität.

1.4 Generelles Vorgehen und Methoden

Diese Forschungsarbeit versteht sich als eine Analyse- und Konzeptstudie, die die Basis für die Realisierung eines Stauprognosesystems für die Schweiz legen soll. Dies ermöglicht eine seriöse Vorbereitung einer möglichen Testanwendung bzw. des regulären Betriebes eines solchen Systems. Umgesetzt wurde die Studie in 2 Phasen (1a und 1b, gemäss Abbildung 3) mit insgesamt 7 Arbeitspaketen.

Hauptziele der **Phase 1a** waren eine umfassende Beleuchtung existierender Systeme und Methoden für Stauprognosen weltweit, eine Klärung der vorhandenen Bedürfnisse an ein solches System in der Schweiz, sowie die Klärung von Fragen hinsichtlich des Datenbedarfs und der Datenverfügbarkeit für Systeme in der Schweiz heute und in Zukunft. Ergebnis der Phase 1a sind präzisierte Angaben zu den Anforderungen, die ein Stauprognosesystem erfüllen muss sowie eine Eingrenzung der weiterzuverfolgenden Ansätze. Im Rahmen der Analyse zum Datenbedarf wird zudem untersucht, welche Grössen (externen und internen Parameter) für die Prognosen relevant sind.

In der **Phase 1b** wurde auf der Basis Ergebnisse der Phase 1a ein Systemkonzept ausgearbeitet und evaluiert. Ergebnis dieser Phase ist ein Konzept für eine modulare Systemarchitektur und ein Plan für eine mögliche Umsetzung bzw. Testanwendungen in einer späteren Phase.

Als Weiterführung, aber nicht als Bestandteil dieses Projekts erfolgt in **Phase 2** die Umsetzung des Konzepts. Ergebnis von Phase 2 ist ein prototypisches Stauprognose-System und dessen Evaluation für einen ausgewählten Nationalstrassenabschnitt. Nach erfolgreichen Testanwendungen kann das Stauprognoseverfahren bzw. -system in den regulären Betrieb (**Phase 3**) übergehen.

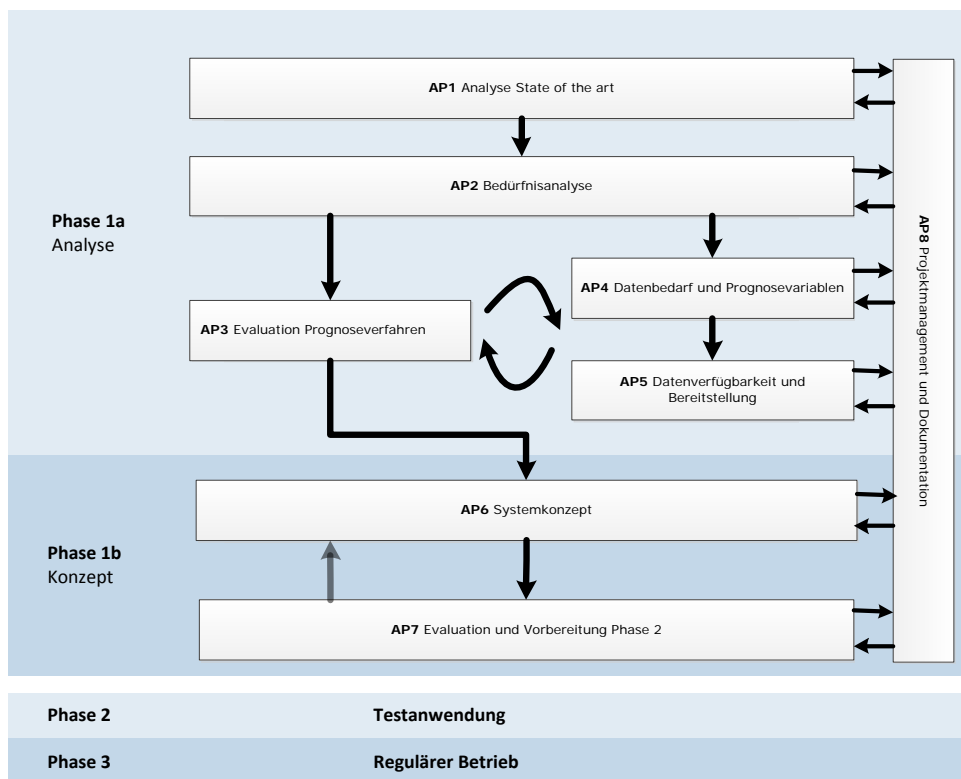


Abbildung 3: Vorgehen mit entsprechenden Arbeitspaketen

Die verwendeten Methoden werden in den späteren Hauptkapiteln näher erläutert.

1.5 Verwendete Grundlagen

Die verwendeten Grundlagen und Quellen gehen aus dem Literaturverzeichnis hervor.

1.6 Begriffe und Definitionen

Wichtige Abkürzungen, Definitionen und Begriffe sind im Verzeichnis „Abkürzungen und Glossar“ zusammengestellt. Eine wichtige Grundlage dafür waren folgende Dokumente:

- Glossar Verkehrsmanagement Schweiz (ASTRA, Ausgabe 2007 V 4.21)
- Normenwerk des VSS (aktuelle Online Normen www.vss.ch)
- Glossar zum Bericht Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung, SVI 2004/088 (Rapp Trans AG, IAS ZHAW, 2009)

Im Zusammenhang mit dem Projekt wurden folgende zentrale Begriffe definiert:

- **Stau** im Sinne der Verkehrsinformation ergibt sich,
 - a) 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
 - b) Wenn auf Hauptstrassen innerorts bei Knoten oder Engpässen die Verlustzeit insgesamt mehr als 5 Minuten beträgt. Stau entspricht der Verkehrsqualitätsstufe F der SN 640 017 «Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Grundlagennorm». [VSS 2005]
- Ein **Stauinformationssystem** ermittelt gestützt auf gemessene und berechnete Grössen zum Verkehrszustand Kenngrössen zum Stau. Es liefert als Output Verkehrsinformation über die aktuelle und allenfalls auch künftige Stausituation. Der Output kann verschiedene Kenngrössen wie Staulänge, Staudauer, Verlustzeiten, Reisegeschwindigkeit, Reisezeiten, Verkehrszustand etc. beinhalten. (Quelle: eigene Definition)
- Eine **Stauprognose** ist eine Verkehrsprognose, welche die Vorhersage von Verkehrsstaus beinhaltet. In der Stauprognose können charakteristische Kenngrössen wie Staulänge, Staudauer, Verlustzeiten, Reisegeschwindigkeit, Reisezeiten, Verkehrszustand etc. berechnet und dargestellt werden. (eigene Definition)
- **Stauprognoseverfahren** und **-methoden** sind wissenschaftliche Konzepte, Algorithmen und Berechnungsabläufe, welche als zentraler Bestandteil für eine Stauprognose verwendet werden können. Sie bilden die wissenschaftliche Basis für Stauprognosesysteme, befassen sich aber nicht mit daten- und betriebstechnischen Bereichen wie Datenaufbereitung, Darstellung, externe Anbindung etc. Die Begriffe Stauprognoseverfahren und -methoden werden in diesem Bericht synonym verwendet (Quelle: eigene Definition)
- Ein **Stauprognosesystem** macht gestützt auf historische und aktuelle gemessene und berechnete Kenngrössen zum Verkehr und zu relevanten Einflussfaktoren (Wetter, Witterung, Baustellen, Ferienkalender etc.) Vorhersagen zur zu einem bestimmten Zeitpunkt herrschenden Verkehrssituation, insbesondere zu Stausituationen. (Quelle: eigene Definition)
- **Verkehrsinformation** bedeutet das in Kenntnis setzen der Verkehrsteilnehmer über Sachverhalte, welche für deren Fahrt oder den Transport von deren Gütern vor (pre-trip) und während der Fahrt (on-trip) von Bedeutung sein können, sowohl betreffend den allgemeinen Strassenverkehr als auch den öffentlichen Verkehr, inkl. Verspätungsmeldungen, Verhaltensempfehlungen usw. [VSS 2006]
- Eine **Verkehrsprognose** ist eine Prognose, die der objektbasierten Vorhersage von Verkehrsströmen (z. B. für einen Strassenabschnitt oder eine Buslinie) oder der Vorhersage der Gesamtheit der Verkehrsnachfrage dient. Bei der Planung von Strassen werden objektbasierte Verkehrsprognosen verwendet, um die zukünftige Verkehrsbelastung und deren Entwicklung abschätzen zu können. (Quelle: Wikipedia <http://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsprognose>)
- **Verkehrsflussprognose** (auch: **Verkehrsstärkeprognose**) bezeichnet einen Teilbereich der Verkehrsprognose, welcher eine Prognose des Verkehrsflusses und darauf basierend der Verkehrsstärke (Fz/h) anstellt (Quelle: eigene Definition).

Weitere Begriffe gehen aus dem Glossar im Anhang hervor.

1.7 **Aufbau des Berichts**

Die Ergebnisse der sieben Arbeitspakete werden in sechs Kapiteln zusammengezogen und mit dem Kapitel 8 (Schlussfolgerungen und Empfehlungen) abgeschlossen:

- Kapitel 2: State of the Art-Analyse Prognoseverfahren und Stauprognosesysteme
- Kapitel 3: Bedürfnisanalyse: Anforderungen an Stauprognosesysteme
- Kapitel 4: Prognoseverfahren und Prognosevariablen
- Kapitel 5: Datenverfügbarkeit und -bereitstellung
- Kapitel 6: Systemkonzept
- Kapitel 7: Beurteilung des Konzeptes
- Kapitel 8: Schlussfolgerungen und Empfehlungen.

2 State of the Art Stauprognoseverfahren und -systeme

2.1 Einleitung

2.1.1 Allgemeine Arbeitsmethodik

Die zugrundeliegende Arbeitsmethode, um den aktuellen Stand der Forschung zu eruieren, war eine Literatur- und Internetrecherche. Bei der Analyse bestehender Methoden und Systeme ist zusätzlich auf Direktgespräche mit den Entwicklern und/oder Betreibern zurückgegriffen worden. Ebenfalls integriert in der Analyse sind bisherige Voruntersuchungen seitens ASTRA.

Aufgrund der Aktualität und Komplexität des Themas „Stauprognosen“ sind in der Fachliteratur zahlreiche, teils stark unterschiedliche Verfahren vorgeschlagen worden. Ebenso zeichnen sich aktuelle Stauprognosesysteme durch ihre grosse Vielfalt aus. Um eine objektive und umfassende Analyse zu ermöglichen, ist deshalb ein einheitliches Analyse-schema verwendet worden, mit welchem die Verfahren und Systeme detailliert beschrieben und bewertet wurden. Da sich die relevanten Eigenschaften bei Systemen im Einsatz deutlich von jenen wissenschaftlicher Verfahren unterscheiden, wurden zwei verschiedene Bewertungsformulare entwickelt, in englischer wie auch deutscher Sprache.

2.2 State of the Art Prognoseverfahren

2.2.1 Vorgehen

In der Summe sind über 70 relevante Publikationen aus nationalen und internationalen Fachzeitschriften ausgewählt worden, wovon 55 mittels Beurteilungsformular beurteilt wurden (Beurteilungsformulare in „Arbeitsbericht State of the Art Stauprognosesysteme und -verfahren, ZHAW IAS/Rapp Trans“, 9.1.2012, unveröffentlicht). Die Beurteilungen umfassen auch weitgehend die übrigen ausgewählten Publikationen, weswegen auf eine explizite Beurteilung dieser verzichtet wurde. Bei der Auswahl der zu beurteilenden Verfahren sind folgende Kriterien angewendet worden:

- Die Auswahl soll eine möglichst breite Übersicht ermöglichen.
- Der Fokus liegt auf fundamentalen Verfahrensarten, nicht auf kleinen, meist fall-spezifischen Modifikationen dergleichen.
- Es wurde gezielt nach den modernsten Erkenntnissen gesucht.
- Die vorgestellte Methode muss Prognosefähigkeit haben (kein reines Dataprocessing/Darstellung, Interpolation).
- Eine Validierung mit gemessenen Daten sollte vorliegen.

Das Bewertungsformular für Verfahren umfasste unter anderem die folgenden Themenbereiche:

- Mathematische oder physikalische Beschreibung der Methode oder des Algorithmus
- Benötigte Inputgrößen, prognostizierte Output-Größen
- Räumliche und zeitliche Auflösung der Prognosegrößen (punktuell, kontinuierlich etc.)
- Validierung der Daten an Messungen

Zusätzlich zur Formularbeurteilung sind Diagramme erstellt worden, welche den chronologischen Zusammenhang der wissenschaftlichen Arbeiten zu den Verfahren aufzeigen. Dank dieser Vorgehensweise ist ersichtlich geworden, welche Methoden sich durchgesetzt haben, und auf welchen früheren Ideen neuere Verfahren basieren. Damit wurde eine Abschätzung des Potentials einer Methode erleichtert. Ein Beispiel eines solchen Diagramms ist in Abbildung 4 dargestellt. Weitere Diagramme dieser Art sind im Zwischenbericht zum Arbeitspaket 1 [ZHAW/Rapp, 2012a] zu finden.

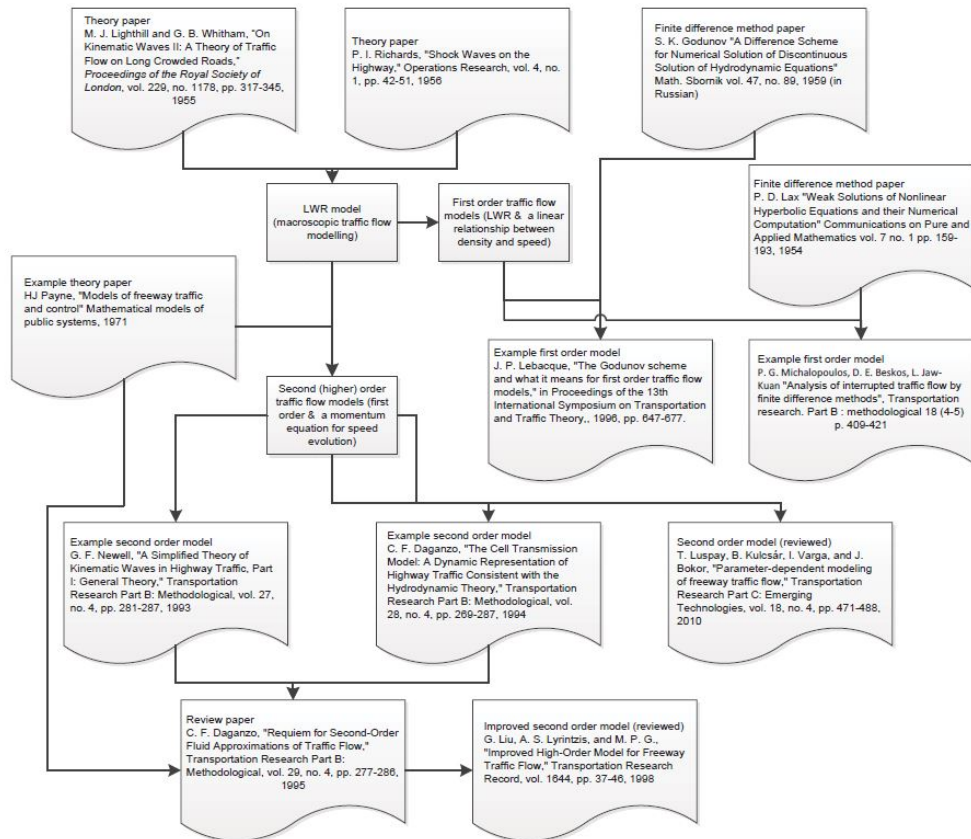


Abbildung 4 Beispieldiagramm der Beziehungen zwischen wissenschaftlichen Methoden im Gebiet der makroskopischen Verkehrsmodellierung

2.2.2 Übersicht und Beurteilung von Verkehrs- und Stauprognoseverfahren

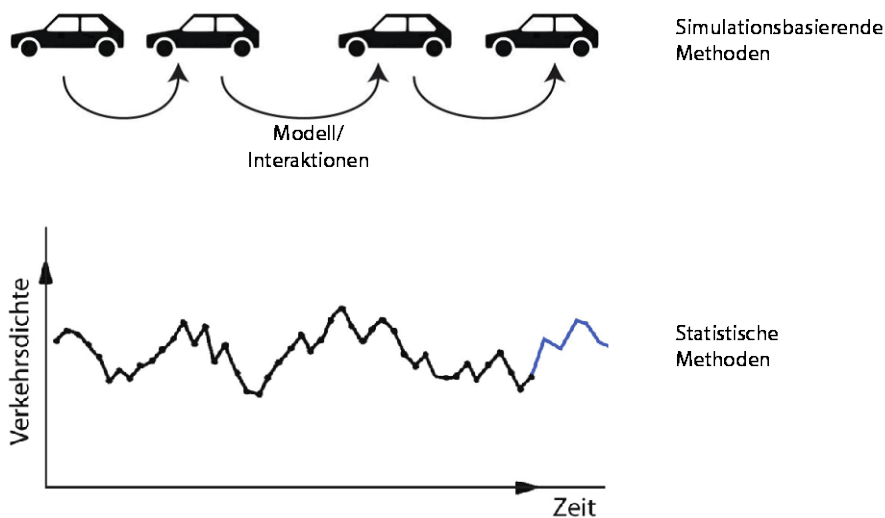


Abbildung 5 Beispieldiagramm der Beziehungen zwischen wissenschaftlichen Methoden im Gebiet der makroskopischen Verkehrsmodellierung

Prognoseverfahren für den Verkehr können grob in zwei konzeptionell unterschiedliche Kategorien unterteilt werden: Simulationsbasierte Methoden und statistische Methoden.

Simulationsbasierte Methoden basieren auf Modellen zur Beschreibung der Verkehrsdynamik, die mittels Computersimulationen i.d.R. anhand historischer Daten kalibriert werden. Statistische Methoden stützen sich dagegen ganz auf gemessene Zeitreihen, wobei mittels statistischer Modelle aus den historischen Daten zukünftige Werte der Zeitreihen prognostiziert werden. Statistische Methoden können daher als top-down Ansätze verstanden werden, während simulationsbasierte Methoden einen bottom-up Ansatz verfolgen (siehe Abbildung 5).

Sämtliche untersuchten Methoden können gemäss dem Schema dieser groben Kategorisierung erfasst werden. Die Unterteilung wurde primär aus zwei Gründen vorgenommen:

1. Der Nutzungszweck von simulationsbasierten und statistischen Methoden unterscheidet sich normalerweise deutlich. Während simulationsbasierte Methoden vor allem fürs das Verständnis und zum Erklären von Verkehrsphänomenen (wie spontane Staubildung, Stauwellenpropagation) benutzt werden, liegt der Fokus bei den statistischen Methoden traditionell auf der Prognose gewisser Werte, wobei der zugrundeliegende Verkehrsmechanismus nicht notwendigerweise erklärt werden soll.
2. Aus organisatorischen Gründen macht die Einteilung Sinn, da sie eine Beurteilung der Verfahren durch unterschiedliche Fachleute mit einer spezifischen Expertise in der Verkehrsmodellierung bzw. in der statistischen Analyse von Zeitreihen ermöglicht.

Selbstverständlich bestehen bei allen Methoden in beiden Grundkategorien auch Gemeinsamkeiten. So müssen sowohl simulationsbasierte wie auch statistische Methoden anhand historischer Daten kalibriert werden. Bei der Auswahl der Modelle in beiden Kategorien ist ein gewisses Verständnis der Verkehrsdynamik und der entsprechenden Prozesse notwendig, etwa für die Auswahl geeigneter Modelle für spezifische Verkehrssituationen oder für die Wahl oder Einschränkung von Parametern.

Jede Verkehrsprognosemethode muss im Prinzip versuchen, die Entwicklung von komplexen raumzeitlichen Prozessen zu erfassen, die sowohl deterministische wie auch zufällige Elemente umfassen. Um der Komplexität gerecht zu werden, wurden in jüngster Zeit Modelle vorgeschlagen, die simulationsbasierte und statistische Methoden kombinieren. Diese Hybridansätze erscheinen als vielversprechende Ansätze für optimale Prognosen in der Zukunft.

Im Folgenden erfolgt eine kurze Übersicht zur Klassifizierung der unterschiedlichen Prognoseansätze. Danach werden verschiedene simulationsbasierte und statistische Methoden übersichtsartig umrissen. Der Fokus liegt dabei auf der Wirkungsweise und der Anwendung der betrachteten Core-Methode. Allfällige vor- und nachgelagerte Prozessschritte (preprocessing, postprocessing), die im Anwendungsfall nötig sind, sollen in diesem Abschnitt i.d.R. nicht diskutiert werden, siehe Abbildung 6).

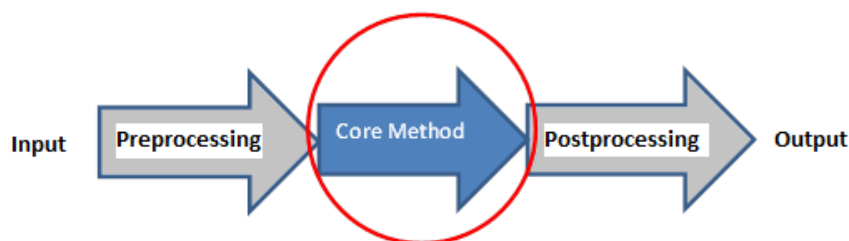


Abbildung 6 Der Fokus der Diskussion liegt auf der Core-Methode

Strukturdiagramm

Das folgende Diagramm in Abbildung 7 zeigt eine Übersicht der unterschiedlichen Verkehrs- und Stauprognoseverfahren. Die grundlegenden Kategorien „simulationsbasierte Verfahren“ und „statistische Verfahren“ können weiter verfeinert werden. So unterteilt man die simulationsbasierten Methoden typischerweise aufgrund ihrer Granularität in mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Verfahren. Bei den statistischen Verfahren ist eine Aufteilung aufgrund der grundlegenden statistischen Techniken, die für die Prognose eingesetzt werden, sinnvoll.

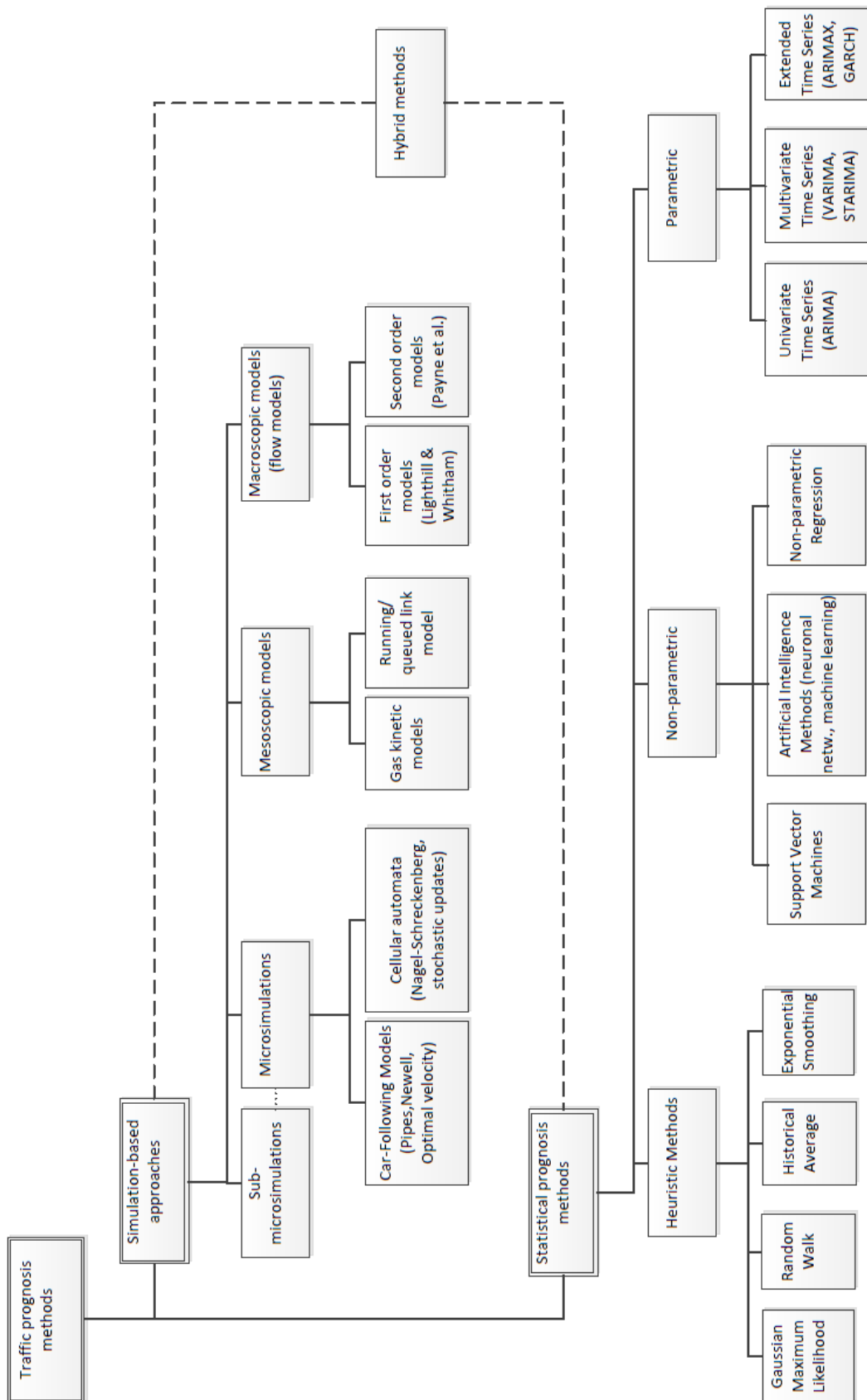


Abbildung 7 Klassifizierung der unterschiedlichen Verkehrs-und Stauprognoseverfahren

2.2.3 Simulationsbasierte Methoden

Simulationsbasierte Methoden basieren auf physikalischen Modellen des Verkehrsflusses bzw. des Verhaltens der Verkehrsteilnehmer. Solche Modelle gibt es für verschiedene Stufen der Detaillierung, Abstraktion und Granularität. Das Ziel der Methoden ist die Modellierung der Verkehrsdynamik, i.d.R. in einer praktisch beliebig genauen räumlichen und zeitlichen Auflösung. Bei verkehrsdynamischen Simulationen ist das Phänomen von raumzeitlichen Korrelationen und Abhängigkeiten im Verkehrsgeschehen ein integraler Bestandteil der Methode. Die Verkehrssituation an Ort A zur Zeit t_1 hat unter Umständen einen entscheidenden Einfluss auf die Situation and Ort B zur Zeit t_2 .

Der typische Programmablauf einer Verkehrssimulation ist in Abbildung 8 dargestellt. Am Anfang braucht es Verkehrsdaten (input data), mit denen in einem Offline-Verfahren Schätzungen für die Verkehrsnachfrage einer bestimmten „Verkehrs“-Population berechnet werden (population syntesizer). Basierend auf den Verteilungen für die Verkehrsnachfrage werden Aktivitätsmuster in Form von Quelle-Ziel-Matrizen („source-destination matrices“ bzw. „origin-destination matrices“) generiert (activity generator). Im Route Planner wird dann für jede geplante Aktivität eine Route gewählt und das System wird auf Basis der geplanten Routenwahlen simuliert (Simulation). Diese Simulation resultiert möglicherweise in Verkehrsbehinderungen bzw. Verkehrstaus auf gewissen Netzabschnitten, während andere Abschnitte einen freien Verkehrsfluss zulassen. Die Information wird in einer Feedback-Schleife genutzt, um allenfalls die Aktivitätsmuster und Routenwahlen zu optimieren. Die Schleife wird durchlaufen, bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Die Feedbackschleife soll so der Tatsache Rechnung tragen, dass viele Verkehrsteilnehmer ihre Reiseplanung aufgrund der Verkehrssituation anpassen. Die Simulation soll so anhand realer Daten kalibriert werden, dass der Gleichgewichtszustand die reale Verkehrssituation widerspiegelt.

Für eine Verkehrsprognose kann dann die Simulation für einige Zeit in die Zukunft fortgesetzt werden. Dies setzt natürlich voraus, dass die Simulation viel schneller ist als die entsprechenden Prozesse in Echtzeit. Die meisten Simulationen sind im Wesentlichen deterministisch und erlauben daher keine direkten Wahrscheinlichkeitsaussagen für die Prognosen. Dies kann man mittels Ensemble-Prognosen auffangen, bei denen die Simulation mit leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen mehrfach wiederholt wird bzw. mehrere Simulationen parallel durchgeführt werden. Wahrscheinlichkeitsaussagen ergeben sich dann aus der Verteilung der Simulationsergebnisse.

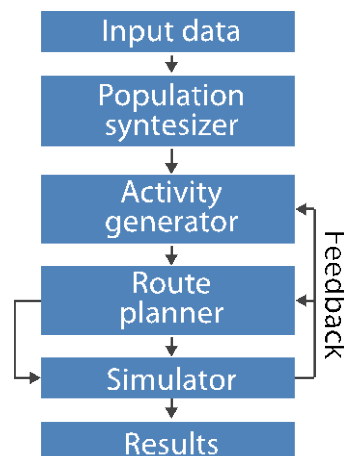


Abbildung 8 Typisches Flussdiagramm für eine Verkehrssimulation. Mittels einer Feedbackschleife wird ein Gleichgewichtszustand errechnet. Eine Prognose ergibt sich durch das Fortsetzen der Simulation in die Zukunft.

Obwohl sich dieser Bericht im Folgenden auf die Beschreibung von Core-Methoden, also den Simulator in Abbildung 8, fokussiert, ist es hier angezeigt, auch ein paar Worte über die vor- und nachgelagerten Prozesse zu verlieren. Zunächst ist das Postprocessing der Simulationsergebnisse methodisch relativ einfach, da die Ergebnisse vollständige raumzeitliche Daten (Ort und Zeit einzelner Fahrzeuge bei Mikrosimulationen bzw. Verkehrsdichte oder Geschwindigkeitsverteilungen bei Makrosimulationen) enthalten. Reisezeit-

prognosen für eine Route ergeben sich dann beispielsweise im letzteren Fall durch eine Integration des zeitlich variablen Geschwindigkeitsfeldes entlang der Route. Die Kalibrierung der Daten beim Preprocessing (input data matching) ist dagegen komplizierter. Es ist prinzipiell bis auf Weiteres nicht möglich, über alle exakten realen Verkehrsnachfragedaten zu verfügen. Daher nutzt man statistische Methoden und Heuristiken, um diese approximativ zu generieren. Die zumeist grosse Zahl an Modellparametern wird dann so eingestellt, dass die simulierten Ergebnisse mit den beobachteten Daten (etwa von Verkehrszählern) übereinstimmen. Simulationsprogramme, die auf diesem Ansatz beruhen und zumeist im akademischen Umfeld genutzt werden, müssen also bis zu einem gewissen Grad die Simulation mit statistischen Methoden verbinden. In diesem Sinne kann man sie bereits als hybrid bezeichnen.

Die simulationsbasierten Methoden können in vier Untergruppen aufgeteilt werden, die im Wesentlichen den Detaillierungs- und Abstraktionsgrad der Modelle widerspiegeln.

Submikro-und Mikrosimulationen

Diese Modelle beschreiben den Verkehr auf Stufe einzelner Fahrzeuge oder gar auf Stufe des Fahrverhaltens einzelner Verkehrsteilnehmer. Die Modelle haben insbesondere eine hohe Erklärungskraft (und potentiell Prognosekraft) bei Stauphänomenen. Zwei wichtige Modellkategorien innerhalb der Gruppe sind:

- **Car-follower models:** Z.B. [Reuschel, 1950], [Pipes, 1953], Intelligent Driver Model [Treiber, 2010]
- **Zellulären Automaten:** Z.B. Nagel-Schreckenberg Modell [Nagel, 1992], [Raney, 2002].

Erstere Modelle gehen von einer Behandlung von Raum und Zeit als kontinuierliche Grösse aus, während zelluläre Automaten diskrete Modelle darstellen.

Mesoskopische und makroskopische Modelle

Mikroskopische Modelle sind sehr daten- und rechenaufwändig. Diese Komplexität versuchen makroskopische Modelle zu reduzieren, durch eine Betrachtung der verkehrsrelevanten Grössen auf höherer Aggregationsstufe, wobei häufig Ähnlichkeiten zu Modellen der Fluidodynamik oder anderen physikalischen Modellen ausgenutzt werden, z.B. [Helbing, 2001], [Luspay, 2010; G. Liu, 1998]. Der Begriff „mesoskopisch“ wird eher uneinheitlich verwendet und bezeichnet beispielsweise Ansätze, die mikroskopische und makroskopische Modelle kombinieren. Ein solcher Ansatz nutzt etwa das Simulationspackage DYNASmart, um die Rechenperformance zu verbessern [Mahmassani, 1998; Noh, 2009].

Im Anhang I.1 findet sich eine detaillierte Übersicht und Diskussion der verschiedenen simulationsbasierten Methoden mit weiteren Referenzen.

2.2.4 Statistische Methoden

Im Vergleich zu simulationsbasierten Ansätzen basieren statistische Methoden auf einer eher unscharfen Idee der Modellierung. Normalerweise werden gewisse strukturelle Abhängigkeiten zwischen den betrachteten Grössen vorausgesetzt. Letztendlich wird das Modell jedoch durch die Daten bestimmt, die zur Kalibrierung genutzt werden.

Statistische Ansätze gehen davon aus, dass der Verkehrsfluss bestimmten Mustern folgt (Rush hour, Ferienverkehr, etc.), die durch mehr oder weniger zufällige Ereignisse wie extreme Wettersituationen, Unfälle etc. gestört werden. Ein Hauptproblem ist daher das Identifizieren oder gar Prognostizieren dieser Einflüsse. Betrachten wir kurze Zeiträume (Minuten bis Stunden) sind viele der Einflussfaktoren bekannt (Wetter, Strassenverhältnisse) und wir können davon ausgehen, dass eine Verkehrsvorhersage für diese Zeiträume im Prinzip auf Basis der aktuellen Verhältnisse und mittels Wissen über das zugrunde liegenden Verkehrsmuster gemacht werden kann. Es verlangt allerdings unter Umständen fortgeschrittene statistische Methoden, solche Vorhersage tatsächlich zu machen. Zunächst müssen das Grundmuster und die relevanten Einflüsse erkannt werden, die anschliessend zu einer guten Vorhersage führen.

Für Langzeitprognosen (Wochen, Monate, Jahre) sind die Einflüsse zunehmend unklar

oder unbekannt (z.B. das Wetter in zwei Monaten). Derartige Langzeitprognosen müssen also eine grosse Bandbreite von möglichen Szenarien berücksichtigen, was zwangsläufig zu ungenauen Vorhersagen führt. Eine sinnvolle Herangehensweise an das Problem ist die Nutzung eines geeigneten Mittelwertes aus immer wiederkehrenden Mustern. Dies geht schon mit eher einfachen statistischen Methoden (siehe unten). Der jährliche Stau am Gotthard zu Ostern ist ein gutes Beispiel für die Problematik der Langzeitvorhersage. Den Stau wird es sicherlich auch nächstes Jahr geben, aber die effektive zeitliche und räumliche Länge wird durch derzeit unbekannt Faktoren wie Wetter, Strassenverhältnisse, politische Entscheidungen, etc. beeinflusst werden.

Ein bedeutender Aspekt bei Prognosen ist der Übergang von regulärem Verkehr hin zu "irregulärem" Verkehr. Normalerweise kann der Anfang solcher Übergänge mit statistischen Methoden relativ gut vorhergesagt werden, aber wenn die Muster wirklich irregulär werden, dann werden Prognosen mit statistischen Methoden schwierig. So flexibel statistische Methoden sind, sie versagen i.d.R. doch bei der Modellierung komplexer dynamischer Verkehrsprozesse, bei denen schon ein einzelnes Fahrzeug einen grossen Einfluss auf den gesamten Verkehrsfluss haben kann. In solchen Situationen sollten statistische Methoden mit Mikrosimulationsansätzen kombiniert werden.

Statistische Methoden können in zwei Hauptkategorien unterteilt werden, parametrische und nicht-parametrische Methoden. Die Kategorie der parametrischen Methoden umfasst hauptsächlich Zeitreihenmodelle. Wie der Name "parametrisch" schon verrät, hängen diese Modelle stark von guten und dynamischen Schätzungen vieler Modellparameter ab. Die sogenannten nicht-parametrischen Methoden, hauptsächlich Regressions-Techniken und neuronale Netze oder ähnliche Techniken, hängen typischerweise von weniger Parametern ab als ihre parametrischen Pendants. Ihre Leistungsfähigkeit hängt massgeblich von der Qualität und Organisation der zugrunde liegenden Daten ab. Die Zuteilung mancher Methoden ist nicht immer eindeutig, was aber für die Diskussion hier keine Rolle spielt.

Im Folgenden geben wir einen Überblick über statistische Methoden, die in der Literatur für Verkehrs- und Stauprognosen vorgeschlagen wurden. Zunächst werden heuristische Methoden aufgelistet, welche in der Praxis häufig gebraucht, sich aber in vielen realistischen Situationen als nicht zweckmässig für die Kurzzeit-Vorhersage gezeigt haben. Danach erfolgt eine Auflistung von Zeitreihen-Modellen für die Verkehrsvorhersage (ARIMA, GARCH), inklusive multivariate Erweiterungen, und von nicht-parametrischen Techniken.

Heuristische Modelle

Die meisten heuristischen Modelle haben den Vorteil, dass sie leicht zu implementieren sind. Sie liefern eine erste Schätzung für eine grobe Prognose basierend auf historischen Daten. Durch die Einfachheit kann aber keine akkurate Vorhersage dynamischer Prozesse erwartet werden. Beispiele:

- Historischer Mittelwert
- Random Walk, z.B. [Ghosh, 2004]
- Exponential Smoothing, z.B. [Z. Li, 2008b].
- Gaussian Maximum Likelihood, z.B. [Lin, 2001]

Parametrische Modelle / Klassische Zeitreihenanalysen

Verkehrsdaten, etwa von Verkehrszählern, haben die Form von Zeitreihen. Für die Analyse und die Prognose von Zeitreihen gibt es eine Vielzahl statistischer Methoden. Eine Gemeinsamkeit ist die Notwendigkeit von Parameteranpassungen, etwa mittels der Maximum-Likelihood-Methode oder der Least-Square-Methode. Dies kann, wie im Falle von Kalman-Filtern, auch adaptiv in Abhängigkeit neuer Daten geschehen. In Anhang I.2 wird auf die folgenden Methoden, die im Zusammenhang mit Anwendungen für Verkehrsprognosen in der Literatur vorgeschlagen wurden, näher eingegangen:

- **ARIMA(p,q)-Modelle**, z.B. [Shekhar, 2007].
- **ARIMA mit GARCH-Erweiterung**, z.B. [Guo, 2007]
- **Vektor-ARIMA und Space Time ARIMA Modelle**, z.B. [Chandra, 2009] bzw. [Kamarianakis, 2005].

- **ARIMAX**, z.B. [Lin, 2001]

Nicht-parametrische Modelle und gemischte Ansätze

Zu den nichtparametrischen Methoden werden sowohl die nicht-parametrische Regression, wie auch viele Methoden aus dem Gebiet des Machine Learning bzw. der künstlichen Intelligenz gezählt. Der Ausdruck „nicht-parametrisch“ bezieht sich auf die Tatsache, dass diese Methoden typischerweise nur wenige Annahmen über die Struktur der Daten treffen. Diese soll sich vielmehr aus den Daten ergeben bzw. aus diesen gelernt werden. Die folgenden Methoden, die für Verkehrsprognosen vorgeschlagen wurden, werden in Anhang I.2 näher beleuchtet:

- Nichtparametrische Regression, z.B. [Clark, 2003]
- Clustering-basierte Ansätze, z.B. [de Rham, 2007]
- Künstliche neuronale Netzwerke, z.B. G. Zhang, 1998]
- Support Vector Machines, z.B. [Vanajakshi, 2007]
- Bayes'sche Netzwerke, z.B. [Sun, 2006]
- Adaptive ARIMA/Kalman Filter oder ähnliche Ansätze, z.B. [Van Der Voort, 1996]
- Ansätze aus der statistischen Mechanik, z.B. [Furtlehner, 2007].

2.2.5 Vergleich der unterschiedlichen Methodentypen

Die unterschiedlichen methodischen Ansätze für Verkehrs- und Stauprognosen und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile werden in den folgenden Tabellen zusammengefasst (Tabelle 1: Simulationsbasierte Methoden, Tabelle 2: Statistische Methoden):

Tabelle 1 Simulationsbasierte Methoden

Simulationsbasierte Methoden	Vorteile	Nachteile
Mikroskopische Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Voraussage von Reisezeiten • Gute raumzeitliche Auflösung der Ergebnisse • Sehr detaillierte Output-Information • Physikalisch verständliche bzw. interpretierbare Modelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Rechenintensiv • Grosse Anzahl an Modellparametern • Komplexe Datenstruktur für input (Origin – Destination Matrix)
Mesoskopische Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Voraussage von Reisezeiten • Modellkomplexität überschaubar, da vereinfachte Modellstruktur • Physikalisches Modell als Grundlage 	<ul style="list-style-type: none"> • Feineinstellung der Parameter nötig, um die mikroskopische Ebene richtig abzubilden • Immer noch potentiell eine grosse Zahl an Modellparametern • Komplexe Inflow und Outflow Bedingungen nötig
Makroskopische Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • Konzeptionelle vereinfachtes Verkehrsmodelle • Weniger rechenintensiv • Einfache Voraussage von Reisezeiten • Grundbausteine der Modelle sind physikalische (verständlich bzw. interpretierbar) 	<ul style="list-style-type: none"> • Grosse Anzahl unterschiedlicher Modelle mit z.T. unklaren Vor- und Nachteilen • Endgültige Form des Modells ist häufig nicht physikalisch begründbar • Modell-inherente mathematische und physikalische Schwierigkeiten (z.B. Auftreten von unrealistischen Effekten) • Komplexe Inflow und Outflow Bedingungen nötig

Tabelle 2 Statistische Methoden

Statistische Methoden	Vorteile	Nachteile
Heuristische Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr einfach • Häufig geeignet für Langzeitprognose (wo komplexere Modelle wegen fehlender Daten o.ä. nicht angewendet werden können) 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr einfach • Nicht geeignet für Kurzzeitprognosen (Modellkomplexität zu klein) • Unfähig, komplexe Muster in den Daten zu erkennen
Parametrische Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Vordefinierte, häufig intuitive, Modellstruktur mit wenigen Parametern • On-line Prognosen möglich • Sehr adaptiv im Falle neuer Inputdaten (z.B. Kalman filtering) • Kann erweitert werden, z.B. um externe Faktoren zu berücksichtigen (Vector ARIMA, ARIMAX) 	<ul style="list-style-type: none"> • Standardmethoden benötigen stationäre Zeitreihen/Verkehrssituationen (mit Aufwand umgehbar) • Parameterschätzungen u.U. sehr aufwändig oder schwierig • U.U. Probleme beim Umgang mit Ausreißern oder fehlenden Daten
Nicht-parametrische Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • I.d.R. kleine Zahl an strukturellen Parametern • On-line Prognosen möglich • Wenige spezifische Modellannahmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Zumeist angewiesen auf eine gut organisierte Datengrundlage • Performance i.d.R. stark abhängig vom Preprocessing der Daten und mathematischer Vorgaben (z.B. Ähnlichkeitsmasse beim Clustering)

Diese kleine Übersicht verdeutlicht, dass es DIE optimale Methode nicht gibt. Für die Praxis stellt sich daher die Frage, wie man allenfalls verschiedene Methoden optimal kombinieren kann.

2.3 State of the Art Stauprognosesysteme

2.3.1 Einleitung

Insgesamt wurden 12 Stauinformationen und –prognosesysteme vertiefter analysiert und beurteilt. Der Erfassungsraster für die Stauprognosesysteme wurde in deutscher und englischer Sprache erstellt und umfasste folgende Themenbereiche (vgl. vollständiger Analyse- und Beurteilungsraster im Anhang I.3.2):

- Basisinformationen zum Systemhersteller/-betreiber
- Systemelemente und ihre Eigenschaften
- Organisatorische und institutionelle Aspekte
- Erfahrungen und Beurteilung
- Referenzen, Informationen und Kontakte

Für das Ausfüllen der Analyse- und Beurteilungsraster wurden neben Internetrecherchen und Literaturanalysen auch bestehende Kontakte genutzt und Telefoninterviews durchgeführt. Die Systemerfassungen erfolgten vorwiegend durch die Niederlassungen von Rapp Trans in Deutschland (Rapp Trans (DE), Berlin), in Holland (Rapp Trans (NL), Amsterdam), in Grossbritannien (Rapp Trans (UK), Reading) und in Frankreich (Carte Blanche Conseil, Paris). Dies vereinfachte die Erfassung insbesondere von Systemen, welche in diesen Ländern entwickelt und eingesetzt werden.

Einzelne Software- und Systemhersteller (z.B. Google, Inrix, VL Hessen) zeigten aus Wettbewerbsgründen und vermutlich auch wegen ihrer Marktmacht nur eine geringe Bereitschaft detailliertere Informationen zu Ihren Stauprognosesystemen zur Verfügung zu stellen. Dies gilt insbesondere für die verwendeten Prognosealgorithmen und die verwendeten Einflussgrößen. Andere Software- und Systemhersteller waren deutlich offener (z.B. Adapticon, Modelit, OLSIM) und unterstützten aktiv den Informationsbeschaffungsprozess.

Nachfolgend werden ausgewählte Stauinformations- und –prognose-Systeme aufgezeigt und beurteilt. Detailinformationen zu den Systemen sind im Anhang I.4 in tabellarischer

Form und in einem separaten nicht-öffentlichen Arbeitsbericht zusammengefasst (Arbeitsbericht State of the Art Stauprognoseseysteme und -verfahren, IAS ZHAW/Rapp Trans, 9.1.2012, unveröffentlicht). Der Stand der Abklärungen und Beurteilung ist Ende 2011. Die wichtigsten verwendeten Referenzdokumente gehen aus dem Literatur- und Quellverzeichnis hervor. Einzelne Einschätzungen basieren auf nur knappen Informationen zu den Systemen. Die Zuordnung zu Kategorien ist nicht immer eindeutig und teilweise mit Unsicherheiten behaftet. Für den State of the Art sind momentan nur diejenigen Informationen und Beurteilungen verwendet worden die für diesen Arbeitsschritt relevant sind (z.B. werden die Themen Systemarchitektur, Geschäftsmodell, grafische Aufbereitung und Verbreitung erst bei der Bedürfnisanalyse und beim Systemkonzept relevant).

2.3.2 Übersicht untersuchte Stauprognoseseysteme

Untersuchte Systeme

Insgesamt wurden 12 Stauprognoseseysteme vertiefter untersucht. Bei der Auswahl der Stauprognoseseysteme wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Stau - Prognosefunktionalität muss vorhanden sein. Systeme, welche nur den Ist-Zustand darstellen, wurden nicht einbezogen.
- Neben im Betrieb stehenden Stauprognoseseystemen sollen auch Prototypen berücksichtigt werden.
- Die Systeme mit grosser Verbreitung sollten berücksichtigt werden (z.B. TomTom, Inrix, Google).
- Zu den Stauinformations- und -prognoseystemen sollten ausreichend Informationen für eine Analyse und Beurteilung vorhanden sein. Einzelne Systemhersteller waren jedoch sehr zurückhaltend in Bezug auf die Bereitstellung von Informationen. Dies gilt insbesondere hinsichtlich verwendeten Prognoseverfahren und -methoden sowie der berücksichtigten Einflussfaktoren.
- Die vorgesehenen Mittel liessen keine beliebige Anzahl zu vertiefender Systeme zu; es war möglich rund 12 Systeme näher zu analysieren und zu beurteilen.
- Es sollten die wichtigsten Typen von Stauprognoseseystemen abgedeckt sein; also zum Beispiel modellgestützte Systeme (inkl. Simulationen) und Systeme, welche auf reinen statistischen Verfahren basieren. Zudem war es auch sinnvoll, Systeme zu berücksichtigen, welche neben der Verkehrsinformation auch das Verkehrsmanagement zum Anwendungszweck haben.

Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt eine entsprechende Übersicht. Aus der Tabelle geht auch die Qualität der vorliegenden Unterlagen hervor.

Tabelle 3 Untersuchte Stauprognosesysteme

System	Hersteller	Status	Inbetriebnahme	Räumliche Abdeckung	Qualität der Angaben
Capitals	INRETS	Prototyp (1995-97)	Nein	Paris-Strassbourg	mittel
AdaptiCast	Adapticon	In Betrieb	seit 2010, Integration in VM in Testphase	Holland, 4 Städte USA	gut
INRIX/anwb	INRIX	In Betrieb	Seit 2010/2011	Weltweit u Europa	mittel
TRIPCAST	Modelit	In Betrieb	Seit 2008	Holland	gut
TomTom	TomTom	In Betrieb	Seit 2007	Weltweit u Europa	mittel
OPTIMA	Mygistics/PTV	Prototyp, Testphase	Ja	2 Städte (USA, CA)	mittel
TTVMS	TiS	In Betrieb	Seit 2007	England	gut
iPerform	Iteris	Pilotprojekt	Seit 2011	Las Vegas	mittel
OLSIM	Uni Duisburg-Essen	In Betrieb	Seit 2003	Bundesland NRW	gut
VL Hessen	Landesamt (?)	In Betrieb	Ja	Bundesland Hessen	gering
MONET	PTV/Siemens	In Betrieb	Seit 2002	Berlin	gut
Google Maps	Google Inc.	In Betrieb	Seit 2008/2011	Weltweit u Europa	gering

Hinweise und Beurteilung:

- TomTom, Google Maps und Inrix sind am weitesten verbreitet und werden weltweit und in Europa eingesetzt; unter anderem auch in der Schweiz. Die übrigen Systeme wurden oder werden auf nationaler Ebene (AdaptiCast, TRIPCAST, TTVMS), auf regionaler Ebene (Capitals, OLSIM, VL Hessen) oder in Städten (AdaptiCast, OPTIMA, iPerform, Monet) eingesetzt.
- Die Mehrheit der Systeme ist in Betrieb. Nur wenige Systeme sind bereits länger im Einsatz und wurden aufgrund der gemachten Erfahrungen und neuen Datenquellen weiterentwickelt (z.B. OLSIM, MONET). Die anderen Systeme sind erst seit wenigen Jahren im Einsatz (z.B. AdaptiCast, INRIX, TRIPCAST, TomTom, TTVMS, Google Maps) und es liegen wenige Erfahrungen vor. Weitere Systeme haben es nicht über die Prototypphase hinaus geschafft (z.B. Capitals) oder befinden sich noch in der Testphase (OPTIMA, iPerform). Für diese Systeme liegen noch keine Erfahrungen vor.

Nicht weiter untersuchte Systeme

- Da im Rahmen dieses Projektes kein vollständiger Überblick über die weltweit vorhandenen Stauprognosesysteme möglich ist, können auch nicht alle nicht weiter untersuchten Systeme vollständig aufgezählt werden.
- Es wurden Systeme nicht weiter untersucht, für welche bereits ähnliche Typen analysiert und beurteilt wurden. Dies betrifft zum Beispiel das Stauprognosesystem Zuerittraffic (www.zuerittraffic.ch), weil in Hessen (VL Hessen) oder Berlin (Monet) vergleichbare Systeme im Einsatz sind. Zuerittraffic zeigt den aktuellen Verkehrszustand (frei, behindert, stockend, Stau) und die Verkehrsbelastung nach Streckenabschnitten sowie eine Prognose für 30 Minuten und 60 Minuten. Das System basiert auf online Verkehrsdaten (3-Minuten Intervalle) von über 1000 Sensoren, welche in ein Verkehrsmodell eingespielen werden. Im Verkehrsmodell (Software Polydrom) werden Quell-Zielmatrizen laufend kalibriert und auf ein Verkehrsnetz umgelegt. Aufgrund der Auslastung der Strecken wird ein

- Verkehrszustand zugeordnet. Die Prognosezustände werden voraussichtlich über historische Verkehrsdaten und Verkehrszustände abgeschätzt.
- Weiter wurden Systeme nicht weiter untersucht, für welche nur sehr aggregierte Stauprognosen zur Verfügung gestellt werden. Ein Beispiel dafür sind die Stauprognosen des ADAC (www.adac.de) oder des ÖAMTC (www.oeamtc.at), welche aufgrund von historischen Daten Angaben machen über den zu erwartenden Verkehrszustand und die mittleren Geschwindigkeiten (nur bei ADAC).
 - Das Stauprognosesystem im Rahmen von Bayerninfo (www.bayerninfo.de) wurde nicht vertieft, weil mit dem System MONET (Berlin) bereits ein vergleichbares System betrachtet wird. Es handelt sich auch um eine modellgestützte Verkehrslageabschätzung auf der Basis von aktuellen Verkehrsdaten (Systemhersteller PTV und Siemens).
 - Auch das Stauprognosesystem Beatthetraffic (www.beatthetraffic.com) wurde nicht weiter untersucht, obwohl es in den USA in zahlreichen Städten in Betrieb ist. Der Hauptgrund liegt darin, dass in Bezug auf die Verkehrsdaten eine Zusammenarbeit mit INRIX besteht und dieses System untersucht wird. Auf der anderen Seite zeigte es sich als schwierig, an Informationen heranzukommen, welche über allgemeine Beschriebe auf dem Internet hinausgehen. Verfahren und Methoden für die Verkehrs- und Stauprognose sind patentiert worden.

An der BK-Sitzung vom 22.11.2011 wurde mit Ausnahme von Google Maps kein weiteres zusätzliches wichtiges Stauprognosesystem genannt, welches in die Untersuchung einbezogen werden sollte.

2.3.3 Anwendungszwecke und Methoden

Aus der nachfolgenden Tabelle gehen die Anwendungszwecke und die Prognosemethoden der untersuchten Systeme hervor; dies in aggregierter Form. Weitere Informationen können dem Anhang I.4 entnommen werden.

Anwendungszwecke

Erwartungsgemäss ist der Hauptzweck aller untersuchten Systeme die Verkehrsinformation für die Strassenbenutzer. Nur wenige Systeme bieten als Zusatzdienst auch noch die Routenavigation für die Reiseplanung an (TomTom, TripCAST, Google). Nur eine Minderheit der Systeme hat den Anwendungszweck Verkehrsmanagement mit einer entsprechenden Schnittstelle (AdaptiCast, OPTIMA, iPerform). Einzelne Systeme unterscheiden zwischen Personen- und Lastwagen und bieten differenzierte Informationen für die entsprechenden Kundensegmente an (z.B. TRIPCAST, OLSIM).

Tabelle 4 Anwendungszwecke und Prognosemethoden

System	Anwendungszwecke			Prognoseverfahren/-methoden	
	Verkehrsinfo	Routenavigation	Verkehrsmanagement	Simulationsbasiert	Statistische Prognosemethoden
Capitals					
AdaptiCast					
INRIX/anwb					
TRIPCAST					
TomTom					
OPTIMA					
TTVMS					
iPerform					
OLSIM					

VL Hessen					
MONET					
Google Maps					

Prognoseverfahren und -methoden

Aufgrund der vorliegenden Angaben war eine Zuordnung zu den Hauptgruppen nicht immer von vornherein klar, weil detaillierte Angaben zu den Algorithmen aus Wettbewerbsgründen nicht zur Verfügung gestellt werden. Rund ein Drittel der Systeme nutzt modell- oder simulationsbasierte Prognoseverfahren/-methoden; die übrigen zwei Drittel nutzen statistische Prognoseverfahren und –methoden. Nach heutigem Stand nutzt nur ein System eine Kombination von statistischen und modellgestützten Verfahren (TRIPCAST).

Bei den simulationsbasierten Stauprognosesystemen lässt sich folgendes feststellen:

- TRIPCAST nutzt gemäss unserer Einschätzung heuristische Methoden (Informed Historical Average) kombiniert mit einem off line Simulationsverfahren. Das System simuliert eine grosse Anzahl von Fahrten und ermittelt daraus Punktschätzungen und Zuverlässigkeitsintervalle für Reisezeiten.
- OPTIMA nutzt im Hintergrund ein Makrosimulationsmodell mit einer dynamischen Aktualisierung aufgrund von aktuellen Verkehrsdaten. Auf einer tieferen Ebene handelt es sich um ein mesoskopisches Modell, bei dem nicht nur der Verkehrsfluss und die Geschwindigkeit abgebildet werden, sondern auch die wichtigsten Aktivitäten eines Fahrzeugs.
- OLSIM basiert auf einem mikroskopischen Simulationsmodell (Zelluläre Automaten). Verkehrsdaten der Messstellen werden im Minutentakt an ein Datenzentrum weitergeleitet und dort in das Simulationsmodell eingespielen. Die Simulationen werden genutzt für die Ermittlung der aktuellen Verkehrslage und für die 30 und 60 Minuten Prognosen, wobei für die Prognosen neben aktuellen Daten auch historische Daten genutzt werden. Die Langzeitprognose beruht allein auf historischen Daten. Das System MONET basiert auch auf einer statischen Verkehrsmodellierung zur Ermittlung des Verkehrszustandes auf der Basis von statischen (Matrizen) und dynamischen Verkehrsdaten (Verkehrsdaten aus Verkehrsmessstellen). Auf Strecken, wo keine Messdetektoren vorliegen, wird der Verkehrszustand abgeschätzt mittels einem Routing Verfahren und einem Messwert-Ausbreitungsansatz. Dies unter Berücksichtigung von FCD Daten.

Bei den auf statistischen Verfahren basierten Stauprognosesystemen lässt sich Folgendes feststellen:

- Capitals verwendet ein statistisches Verfahren, bei welchem der Verkehrszustand in Abhängigkeit von Kalendertag, Wetter und Baustellen aufgrund von historischen Daten hergeleitet wird. Die genaue Funktionsweise konnte nicht abschliessend geklärt werden.
- AdapiCast verwendet ein nicht-lineares, wahrscheinlichkeitstheoretisches statistisches Verfahren. In einem „Offline Modell“ werden historische Daten mittels Data Mining analysiert und die Prognosezusammenhänge ermittelt. In einem Online Modell werden diese Zusammenhänge unter Berücksichtigung von aktuellen Verkehrsdaten und Prognosen (Wetter, Baustellen etc.) angewendet und die Reisezeiten und Reisegeschwindigkeiten mit ihren Wahrscheinlichkeiten ermittelt (Bayesian Methode).
- Bei INRIX wird basierend auf aktuellen Verkehrsdaten der Verkehrsfluss (inkl. Geschwindigkeiten) ermittelt. Basierend auf den Geschwindigkeiten wird der Verkehrszustand abgeleitet. Für die aktuelle Verkehrslage sowie die Kurz- und Langzeitprognose werden unterschiedliche Daten genutzt. Detailliertere Angaben zu Prognoseverfahren und –methoden werden nicht veröffentlicht.
- TRIPCAST nutzt gemäss unserer Einschätzung heuristische Methoden (Informed Historical Average) kombiniert mit einem off line Simulationsverfahren. Das System simuliert eine grosse Anzahl von Fahrten und ermittelt daraus Punktschätzungen und Zuverlässigkeitsintervalle für Reisezeiten.

- TomTom nutzt gemäss unserer Einschätzung ähnliche Verfahren und Methoden wie INRIX. Es handelt sich wahrscheinlich um ein heuristisches (informed) historical average Verfahren. Die Prognosewerte werden vermutlich alleine aufgrund von historischen Verkehrsdaten sowie aktuellen Verkehrsdaten abgeleitet.
- TTVMS benutzt auch ein statistisches Verfahren für die Ermittlung des Verkehrsflusses und der Reisegeschwindigkeit basierend auf den Messdaten aus den Nummernschilderkennungsdetektoren. Das System nutzt ausschliesslich historische und aktuelle Verkehrsdaten und keine weiteren Prognosewerte.
- iPerform nutzt gestützt auf die vorhandenen Informationen ähnliche Ansätze wie INRIX und TomTom. Im Vergleich zu diesen können aber auch künftige Bedingungen wie Wetter und Anlässe berücksichtigt werden. Genauere Angaben zu Verfahren und Methoden liegen nicht vor.
- VL Hessen beruht vermutlich auf einem statistischen Verfahren bei welchem aufgrund von Geschwindigkeitsmessungen (FCD) der Verkehrszustand ermittelt wird. Über die Kerner'sche Drei-Phasen-Verkehrstheorie liegt eine Grundlage vor, Eigenschaften von zeitlich-räumlichen Verkehrsstörungen so zu kennen und zu nutzen, um eine effiziente Kommunikation aus Fahrzeugen und eine anschliessende zentralisierte Auswertung durchzuführen.

Detailliertere Informationen zu den Stauprognoseverfahren und –methoden, das heisst unabhängig der Stauprognosesysteme, können dem Kapitel 2.2 entnommen werden.

2.3.4 Quellen von Verkehrsdaten

Die untersuchten Systeme nutzen verschiedene historische und aktuelle Verkehrsdaten. Die nachfolgende Abbildung zeigt die durch die Systeme genutzten Quellen von Verkehrsdaten. Bei der individuellen Anwendung hängt dies natürlich von den verfügbaren Daten ab.

Tabelle 5 Quellen von Verkehrsdaten

System	Automat. Verkehrsz. (Induktion)	Autom. Nummernschilderkennung	Video-kameras	Floating Car Data	Floating Mobile Data	Verkehrsmodell (Nachfragematrizen)	Andere (Verkehrsmeldungen, Wechseltextanz.etc.)
Capitals							
AdaptiCast							
INRIX/anwb							
TRIPCAST							
TomTom							
OPTIMA							
TTVMS							
iPerform							
OLSIM							
VL Hessen							
MONET							
Google Maps							

Bezüglich der genutzten bzw. nutzbaren Daten lässt sich folgendes feststellen:

- Mit Ausnahme des TTVMS nutzen alle Stauprognosesysteme Verkehrsdaten von automatischen Verkehrszählern (Induktionsschleifen). Meist werden diese ergänzt mit Verkehrsdaten aus anderen Quellen.

- Daten aus automatischen Nummernschilderkennungsgeräten werden nur wenig genutzt; oft sind die Strassen auch nicht in genügender Dichte mit solchen Systemen ausgerüstet. Vermutlich könnten die meisten der Systeme auch diese Daten nutzen. Das gleiche gilt für Videokameras.
- Aufgrund der technischen Entwicklung und dem steigenden Verbreitungsgrad von Navigationssystemen und von Mobiltelefonen stehen auch immer mehr Floating Car Data und Floating Mobile Data zur Verfügung. Diese werden vor allem durch die grossen Anbieter von Verkehrsinformationssystemen genutzt wie INRIX, TomTom, Google etc. Aber auch andere Systeme können diese Daten nutzen soweit diese zugänglich sind. Künftig dürfte Google einen Teil der Verkehrsdaten über INRIX beziehen.
- Modell- und simulationsgestützte Ansätze (insbesondere bei makroskopischen Modellen) verwenden in der Regel auch Ziel-Quell-Matrizen-Daten.
- Zahlreiche Systeme nutzen auch weitere Verkehrsinformationen und Ereignismeldungen für die Stauprognosen.

2.3.5 Inputparameter der Prognosesysteme

Die untersuchten Prognosesysteme nutzen in unterschiedlichem Masse historische, aktuelle und prognostizierte Inputparameter. Die nachfolgende Abbildung zeigt die für die Prognose verwendeten Inputparameter. Es konnte nicht immer festgestellt werden, welche Inputparameter für die aktuelle Lage und insbesondere auch für die Prognose genutzt werden. Die Angaben waren teilweise zu wenig differenziert und präzise. Generell kann man sagen, dass bei der Mehrheit der Systeme für den Ist-Zustand mehr Faktoren berücksichtigt werden als für den Prognosezustand.

Tabelle 6 Inputparameter der Prognosesysteme

System	Verkehrsdaten	Kalendertag	Ferienkalender	Wetter/Witterung	Baustellen	Grossanlässe	Unfälle
Capitals							
AdaptiCast							
INRIX/anwb				?	?	?	?
TRIPCAST							
TomTom							
OPTIMA			??				
TTVMS							
iPerform							
OLSIM							
VL Hessen							
MONET							
Google Maps		Wochentag					

Bezüglich der Inputparameter für die Prognosen lässt sich folgendes feststellen:

- Erwartungsgemäss nutzen alle untersuchten Systeme zeitbezogene Verkehrsdaten und den Kalendertag für die Prognose. Dies sind in der Regel historische und aktuelle Verkehrsdaten.
- Rund die Hälfte der untersuchten Systeme berücksichtigt den Ferienkalender, das Wetter und Baustellen.
- Nur wenige Systeme berücksichtigen Grossanlässe und Unfälle.

Ob INRIX wirklich alle Einflussfaktoren abdecken kann ist eher zu bezweifeln. Es ist zu

vermuten, dass für die aktuelle Verkehrslage diese Faktoren berücksichtigt sind; jedoch für die Prognose nicht oder nur partiell. Das gilt voraussichtlich auf für TomTom und insbesondere auch für Google Maps, das ausschliesslich aufgrund von historischen Verkehrsdaten Prognosen generiert.

2.3.6 Outputvariablen der Prognosesysteme und Prognosehorizonte

Bezüglich der Outputparameter bestehen erhebliche Unterschiede bei den untersuchten Systemen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Outputparameter der untersuchten Systeme und zeigt auch bei welchen Systemen Zuverlässigkeiten oder Wahrscheinlichkeiten bei den Outputparametern ausgegeben werden.

Tabelle 7 Outputparameter der Prognosesysteme

System	Verkehrsfluss/-dichte	Verk. Belastung/zust.	Reisezeit (bzw. Reisezeitverluste)	Reisegeschw.	Staulänge	Route	Zuverlässigkeit	Wahrscheinlichkeit
Capitals								
AdaptiCast								
INRIX/anwb								
TRIPCAST								
TomTom								
OPTIMA								
TTVMS								
iPerform								
OLSIM								
VL Hessen								
MONET								
Google Maps								

Bezüglich der Outputparameter für die Prognosen lässt sich folgendes feststellen:

- Die meisten Stauprognosesysteme geben Reisezeiten aus als eine der zentralen Grössen für den Strassennutzer.
- Die meisten Systeme geben auch den Verkehrszustand und/oder die Verkehrsdichte als Outputgrösse an; zumindest in aggregierter Form über das Mass der Staufähndung.
- Die Angabe von weiteren Prognosegrössen wie Reisegeschwindigkeit, Staulängen und Routen ist weniger verbreitet.
- Zuverlässigkeiten bzw. Wahrscheinlichkeiten bei den Outputgrössen (in der Regel nur bei den Reisezeiten) geben nur zwei Systeme an; AdaptiCast und TRIPCAST

Eine Differenzierung des Outputs nach Fahrzeugkategorien (Personenwagen, Lastwagen) haben nur wenige Systeme (z.B. AdaptiCast, TRIPCAST).

Bezüglich Prognosehorizonte lässt sich folgendes feststellen:

- Eine Mehrheit der Stauprognosesysteme haben eine Kurz-, Mittel und Langfristprognose, das heisst der Prognosehorizont deckt Minuten bis Wochen oder Monate ab (Capitals, AdaptiCast, INRIX, TRIPCAST, TomTom, OPTIMA). Systeme mit statistischen Verfahren sind flexibler bezüglich Prognosehorizont (variable Zeithorizonte), da der Rechenaufwand verhältnismässig gering ist.
- Einige Stauprognosesysteme beschränken sich auf Kurzzeitprognosen z.B. 30 und 60 Minuten oder allenfalls bis 90 Minuten (VL Hessen, MONET, TTVMS). Die modellgestützten Systeme haben oft fixe Prognosehorizonte mit z.B. 30 bzw. 60

Minuten; dies insbesondere auch wegen dem notwendigen Rechenaufwand für den Prognosezustand. OLSIM hat als simulationsgestütztes System auch noch einen Prognosehorizont von einer Woche.

- Bei Google Maps ist eine Prognose möglich für bestimmte Wochentage; jedoch nicht für bestimmte Kalendertage. Damit ist die Prognosefähigkeit eingeschränkt.

2.3.7 Erfahrungen und Beurteilung

Erfahrungen, Stärken und Schwächen

Für die untersuchten Systeme sind in der nachfolgenden Tabelle die wichtigsten Erfahrungen, Stärken und Schwächen aufgelistet. Diese beruhen einerseits auf den Analyse- und Beurteilungsformularen und andererseits auf Einschätzungen der Forschungsstelle.

Die wichtigsten Erfahrungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Grundsätzlich werden für alle im Betrieb stehenden Systeme positive Erfahrungen angegeben. Mit Ausnahme von AdaptiCast und TRIPCAST wurden jedoch keine unabhängigen Systemvergleiche durchgeführt. Entsprechend unsicher sind die aufgezeigten Erfahrungen bezüglich der Qualität der ausgegebenen Kenngrößen.
- Die Systeme AdaptiCast und TRIPCAST zeigten in Systemvergleichen eine gute Übereinstimmung von Prognose- mit Messwerten. Beide Systeme haben bei Wettbewerben entsprechende Preise gewonnen. Die positiven Nutzerreaktionen unterstreichen die positiven Erfahrungen.
- Aus dem Pilotbetrieb von Capitals ergab sich die wichtige Erkenntnis, dass der Kalendertag, neben dem Wetter und den Anlässen der wichtigste Einflussfaktor für die Prognose ist.
- Für die "grossen Anbieter" (INRIX, TomTom, Google) werden positive Nutzerreaktionen ausgemacht. Es fehlen jedoch verlässliche Systemvergleiche. Es ist zu vermuten, dass sich diese mehr auf die Darstellung der aktuellen Verkehrslage beziehen als auf die eigentlichen Prognosen.
- Für die Systeme OPTIMA, TTVMS und OLSIM werden auch positive Nutzerreaktionen ausgemacht. Vermutlich nicht unabhängige Vergleiche zeigen eine hohe Zuverlässigkeit der Prognosewerte.
- Für iPerform liegen noch keine Erfahrungen vor und für VL Hessen wollte der Systembetreiber über die Erfahrungen keine Auskunft geben.

Die wichtigsten Stärken und Schwächen können wie folgt zusammengefasst werden:

Die "grossen Anbieter" (INRIX, TomTom, Google) haben ihre Stärken in der Verbreitung, in der Marktmacht und in der Nutzung von mobilen Daten (FCD, FMD). Sie sind grundsätzlich nicht auf Verkehrsmessstellen (Infrastruktur, Ausrüstung) angewiesen, können diese jedoch bei Eignung nutzen. Für den Ist-Zustand liefern diese Systeme ein gutes, jedoch stark aggregiertes Gesamtbild. Die Schwächen liegen dann auf der starken Abstützung auf historische Daten ohne spezifische Berücksichtigung von Anlässen, Wetterprognosen oder Baustellen (für den Prognosezustand). Bei INRIX ist nicht effektiv klar, inwieweit diese Einflussgrößen wirklich in die Prognosen einfließen. Google Maps verfügt nur über eine stark aggregierte Prognosefunktionalität für Wochentage.

Tabelle 8 Erfahrungen, Stärken und Schwächen

System	Erfahrungen	Stärken	Schwächen
Capitals	Gute Übereinstimmung von Prognosewerten mit Messwerten, Wichtigster Einfluss hat Kalendertag, vor Wetter und vor Anlässen, je länger die Historie, desto besser die Prognosewerte	Gute Prognosresultate für Situationen ohne Störungen	Ungenügende Resultate bei speziellen Ereignissen, keine definitive Inbetriebnahme
AdaptiCast	Im Rahmen eines unabhängigen Systemvergleichs schnitt das System bezüglich Qualität und Zuverlässigkeit der Prognose sehr gut ab, Gewinner eines Innovationspreises in Holland	Hohe Prognosequalität, Flexibilität in Bezug auf die Inputdaten, Angabe von Wahrscheinlichkeiten, Schnittstelle zu Verkehrsmanagement Systemen, Differenzierung von Lastwagen und Personwagen, hohe Automatisierung der Berechnung	Hoher Datenbedarf (Quantität und Qualität)
INRIX/anwb	Grundsätzlich positive Nutzerreaktionen, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Flächenabdeckung und Verbreitung, Ambitionen für Weiterentwicklung	Stark abnehmende Qualität der Prognosen auf dem untergeordneten Strassennetz, Geschwindigkeitsangabe für Strassennutzer wenig relevant, starke Abstützung auf historische Daten, teilweise rückläufige Verkäufe bei Navigationsgeräten (welche Datenlage beeinträchtigen können)
TRIPCAST	Positive Reaktionen der Nutzer, Zunehmende Anzahl von Drittnutzern der Prognosen, Gewinner von zwei Preisen bei Reisezeitprognose-Wettbewerben in Holland	Grosse Anzahl von Einflussfaktoren kann berücksichtigt werden, Hohe Prognosequalität, Angabe von Zuverlässigkeitsintervallen, Differenzierung Lastwagen und Personwagen	Keine speziellen Schwächen angegeben, vermutlich auch hoher Datenbedarf
TomTom	Starke Verbreitung, positive Nutzerreaktionen, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Hohe Qualität der aktuellen Verkehrslage, Verfügbarkeit/Zugriff auf FCD, Verbesserungspotential mit zunehmender Verbreitung von FCD	Keine Berücksichtigung von Wetterprognosen, Grossanlässen, Baustellen und Unfällen (nur Nutzung von historischen Daten)
OPTIMA	Zuverlässigkeit der Prognose über 90%, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Schnittstellen zu Signalsteuerungen, Schnittstelle zum Verkehrsmanagement	Wetter und Grossanlässe für Prognose nicht berücksichtigt, beschränkte Genauigkeit für das untergeordnete Strassennetz
TTVMS	Hohe Zuverlässigkeit der Reisezeiten (Mittlere Abweichungen geringer 1 Min.), Positive Nutzerreaktionen, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Einfaches System, Zuverlässigkeit, Automatisierung	Schlechte Abdeckung von Ereignissen, hoher Infrastrukturbedarf (Automatische Nummernschilderkennung), Beschränkung auf Autobahnen
iPerform	Noch keine Erfahrungen vorhanden (Pilotprojekt), es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Berücksichtigung von künftigem Wetter, Baustellen und Anlässen, Szenarienanalyse möglich (Baustellenplanung)	Datenbedarf
OLSIM	Starke Nutzung Informationsdienst, in 85% der Fälle auch in der Spitzenzeit zuverlässig, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Langjährige Erfahrung, Weiterentwicklung aufgrund der gemachten Erfahrungen, Zuverlässigkeit der Prognose, Hohe Abbildungstiefe, Berücksichtigung von Ereignissen	Datenbedarf, Geplante Betriebsübergabe benötigt Zusatzaufwand
VL Hessen	Keine Angabe von Informationen zu Erfahrungen, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Kurze Aktualisierungsintervalle	Keine Mittel- und Langfristprognosen, beschränkte Berücksichtigung von Ereignissen
MONET	Gutes Gesamtbild der Verkehrslage, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Langjährige Erfahrung, gute Prognosefähigkeit bei Ereignissen, Gesamtbild Verkehrslage, Flexibilität bezüglich der Quellen von Verkehrsdaten, Nutzung als Analyseinstrument bei Ereignissen	Keine Rückstauprognosen, Zuverlässigkeit heute zu gering als Input für Verkehrsmanagement-Massnahmen, hohe Anforderungen an die Qualität der Eingangsdaten
Google Maps	Positive Nutzerreaktionen	Verbreitung und räumliche Abdeckung	Keine Berücksichtigung von Wetterprognosen, Grossanlässen, Baustellen und Unfällen (nur Nutzung von historischen Daten), Keine Berücksichtigung des Kalendertages

- Die beiden holländischen System- bzw. eher Softwareanbieter AdaptiCast und TRIPCAST berücksichtigen auch für die Prognose zahlreiche Einflussfaktoren (Wetter, Baustellen etc.) und sind auch sehr flexibel bezüglich der Nutzung von verschiedenen Quellen von Verkehrsdaten. Mit Wahrscheinlichkeiten oder Zuverlässigkeiten lassen sich Unsicherheiten bei den Prognosewerten angeben, welche erfahrungsgemäss mit zunehmendem Prognosehorizont zunehmen. Eine weitere Stärke ist

die Angabe von differenzierten Prognosegrößen für Lastwagen und Personenwagen. Adapticon verfügt zusätzlich noch über eine Schnittstelle zum Verkehrsmanagement. Eine Schwäche beider Systeme liegt beim relativ hohen Datenbedarf, um wirklich gute Ergebnisse zu erzielen.

- Die Systeme iPerform und OLSIM sind bezüglich der Stärken und Schwächen grundsätzlich ähnlich wie AdaptiCast und TRIPCAST zu beurteilen, wobei bezüglich der Erfahrungen, Stärken und Schwächen grössere Unsicherheiten bestehen.
- Das System Capitals zeigte im Probetrieb gute Ergebnisse für Situationen ohne Störungen; jedoch waren die Ergebnisse ungenügend bei speziellen Ereignissen.
- Das System OPTIMA hat Stärken bei den Schnittstellen zum Verkehrsmanagement; auf der anderen Seite werden Prognosewerte für Anlässe, Wetter etc. nicht berücksichtigt und die Genauigkeit auf dem untergeordneten Strassennetz ist gering.
- Das System TTVMS hat Vorteile aufgrund seiner Einfachheit und Zuverlässigkeit; ist jedoch beschränkt in der Prognosefähigkeit bei Ereignissen und auch in der Anwendung auf dem untergeordneten Strassennetz. Der Infrastrukturbedarf für die Verkehrsdatenerfassung ist gross.
- Das System VL Hessen ist nur schwer zu beurteilen. Kurze Aktualisierungsintervalle stehen fehlenden Mittel- und Langzeitprognosen sowie einer beschränkten Berücksichtigung von Umfeldfaktoren bei der Prognose gegenüber.
- Das System MONET ist etabliert und ergibt einen guten Überblick über die gesamte Verkehrslage und kann auch als Analyseinstrument bei Ereignissen eingesetzt werden (z.B. Schliessung von Strassen). Es wird auch für Lärm- und Luftschadstoffanalysen für verschiedene Verkehrszustände eingesetzt. Schwächen liegen bei der Rückstauprognose und die Zuverlässigkeit der Reisezeitprognosen ist zu gering als dass sie im Rahmen eines Verkehrsmanagements angezeigt werden könnten.

Kosten und Nutzen

Über Kosten und Nutzen liessen sich nur wenige Informationen zusammentragen. Eigentliche Kosten-Nutzenanalysen wurden unseres Wissens nicht durchgeführt.

Die Kosten sind stark abhängig von der Verkehrsdatenerfassung bzw. wieviel zusätzliche Infrastruktur für die Verkehrserfassung notwendig wird. Systeme, welche alleine auf der Basis von Mobildaten arbeiten können (Bsp. TomTom, INRIX, Google) oder welche ergänzend bestehende Messstellen nutzen (zusätzlich AdaptiCast, TRIPCAST, OPTIMA, VL Hessen, MONET) haben auch Kostenvorteile, wenn bereits ein relativ dichtes Messstellennetz besteht. Systeme wie das TTVMS, das ausschliesslich auf autom. Nummernschilderkennung beruht hat hohe Infrastrukturkosten für die Verkehrserfassung zur Folge.

Nutzen und Vorteile von Stauprognosesystemen wurden folgende genannt (hier jetzt nicht systemspezifisch aufgezählt, qualitativ):

- Steigerung der Effizienz und Zuverlässigkeit durch Reisezeitgewinne für die Strassenbenutzer (Personen- und Güterverkehr)
- Steigerung der Effizienz der Strassennutzung für den Strassenbetreiber (Auslastung etc.); auch in Kombination mit Verkehrsmanagement-Massnahmen
- Für international tätige Firmen und internationale Reisen steigt der Systemnutzen mit der Flächenabdeckung des Stauprognosesystems. Das ergibt Vorteile für Systeme mit guter Flächenabdeckung.
- Nutzung des Systems für die Ermittlung von Umweltwirkungen (Emissionsberechnung für verschiedene Verkehrszustände).
- Nutzung des Systems für die Baustellenplanung; Analyse verschiedener Optionen.

Erfolgsfaktoren und Hindernisse

Aus der folgenden Tabelle gehen die wichtigsten Erfolgsfaktoren und Hindernisse für Stauprognosesysteme hervor:

Tabelle 9 Erfolgsfaktoren und Hindernisse

Erfolgsfaktoren	Hindernisse
<ul style="list-style-type: none"> • Vertiefte vorgängige Bedürfnisanalyse inkl. Anwendungszwecke • Testbetrieb mit Anpassungen aufgrund der Erfahrungen • Datenverfügbarkeit (vgl. Hindernisse) • Kooperationen mit Datenlieferanten • Glaubwürdigkeit der Datenquellen • Breit einsetzbare Lösungen (mit geringer Individualisierung) • Zunehmende Verbreitung von mobilen Verkehrsdaten (FCD, FMD) • Qualität und Belastbarkeit der Outputgrößen 	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrs-Datenverfügbarkeit und Qualität (historische Daten) • Verkehrs-Datenverfügbarkeit und Qualität (aktuelle Verkehrsdaten) • Umfeld-Datenverfügbarkeit und Qualität (Wetter, Witterung, Baustellen, Unfälle etc.) • Schwierige Erfassung der Netzkapazitäten • Investitionen/Aufwand der Softwareentwicklung mit finanziellen Risiken • Ungenügende Zahlungsbereitschaft für die Stauinformation

- Von zentraler Bedeutung ist – nicht überraschend - die Datenverfügbarkeit. Dies gilt für Verkehrs- und Umfelddaten, sowie für historische, aktuelle und künftige Daten.
- Auch von zentraler Bedeutung ist eine vorgängige vertiefte Bedürfnisanalyse sowie der Anwendungszwecke des Systems. Was soll das System können und wie soll die Qualität der Ausgabegrößen sein.
- Wichtige Erfolgsfaktoren sind ein ausreichender Testbetrieb (bei noch nicht etablierten Systemen), Kooperationen mit Datenlieferanten (z.B. für mobile Verkehrsdaten), die Glaubwürdigkeit der Datenquellen sowie die Qualität und Belastbarkeit der Outputgrößen. Breit einsetzbare Lösungen (mit geringer Individualisierung) sind für "grossen Anbieter" ein wichtiger Erfolgsfaktor.
- Neben der Datenverfügbarkeit sind als Hindernisse die schwierige Erfassung der Netzkapazitäten, die Investitionen in die Software- und Systementwicklung sowie die beschränkte Zahlungsbereitschaft für Verkehrsinformationen zu nennen.

Einsetzbarkeit/Übertragbarkeit auf die Schweiz

Grundsätzlich können sämtliche Systeme in der Schweiz eingesetzt werden. Die Systeme der grossen Anbieter sind bereits heute im Einsatz (INRIX, TomTom, Google). Das System TTVMS wäre nur dann einsetzbar, wenn erhebliche Investitionen in die Verkehrsdatenerfassung getätigt würden.

2.4 Folgerungen

Die vorgenommene Analyse des heutigen State of the Art bei Stauprognosemethoden und -systemen lässt eine Reihe von Schlussfolgerungen zu, welche nachstehend zusammengefasst sind. Zur besseren Übersicht sind die Schlussfolgerungen aufgeteilt auf Verfahren und Systeme.

2.4.1 Verfahren

In Bezug auf vorhandene wissenschaftliche Methoden zur Stauprognose lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Das Forschungsgebiet spaltet sich in die zwei praktisch disjunkten Bereiche der simulationsbasierten und der statistischen Methoden. Da die Vorgehensweise der Modellbildung bei beiden komplett unterschiedlich ist, ist es nicht weiter

verwunderlich, dass kaum Arbeiten und Methoden existieren, bei welchen beide Ansätze kombiniert werden (Hybride Methoden). In Anbetracht der Vor- und Nachteile beider Gebiete wäre aber gerade ein solches hybrides Modell am besten für die unterschiedlichen Anforderungen geeignet.

- Die wenigen existierenden Arbeiten zu hybriden Methoden zeigen, dass solche Modelle praktisch immer besser abschneiden als einzelne Methoden. Wissenschaftlich fundierte Anwendbarkeitsstudien existieren für die frei verfügbaren Lösungen DynaMIT/DynaSMART und AIMSUN.
- Eine Grosszahl an wissenschaftlichen Methoden kommt in der Praxis nicht zum Einsatz. Das erlaubt zwei mögliche Interpretationen: Entweder, dass viele Verfahren akademischer Natur sind und sich in der Praxis nicht bewährten, oder aber, dass ein grosses Potential an Verfahren verfügbar ist, aus Interessens- und/oder Zeitgründen die Verfahren aber nie zur praktischen Anwendung gelangt sind. Wir gehen von letzterem aus, da es oftmals der üblichen Praxis in der Grundlagenforschung entspricht.
- Simulationsbasierte Methoden erlauben eine beliebig feine räumliche und zeitliche Auflösung der aktuellen und prognostizierten Verkehrssituation. Die hohe Abbildungstiefe wird auf Kosten des Rechenaufwandes erkaufte. Bei Mikrosimulationen, wo jedes Fahrzeug einzeln simuliert wird, ist der Aufwand für die Prognoseberechnung nahe an der Leistungsgrenze moderner Computer. Oftmals wird daher ein hybrider Ansatz verwendet, wo Teile des Verkehrs als Mikrosimulation und andere meso- oder makroskopisch behandelt werden. Das numerische Problem ist dann mit heutiger Hardware bewältigbar. Das wird auch durch die Tatsache gezeigt, dass rund die Hälfte aller analysierten Systeme simulationsbasierend ist.
- Simulationsbasierende Ansätze können die Dynamik des Verkehrs zwar sehr gut nachbilden, verlagern aber das Problem auf die Kalibrierung der Daten. Insbesondere steht und fällt eine Simulation mit der Schätzung der OD-Matrix oder ähnlicher Inflow/Outflow-Grössen. Diese können aus gemessenen Daten durch statistische Analysen teilweise rekonstruiert werden. Es scheint, als ob ein Schwerpunkt der simulationsunterstützten Stauprognoseforschung die Modellierung dieser Daten ist, während die Modellierung der Kernmethode (Fahrverhalten, Flussdynamik) je länger je mehr in den Hintergrund rückt.
- Ein offener Punkt bei simulationsbasierten Methoden ist die Einbindung externer Grössen wie z.B. Wetter, während Spezialanlässe durch angepasste OD-Matrizen grundsätzlich leicht zu modellieren sind.
- Die je länger je mehr verfügbaren Floating car data haben deutlich zur Qualitätssteigerung der Prognosen beigetragen. Ausschlaggebend dafür dürfte sein, dass es sich dabei um Daten mit dynamischem Charakter handelt, welche im Gegensatz zu Loop-Detektoren eine Einbeziehung der Verkehrsdynamik in ein Modell deutlich vereinfachen. Dies spielt insbesondere für die Prognosequalität von statistischen Modellen eine grosse Rolle.
- Statistische Verfahren benötigen im Allgemeinen einen moderaten Rechenbedarf und die Kalibrierung an bestehende Daten ist – zumindest konzeptionell – einfacher als bei Simulationen. Da kein physikalisches Modell als Grundlage verwendet wird, enthalten statistische Modelle im Allgemeinen keine Beschreibung der Verkehrsdynamik. Vorteil ist dafür, dass die Einbindung externer, zusätzlicher Grössen wie z.B. Wetter relativ einfach möglich ist. Ebenso ist eine Kombination unterschiedlicher Methoden wesentlich einfacher als bei simulationsbasierenden Verfahren.
- Statistische Methoden erlauben grundsätzlich einen längeren Vorhersagehorizont. Die Prognosequalität sinkt natürlich, statistische Methoden erlauben aber die Angabe einer Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen der Vorhersage.
- Unter den zahlreichen statistischen Ansätzen dürfte u.a. ARIMA in Kombination mit anderen statistischen Modellen Potential bieten, sowie die Bayesian-Ansätze, welche u.a. auch von INRIX verwendet werden.
- Ein Problem vieler Methoden ist der Umgang mit fehlenden Daten (z.B. bei Detektorausfall). Hier überzeugt die Bayesian-Methode ebenfalls. Sie wird zunehmend für das Preprocessing der Messdaten eingesetzt.
- Grundsätzlich alle Verfahren können auf den Fall Schweiz und das Autobahnnetz angewendet werden. Die Tatsache, dass es sich beim Autobahnnetz um ein nicht-

abgeschlossenes System (im physikalischen Sinn) handelt, dürfte sich nicht als problematisch herausstellen: Das Abschätzen der unbekanntenen Zu- und Abflüsse ist sowohl bei simulations- als auch statistikbasierten Methoden ein zentraler Bestandteil der Kalibrationsphase. Eine solche Abschätzung ist immer nötig, da jedes länderbegrenzte Stauprognosesystem aufgrund der Zu- und Abflüsse über die Landesgrenzen als offenes physikalisches System behandelt werden muss.

2.4.2 Systeme

Wichtige Folgerungen in Bezug auf Stauprognosesysteme:

- Heute mangelt es nicht an den potenziellen Möglichkeiten der Systeme, sondern an der Kenntnis und Erfahrung darüber, welches Prognoseverfahren bei welcher Datenlage und für welchen Anwendungszweck wieviel Aufwand bedeutet und welche Prognosequalität erreicht.
- Punkto Aufwand wird von den Anbietern nur vereinzelt darauf hingewiesen, welche Voraussetzungen ihre Systeme hinsichtlich Netzkodierung und Kalibrierung erfordern. Bei der Netzkodierung geht es darum, dass die Streckenabschnitte, auf die das Prognoseverfahren angewendet wird, einerseits der Logik des Verfahrens und andererseits den vorhandenen Datenquellen angepasst ist. Bei der Kalibrierung geht es darum, die statistischen oder Simulationsalgorithmen je nach Verfahren mit den netz- und abschnittsspezifischen Gewichtungen zu versehen. Es ist für die hier analysierten Systeme nicht bekannt, wieviel Aufwand für die einzelnen Anwendungsfälle in Kodierung und Kalibrierung geflossen ist. Die folgende Illustration soll zeigen, dass die Prognosequalität aus dem passenden Zusammenspiel der verschiedenen Aspekte entsteht.



Abbildung 9 Prognosequalität und Einfluss-Aspekte

- Die heutigen Stauprognosesysteme nutzen statistische, simulationsunterstützte oder kombinierte Verfahren. Simulationsbezogene Ansätze haben eher den Vorteil, dass sie eine hohe Abbildungstiefe haben und auch Verkehrsbelastungen und Staulängen darstellen können. Statistische Ansätze haben den Vorteil, dass mehr Einflussgrößen berücksichtigt werden können und dass Zuverlässigkeiten und/oder Wahrscheinlichkeiten für die Prognosegrößen angegeben werden können. Mit kombinierten Ansätzen lassen sich vermutlich die Vorteile kombinieren; die Komplexität und der Rechenaufwand dürften jedoch auch stark zunehmen.
- Es ist ein grosser Unterschied, ob ein Stauprognosesystem nur für die Verkehrsinformation oder auch für das Verkehrsmanagement eingesetzt wird. Die Anforderungen an die Ausgestaltung und die Qualität der Outputgrößen steigen bei einer Nutzung für das Verkehrsmanagement stark an. Nur einzelne Stauprognosesysteme werden heute neben der reinen Verkehrsinformation auch für das Verkehrsmanagement genutzt. Es sind dies individuelle Lösungen oder Softwareprodukte von kleineren Anbietern.
- Die „grossen Anbieter“ von Stauprognosesystemen verfügen über Standardprodukte, die weit verbreitet sind und die aktuelle Verkehrslage gut abdecken. Im Vordergrund steht die Verkehrsinformation und nicht die Nutzung für ein Verkehrsmanagement.

Defizite bestehen jedoch bei der Prognosefähigkeit und in der Anpassungsfähigkeit an spezifische lokale Rahmenbedingungen in der Schweiz. Die verwendeten Prognoseverfahren und –methoden und die berücksichtigten Einflussgrößen für die Prognosen sind eine „Black Box“. Diese Anbieter versuchen sich über ihre Marktmacht und die mobilen Verkehrsdaten unentbehrlich zu machen.

- Die „kleinen Anbieter“ stellen mehr ein wissenschaftlich abgesichertes und hoch qualitatives Prognoseverfahren in den Vordergrund, welches eine gute Übereinstimmung von Prognosewerten mit effektiven Messwerten erreicht. Eine Berücksichtigung von speziellen lokalen Rahmenbedingungen scheint eher gegeben. Aufgrund der eher besseren Qualität der Prognosegrößen erscheint auch eine Nutzung dieser Systeme für das Verkehrsmanagement erfolgversprechender. Eine abschliessende Beurteilung kann hier jedoch noch nicht erfolgen.
- Die meisten der untersuchten Stauprognosesysteme nutzen Verkehrsdaten aus verschiedenen Quellen. Aufgrund der Entwicklungen bezüglich Verkehrsdatenerfassungstechnologien und der zahlreichen verschiedenen Datenquellen müssen Stauprognosesysteme sehr flexibel sein in der Nutzung verschiedener Verkehrsdaten. Dies gilt grundsätzlich auch bezüglich der Umfelddaten (Wetter, Baustellen, Anlässe etc.).
- Die untersuchten Stauprognosesysteme liefern unterschiedliche Outputgrößen in unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Die meisten liefern als zentrale Grundgrößen Verkehrszustände und Reisezeiten. Nur wenige liefern auch noch Reisegeschwindigkeiten und insbesondere Staulängen.
- Die untersuchten Stauprognosesysteme liefern Prognosen für verschiedene Prognosehorizonte und nutzen für die Prognosen auch in unterschiedlichem Ausmass historische, aktuelle und „künftige“ Daten. Für die Auslegung des Systems ist es entscheidend, welche Prognosehorizonte für welche Anwendungszwecke Priorität haben.

2.5 Forschungsbedarf

Basierend auf den Ergebnissen des AP1 leitet sich folgender Forschungsbedarf ab:

- Wichtig ist eine saubere Bedürfnisanalyse (vgl. Kap. 3). Darin müssen insbesondere nochmals die Anwendungszwecke, die Outputgrößen und deren Qualität nach Nutzergruppen und die Netzabdeckung behandelt und priorisiert werden.
- Ein direkter Vergleich zwischen verschiedenen Prognosemethoden basierend auf vergleichbaren Ausgangsdaten existiert leider nicht. Aus dem State of the Art der Methoden lässt sich nicht abschliessend beurteilen, welche Methode das grösste Potential für die Anwendbarkeit in der Schweiz hat.
- Die Zuverlässigkeit der Daten (fehlende Daten, Störungen, Rauschen etc.) bilden einen Faktor, der grosse Auswirkung auf die Prognosequalität hat, jedoch oft nicht Gegenstand genauere wissenschaftlicher Untersuchungen ist.
- Die Datenverfügbarkeit ist generell ein zentraler Aspekt für ein Stauprognosesystem. Für die Evaluation der Prognoseverfahren müssen frühzeitig allfällige Randbedingungen aus der Datenverfügbarkeit berücksichtigt werden. Nach Abschluss der Bedürfnisanalyse sollte sich erweisen, ob die Systeme der grossen Anbieter noch eine Option sein könnten. Sollte dies der Fall sein, müssten unabhängige Systemvergleiche ins Auge gefasst werden.

Ein hybrides Modell vereint die Vor- und Nachteile verschiedener Verfahren. Eine unseres Wissens noch unbekannt aber konzeptionell einfache Möglichkeit bestünde darin, mittels offline-Simulationen künstlich Daten zu erzeugen, indem möglichst viele Szenarien simuliert werden. Das erlaubt dem statistischen Prognosemodell eine bessere Vorhersage, da eine grössere Datenlage vorhanden ist.

3 Bedürfnisanalyse: Anforderungen an Stauprognosesysteme

3.1 Einleitung

3.1.1 Ziel und Zweck der Bedürfnisanalyse

Das Arbeitspaket 2 hatte zum Ziel, die Bedürfnisse und Anforderungen bez. Stauprognoseverfahren und –systeme für die verschiedenen Nutzergruppen zu identifizieren und zu gewichten. Diese bilden in den späteren Arbeitspaketen eine wichtige Grundlage für die Entwicklung und Bewertung des Stauprognosesystems.

Die Analyse der Stauprognosesysteme hat gezeigt (vgl. Kapitel 2.4), dass erhebliche Unterschiede in Bezug auf Anwendungszweck, Netzabdeckung, Prognoseverfahren sowie Input- und Outputgrößen bestehen. Es ist deshalb von zentraler Bedeutung für die wichtigsten Nutzerkategorien (Strassenbenutzer, Strassennetzbetreiber) eine vertiefte Bedürfnisanalyse durchzuführen. Aufgrund der unterschiedlichen zu erwartenden Bedürfnisse der verschiedenen Nutzergruppen müssen diese gewichtet bzw. priorisiert werden.

Die Bedürfnisanalyse soll einen Beitrag dazu leisten, die spezifischen Anforderungen an ein Schweizerisches Stauprognosesystem zu formulieren und festzulegen.

3.1.2 Vorgehen und Methodik

Die Bedürfnisanalyse umfasste folgende Arbeitsschritte:

- **Identifizierung und Kategorisierung der Nutzergruppen** gestützt auf das Wissen und die Erfahrungen der Forschungsstelle in Abstimmung mit dem Auftraggeber und der Begleitkommission.
- **Erstellung eines (nutzergruppenspezifischen) Interviewleitfadens:** Mittels Experteninterviews ist es möglich, die wichtigsten Bedürfnisse zu erfassen. Dabei stehen qualitative Aussagen pro Nutzergruppe im Vordergrund; eine Quantifizierung ist sekundär. Leitfadeninterviews zeichnen sich dadurch aus, dass sie neben standardisierten Fragen auch narrative, nicht vorstrukturierte Phasen aufweisen. Dies ermöglicht, das Wissen und die Einschätzungen der Befragten optimal zu erfassen. Die Befragten sind dabei in unserem Fall immer auch als Experten ihres spezifischen Tätigkeitsfeldes zu verstehen, die Interviews hatten daher immer auch eine explorative Funktion. Die Offenheit der Befragung räumte den Befragten weitgehende Artikulationschancen ein und ermöglichte es ihnen, eigene Situationsdeutungen, Einschätzungen und Erfahrungen zu äussern. In unserem Fall war darüber hinaus bedeutsam, dass durch die Interviewsituation die Betroffenen zu Beteiligten des Forschungsprozesses werden. Dies ist im Hinblick auf eine spätere Umsetzung eines Stauprognosesystems durch eben diese Akteure sowie die Akzeptanz bei den Betroffenen von grosser Bedeutung. Schriftliche und internetbasierte Befragungen haben sich für solche Zwecke wegen der hohen Belastung der Beteiligten im Tagesgeschäft weniger bewährt.
- **Identifizierung und Auswahl der Interviewpartner, Orientierung der gewünschten Interviewpartner.** Für die wichtigsten Nutzergruppen wurden Institutionen und Personen identifiziert. Dazu gehörten auch Mitglieder der Begleitkommission.
- **Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Interviews.** Die Zielpersonen wurden angefragt und der Interviewleitfaden 7 bis 14 Tage vor dem Interviewtermin zur Vorbereitung verschickt. Die Interviewdauer betrug in der Regel ca. 60 bis 90 Minuten.
- **Gewichtung und Einschätzung der Bedürfnisse:** Eine Gewichtung muss insbesondere die Sicht des späteren Systemnutzers bzw. –betreibers sowie der Strassenbenutzer berücksichtigen. Aufgrund der unterschiedlichen erwarteten Bedürfnisse müssen diese gewichtet werden. Die gemäss Forschungsgesuch ursprüngliche Absicht einen Expertenworkshop durchzuführen, wurde in Absprache mit dem Auftraggeber fallengelassen. Die Forschungsstelle stellte alternativ aufgrund

der Interviewergebnisse einen Bedürfniskatalog zusammen mit einem Vorschlag für die Gewichtung. Dieser wurde dem ASTRA anfangs April 2012 zur Stellungnahme vorgelegt und später in der Begleitkommissionssitzung vom 24. April 2012 diskutiert.

- **Ableitung der Anforderungen an ein Stauprognosesystem** aus der Bedürfnisanalyse als Grundlage für die Systemkonzeption. Die Systemanforderungen sind teilweise jedoch auch abhängig von Ergebnissen von späteren Arbeitsschritten in den Arbeitspaketen 3 Evaluation Prognoseverfahren, 4 Datenbedarf und Prognosevariablen und 5 Datenverfügbarkeit und Bereitstellung. Die Systemanforderungen mussten deshalb später aufgrund der neuen Erkenntnisse bereinigt und ergänzt werden.
- **Diskussion** und Verabschiedung der Bedürfnisse und der Anforderungen in der Begleitkommissionssitzung vom 24. April 2012.

3.2 Nutzergruppen und Interviewleitfaden

3.2.1 Nutzerkategorien

Folgende drei Hauptkategorien wurden als Nutzergruppen für ein Stauprognosesystem identifiziert:

- Strassenbenützer
- Strassenbetreiber
- Weitere Dienstleister

Bei den Strassenbenützern wurden folgende wichtigsten Kategorien und Unterkategorien unterschieden (ohne Anspruch auf Vollständigkeit auf der Ebene der Unterkategorien):

Tabelle 10 Nutzerkategorien für Stauprognosesysteme (Strassenbenützer)

Kategorie	Unterkategorien
Privatpersonen	Pendlerverkehr Einkaufsverkehr Freizeit- und Tourismusverkehr
Unternehmen	Geschäftsverkehr von Handels- und Industrieunternehmen (ohne Warentransport) Logistikunternehmen (Warentransport) Transportunternehmen (Warentransport) Verlader (Warentransport im Werkverkehr)
Ereignisdienste	Polizei (Kantonal, Städtisch) Sanität Feuerwehr Militär Pannendienste Private Wartungs- und Notfalldienste (z.B. Lifthersteller)
Öffentliche Dienste	Busunternehmen Tram- und Bahnunternehmen (indirekte Betroffenheit) Abfallsammlung und -entsorgung Strassenreinigung Winterdienst
Private Dienste	Taxi Flughäfen/Fluggesellschaften (indirekte Betroffenheit) Airport-Shuttles

Die Strassenbenützer umfassen eine breite Palette von Privatpersonen, Unternehmen, Ereignisdiensten sowie öffentlichen und privaten Diensten, welche grundsätzlich an Stauprognoseinformationen interessiert sein können.

Für diese Strassenbenützerkategorien bestehen Unterschiede in der Bedeutung der Zu-

verlässigkeit/Pünktlichkeit für das Eintreffen an einem Ziel bzw. der Empfindlichkeit auf Zeitverluste durch Stau. Insbesondere für Unternehmen (Warentransport, Geschäftsverkehr) und Ereignisdienste ist eine hohe Zuverlässigkeit und Effizienz der Fahrten wichtig. Aber auch Privatpersonen, öffentliche und private Dienste sind an einer reibungslosen Fahrt bzw. einem reibungslosen Transport interessiert. Unterschiede bestehen auch bezüglich der Flexibilität in der Wahl des Abfahrtszeitpunktes, in der Wahl der Route, in der Wahl des Verkehrsmittels und in der Zielwahl. Zum Beispiel ist diese Flexibilität im Freizeitverkehr deutlich grösser als im Pendlerverkehr.

In Abhängigkeit der Kenntnis der Verkehrssituation (z.B. Pendlerverkehr oder Freizeitverkehr) gibt es auch Unterschiede im Bedarf nach Stauprognoseinformationen. Je grösser die Ungewissheit über die Verkehrslage desto grösser auch das Interesse an Stauprognoseinformationen.

Die zahlenmässig grösste Bedeutung haben Privatpersonen gefolgt von den Unternehmen, öffentlichen Diensten, privaten Diensten und Ereignisdiensten.

Bei den Strassenbetreibern wurden entsprechend der Aufgaben folgende Kategorien und Unterkategorien unterschieden:

Tabelle 11 Nutzerkategorien für Stauprognosesysteme (Strassenbetreiber)

Kategorie	Unterkategorien
Bundesamt für Strassen	Verkehrsmonitoring Verkehrsmanagement Verkehrsmanagementzentrale Schweiz Strassenplanung Strassenbau Strassenunterhalt
Kantonale Tiefbauämter	Verkehrsmonitoring Verkehrsmanagement Verkehrsmanagementzentralen Strassenplanung Strassenbau Strassenunterhalt
Städtische Tiefbauämter	Verkehrsmonitoring Verkehrsmanagement Verkehrsmanagementzentralen Strassenplanung Strassenbau Strassenunterhalt
Private Institutionen welche im Auftrag der öffentlichen Hand Strassennetze betreiben (Nationalstrassen Nordwestschweiz)	Verkehrsmonitoring Verkehrsmanagement Strassenplanung Strassenbau Strassenunterhalt

Unter **Verkehrsmonitoring** versteht man alle Arten der Erfassung von Zuständen, eines Vorgangs oder Prozesses des Verkehrsgeschehens mittels technischer Hilfsmittel oder anderer Beobachtungssysteme ([ASTRA, 2005]). Für den Begriff Monitoring sind folgende Inhalte vorhanden:

- Beobachtung: die Erfassung eines Zustandes (observation monitoring)
- Überwachung: die verschärfte, besondere Beobachtung eines potenziell / tatsächlich gefährlichen Objektes / Sachverhalts (detection monitoring)
- Kontrolle des Vergleichs zwischen Ist-Zustand einer Sache und deren Soll-Zustand (control monitoring)

Kenngrossen des Verkehrsgeschehens sind neben Ist-Grössen (Verkehrsaufkommen,

Verkehrszusammensetzung, Fahrgeschwindigkeiten, Stautunden, Lärmemissionen, Luftschadstoffemissionen etc.) auch Prognosewerte.

Unter **Verkehrsmanagement** versteht man die Gesamtheit aller Massnahmen planerischer, technischer, organisatorischer und rechtlicher Art, die räumlich und zeitlich geeignet sind, den gesamten Verkehrsablauf für Benutzer, Betreiber und Betroffene optimal zu gestalten. Es werden folgende 4 Elemente unterschieden (www.astra.admin.ch):

- Die **Verkehrslenkung** kommt zum Zug, wenn temporäre Engpässe oder Hindernisse bestehen und der Verkehr umgeleitet werden muss.
- Die **Verkehrsleitung** wird nötig, wenn auf einer Strecke der gleichmässige Verkehrsfluss gewährleistet werden soll.
- Die **Verkehrssteuerung** wird vor allem bei den Knoten des Nationalstrassennetzes angewendet. Zur Gewährleistung des gleichmässigen und sicheren Verkehrsflusses können Zu- und Wegfahrt auf einen Nationalstrassen-Ast eingeschränkt bzw. dosiert werden.
- Die **Verkehrsinformation** setzt die Verkehrsteilnehmenden frühzeitig über bestehende Engpässe, Hindernisse oder Staus ins Bild. Sie sind so in der Lage, Reisezeit, Route, Tagesziel oder Verkehrsmittel so zu wählen, dass sie ihr Ziel zuverlässig erreichen.

Beim Verkehrsmanagement wird zudem zwischen strategischem, taktischem und operativem Verkehrsmanagement unterschieden. Beim strategischen Verkehrsmanagement steht die verkehrliche Planung von Verkehrsmanagementmassnahmen zur optimalen Nutzung des Gesamtsystems im Vordergrund (Mobilitätsmanagement, Nachfragebeeinflussung, Vernetzung Betriebssysteme etc.). Darin sind auch die Leit- und Grundsätze für das Verkehrsmanagement enthalten. Beim taktischen Verkehrsmanagement geht es um die optimale Nutzung von Teilsystemen. Beim operativen Verkehrsmanagement geht es um die optimale Gestaltung von Abläufen im Netz. Es muss zeitnah – manuell und insbesondere auch automatisiert - auf bekannte aber auch auf nicht vorhersehbare Ereignisse reagiert werden können.

Die **Verkehrsmanagementzentrale Schweiz** ist für die verkehrsbeeinflussenden Massnahmen auf dem Schweiz weiten Netz der Nationalstrassen verantwortlich. Die VMZ-CH umfasst die notwendigen technischen Einrichtungen (Arbeitsplätze, Darstellungsgeräte, Rechner, Datenspeicher sowie einen Anschluss an den VDV-CH). Verkehrsmanagementzentralen können auch für die Steuerung und Lenkung des regionalen und lokalen Verkehrs betrieben werden.

Die **Strassenplanung** umfasst die mittel- und langfristige Planung für den Aus- und Neubau von Strassenverbindungen.

Der **Strassenbau** umfasst die Erstellung neuer Strassen und die Sanierung von bestehenden Strassen.

Der **Strassenunterhalt** umfasst die Strassenreinigung, den Winterdienst und kleinere Reparaturen an bestehenden Strassen.

Bei den weiteren Dienstleistern wurden die Verkehrsinformationsdienstleister (wie ViaSuisse), Routenplanungssystemdienstleister (TomTom, Inrix, Google, Twixroute etc.) und Tourismusdienstleister (Carreiseunternehmen, Tourismusorganisationen, Veranstalter von Anlässen, Hotels etc.) als wichtigste Kategorien identifiziert.

3.2.2 Interviewleitfaden

Für die beiden Hauptnutzergruppen „Strassenbenutzer“ und „Strassenbetreiber“ wurde ein Interviewleitfaden erstellt. Während dem sich der Leitfaden für die Strassenbenutzer auf den Output und generelle Anforderungen von Stauprognosesystemen beschränkte, enthielt der Interviewleitfaden für die Strassenbetreiber auch Fragen zum Input (Eingangsgrossen) und zu Schnittstellen zu anderen Systemen (insbesondere Verkehrsmanagement). Die Struktur des Interviewleitfadens geht aus der Tabelle 12 hervor.

Tabelle 12 Struktur des Interviewleitfadens

Teil	Themen	Strassenbenützer	Strassenbetreiber
I: Output (Ergebnisse aus einem Stauprognosesystem)	Output Kenngrössen aus dem Stauprognose-system Differenzierung der Kenngrössen aus dem Stauprognosesystem (Zeit, Raum, Fahrzeugklassen etc.) Aktualisierung (Zeitintervall) Qualität/Zuverlässigkeit der ausgegebenen Kenngrössen Darstellung des Outputs Verbreitung des Outputs	X	X
II: Input (Eingangsgrössen für eine Stauprognosesystem)	Einflussgrössen für die Stauprognose Verkehrsdaten Umfelddaten (Wetter, Unfälle etc.)		X
III: System (für die Ermittlung von Stauprognosen)	Bedürfnisse bezüglich Schnittstellen zu bestehenden/geplanten Systemen Weitere Bedürfnisse bezüglich System		X
IV: Weiteres	Weitere Aspekte/Anforderungen	X	X

Ein grosser Teil der Fragen enthielt vorgegebene Antwortmöglichkeiten, wobei die interviewten Personen auch immer eigene Antworten einbringen konnten. Ein weiterer Teil der Fragen wurde offen gestellt um die Vielfalt der Antworten zu gewährleisten und Themen über die Fragen hinaus anzusprechen.

Die vollständigen Interviewleitfäden mit Detailfragen gehen aus dem Anhang II.1 und 2 hervor. Die Inhalte der Interviewleitfäden wurden anfangs 2012 mit dem Auftraggeber und der Begleitkommission bereinigt.

3.2.3 Durchgeführte Interviews

Mit folgenden Personen wurden Interviews durchgeführt:

Tabelle 13 Durchgeführte Interviews

Name	Firma/Bereich	Datum Interview	Strassenbenützer	Strassenbetreiber
N. Bischofberger	Kanton Zürich, Amt für Verkehr, Strategisches Verkehrsmanagement	1.3.2012		X
P. Keller	Tiefbauamt Kt. Aargau, Strassenbau	1.3.2012		X
D. Studer	Tiefbauamt Kt. Aargau, Strassenunterhalt	1.3.2012		X
M. Brunner	ASTAG/Betriebswirtschaft/Technik/Umwelt/Grundlagen	5.3.2012	X	
F. Zurbriggen	TCS/Content Management	7.3.2012	X	
P. Rohner	Schutz & Rettung Zürich, Einsatzzentrale, Qualitätssicherung Einsatzzentralen	7.3.2012	X	
H. K., Schiesser	VöV, Verkehrspolitik	9.3.2012	X	
T. Schwarzenbach	SPEDLOGSWISS, Geschäftsleiter DHL Freight, Domestic Network Manager	9.3.2012	X	

Bruno Kuoni				
F. Rüede A. Wagner G. Finné	Kanton Aargau, Verkehrsplanung/Strategische VM Kanton Aargau, Verkehrsmanagement Kanton Aargau, Verkehrsmonitoring/-modellierung	12.3.2012		X
J. L. Poffet	ASTRA, Bereichsleiter Netzplanung	13.3.2012		X
M. Bögli	Viasuisse, Direktor	14.3.2012	X	
Marc Wijnhoff	ASTRA, Leiter Verkehrsmanagement-zentrale Schweiz	14.3.2012		X
P. Julia	ASTRA, Bereichsleiter Betrieb und Erhaltungsplanung	29.3.2012		X
H. Suter	ASTRA, Bereichsleiter Verkehrsmanagement	29.3.2012		X
R. Hardmeier	Verkehrsleitzentrale Kanton Zürich	13.4.2012		X
C. Heimgartner	Dienstabteilung Verkehr Stadt Zürich, Chef Modellierung und Simulation	25.05.2012		X

Sechs Interviews wurden mit Strassenbenützern und zehn Interviews mit Strassenbetreibern durchgeführt. Mit den durchgeführten Interviews werden die wichtigsten Nutzergruppen abgedeckt (Privatpersonen, Unternehmen, Ämter auf Bundesebene und kantonalen Ebene).

Bei den Strassenbenützern ist der Güterverkehr bzw. der Warentransport (2 Interviews ASTAG, SPEDLOGSWISS/DHL) gegenüber dem Personenverkehr (4 Interviews) untervertreten.

Bei den Strassenbetreibern überwiegen Interviews mit Vertretern des ASTRA (4 Interviews) und von Tiefbau-/Verkehrsämtern der Kantone (5 Interviews) gegenüber Interviews mit städtischen Vertretern (1 Interview). Dies ist vertretbar da vom Forschungsgegenstand her das übergeordnete Strassennetz im Vordergrund steht.

Die Interviews wurden durch Mitarbeiter von Rapp Trans AG (Thorsten Koy, Martin Ruesch, Philipp Hegi) durchgeführt. Das Interesse und die Bereitschaft zur Teilnahme an den Interviews waren bei allen interviewten Personen gross. Stauprognosesysteme sind ein wichtiges Thema für die Strassenbenutzer bzw. deren Vertreterorganisationen und auch für die Strassenbetreiber.

3.3 Bedürfnisse in Bezug auf Stauprognosesysteme

3.3.1 Vorbemerkungen zu Interviewergebnissen

- Die Fragen wurden von den Interviewten weitgehend vollständig beantwortet und bei Bedarf auch mit Begründungen untermauert. Die Qualität und Aussagekraft der Antworten ist hoch.
- Aus rein statistischer Sicht sind die Interviewergebnisse nicht repräsentativ, ergeben jedoch ein gutes Gesamtbild für die beiden Nutzergruppen Strassenbenutzer und Strassenbetreiber.
- Wo sinnvoll, wurden die Ergebnisse nach Strassenbenutzer und Strassenbetreiber differenziert um die unterschiedlichen Sichtweisen hervorzuheben. Da mehr Strassenbetreiber als Strassenbenutzer befragt wurden, wurde anstelle der absoluten Anzahl Nennungen die relative Anzahl Nennungen ermittelt.
- Ein Teil der Fragen, welcher nur für die Strassenbetreiber bestimmt waren (Teil Input, System) wurde aus Gründen des Interesses und der Betroffenheit vereinzelt auch von Strassenbenützern beantwortet. Dies betrifft 3 Befragte bei Frage 11 und ein Befragter

bei Frage 12. Ihre Antworten wurden in der quantitativen Auswertung nicht speziell berücksichtigt.

- Aus Datenschutzgründen wurden die Auswertungen nur in anonymisierter Form dargestellt. Damit sind keine Rückschlüsse auf einzelne Personen möglich.
- Fragen, bei welchen eine Rangfolge nach Wichtigkeit erforderlich war, wurde diese mittels zweier Methoden ermittelt. Bei der „intuitiven“ Methode war das erste Kriterium die %-Zahl der Nennungen. Das zweite Kriterium war die Anzahl Nennungen als 1. Rang. Bei der „Indikatormethode“ wurden die Ränge in einen Wert W umgewandelt (1 wird 5, 2 wird 4 etc., das heisst $W=6 - \text{Rang}$). Anschliessend wurde die Summe der W-Werte für eine gegebene Antwort berechnet. Der Indikator I (eine Art Zielerreichungsgrad) ergibt sich durch die Division der Summe der W-Werte durch die maximal erreichbare Punktzahl ($=n*5$): $I = \frac{\sum W}{(n*5)}$, wobei $W=6 - \text{Rang}$, $n=\text{Anzahl Befragte}$. Wenn alle der Befragten eine gegebene Antwort als 1. Priorität einstufen, ergibt sich ein Indikator von 100%
- Die Ergebnisse werden teilweise stark vom befragten Sample bzw. der Tätigkeit und den Interessen der Befragten beeinflusst. Bei den Antworten ist dies immer zu berücksichtigen. Nachfolgend sind die wichtigsten Nutzergruppen und ihre Hauptinteressen zusammengefasst.

Tabelle 14 Charakterisierung der interviewten Nutzergruppen

Wichtigste Nutzergruppen	Anzahl Interviews	Haupt-Anwendungs-interessen	Räumlicher Fokus	Fristigkeit der Tätigkeit
Verbände Personenverkehr/Privatpersonen/Verkehrsinformationsdienstleister	2	Verkehrsinformation, Reise- und Routenplanung	National/International	Kurz bis Mittelfristig
Verbände Güterverkehr/Unternehmen	3	Verkehrsinformation, Reise- und Routenplanung	National/International	Kurz bis Mittelfristig
Ereignisdienste	1	Verkehrsinformation/Reise- und Routenplanung	Regional/Lokal	Kurzfristig
Strategische Planung Verkehr/Verkehrsmanagement	3	Verkehrsmanagement, Verkehrsinformation, Verkehrsmonitoring	National und Regional	Kurz- bis langfristig
Strategische Planung Strassen/Bau/Unterhalt	3	Strassennetzplanung, Bau-stellen-/Unterhaltsplanung	National und Regional	Mittel- bis langfristig
Operativer Betrieb von Strassen	4	Verkehrsmanagement, Verkehrsinformation	National und Regional, städtisch	Kurzfristig

3.3.2 Output

Der erste Teil der Fragen betraf die gewünschten Ergebnisse aus einem Stauprognose-system.

Anwendungszwecke von Stauprognosesystemen

Frage 1: Für welche Anwendungszwecke würden Sie Resultate aus Stauprognosesystemen nutzen? (Mehrfachnennungen möglich)

Bei mehreren Anwendungszwecken: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit? (Rang 1=wichtigste)

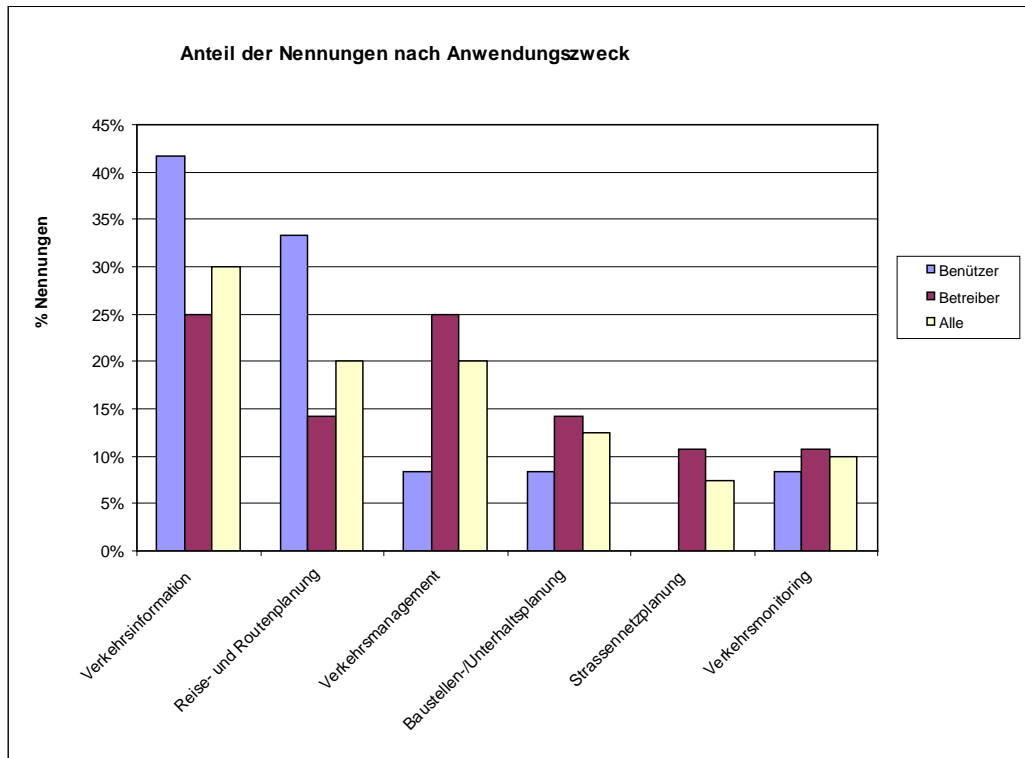


Abbildung 10 Anwendungszweck von Stauprognosesystemen

Das Ergebnis der Auswertung kann wie folgt interpretiert werden:

- Die genannten Anwendungszwecke korrelieren erwartungsgemäss mit den Tätigkeitsbereichen der Befragten. Als weitere Anwendungszwecke wurden noch der betriebliche Unterhalt (Tagesbaustellen), der kleine bauliche Unterhalt sowie das Flottenmanagement (entspricht Reise- und Routenplanung) und die Eichung von Verkehrsmodellen erwähnt.
- Die Verkehrsinformation (hier im Sinne einer Stauprognoseinformation) erscheint über alle Interviewten der wichtigste Anwendungszweck, gefolgt von der Reise- und Routenplanung und dem Verkehrsmanagement. Die weiteren Anwendungszwecke werden weniger genannt; dies auch weil im Sample weniger Personen mit mittel- und langfristigen Tätigkeiten befragt wurden. Beim Verkehrsmonitoring ist auch das Staumonitoring eingeschlossen. Die hohe Gewichtung der Verkehrsinformation im Vergleich zu den anderen Anwendungszwecken, kann auch damit zusammenhängen, dass die Befragten nicht nur die Stauprognoseinformation sondern insbesondere auch die momentane Verkehrslage und Stausituation darunter verstanden.
- Für die Strassenbenützer stehen die Verkehrsinformation und die Reise- und Routenplanung als Anwendungszwecke eindeutig im Vordergrund. Die übrigen Anwendungszwecke werden nur noch von einzelnen Personen genannt. Die Rangfolge nach Wichtigkeit ist: 1. Verkehrsinformation 2. Reise- und Routenplanung 3. Verkehrsmonitoring 4. Baustellen-/Unterhaltsplanung 5. Verkehrsmanagement.
- Für die Strassenbetreiber stehen die Verkehrsinformation und das Verkehrsmanagement als Anwendungszwecke im Vordergrund, aber auch die Reise- und Routenplanung sowie die Baustellen-/Unterhaltsplanung und das Verkehrsmonitoring werden noch von mehreren Personen genannt. Die Strassennetzplanung erscheint als Anwendungszweck deutlich weniger wichtig. Auch hier muss erwähnt werden, dass Personen mit mittel- und langfristigen Tätigkeiten im Sample untervertreten waren. Die Strassenplanung erfolgt eher aufgrund von langfristigen Verkehrsprognosen unter Berücksichtigung von strukturellen Entwicklungen. Die Rangfolge nach Wichtigkeit ist: 1. Verkehrsmanagement 2. Verkehrsinformation 3. Baustellen- und Unterhaltsplanung 4. Reise- und Routenplanung 5. Verkehrsmonitoring 6. Strassennetzplanung.

Frage 2: Welche Kenngrößen aus Stauprognosesystemen benötigen Sie für ihre bevorzugten Anwendungszwecke?

Bei mehreren Kenngrößen: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit für die verschiedenen Anwendungszwecke? (1=wichtigste)

Eine Auswertung erfolgte je für die drei wichtigsten Anwendungszwecke. Die Unterschiede beim Bedarf an Kenngrößen nach Anwendungszwecken sind insgesamt gering.

Als ergänzende wichtige Kenngrößen wurden die Staudauer, die Stauhäufigkeit und Stauzeiten (im Sinne von Tagesstunden) genannt (unter Andere).

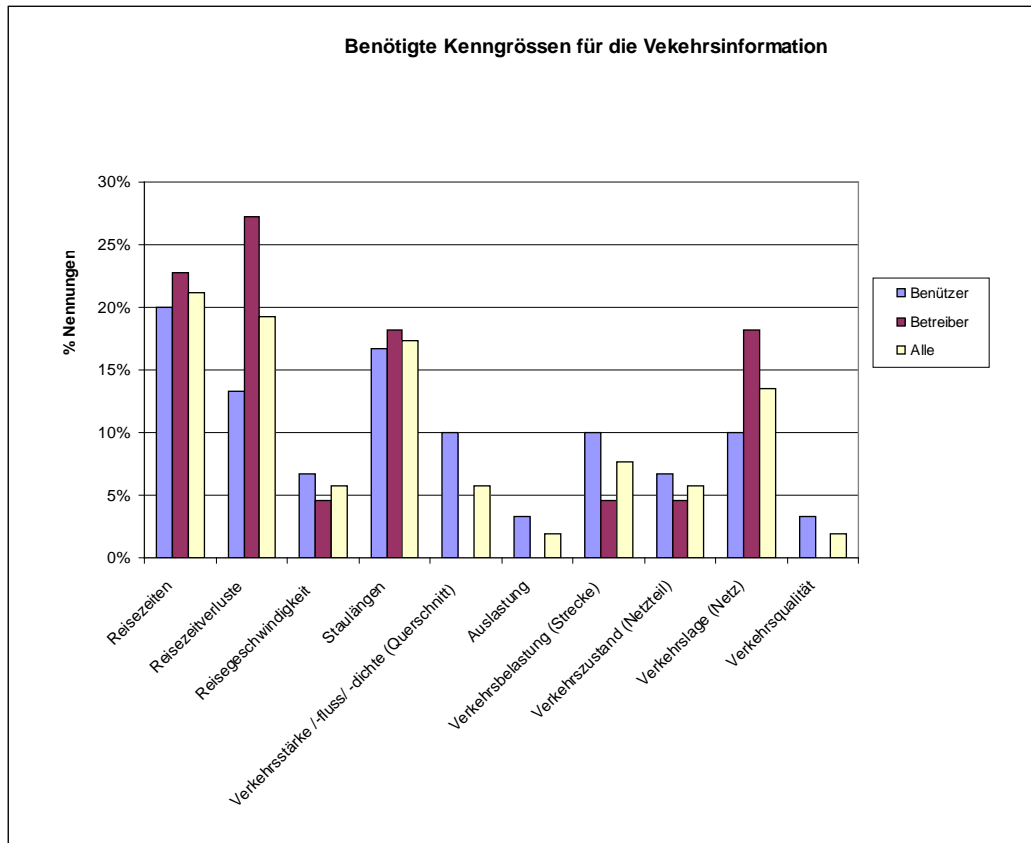


Abbildung 11 Kenngrößen von Stauprognosesystemen für die Verkehrsinformation

Das Ergebnis der Auswertung für den Anwendungszweck Verkehrsinformation kann wie folgt interpretiert werden:

- Gesamthaft entfällt der grösste Anteil an Nennungen auf die Reisezeiten, Reisezeitverluste, Staulängen und die Verkehrslage (im Netz). Wichtig für den Verkehrsteilnehmer ist eine gesicherte Ankunftszeit. Die übrigen Kennwerte sind deutlich von geringerer Bedeutung; dabei insbesondere die Verkehrsqualität und Auslastungen. Im öffentlichen Busverkehr werden linienspezifische Informationen benötigt.
- Die Unterschiede im Bedarf zwischen den Strassenbenützern und den Strassenbetreibern sind insgesamt gering. Die Betreiber scheinen im Vergleich zu den Benützern einen grösseren Wert auf die Reisezeitverluste zu legen. Die Strassenbenützer scheinen einen grösseren Wert auf die Verkehrsbelastungen (Strecken) sowie Verkehrsstärken zu legen.
- Über alle Interviewten ergibt sich folgende Rangfolge der Kenngrößen: 1. Reisezeiten 2. Reisezeitverluste 3. Staulänge 4. Verkehrslage (Netz, 5. Verkehrsbelastung (Strecke) 6. Verkehrsstärke/-fluss/-dichte 7. Verkehrszustand (Netzteil) 8. Reisegeschwindigkeit 9. Stauhäufigkeit 10. Verkehrsqualität 11. Auslastung. Bezüglich der beiden Nutzergruppen ergeben sich nur geringe Unterschiede in der Rangfolge. Erwähnenswert ist, dass für die Strassenbenützer die Reisezeiten wichtiger sind als die Reisezeitverluste; bei den Strassenbetreibern ist es gerade umgekehrt.

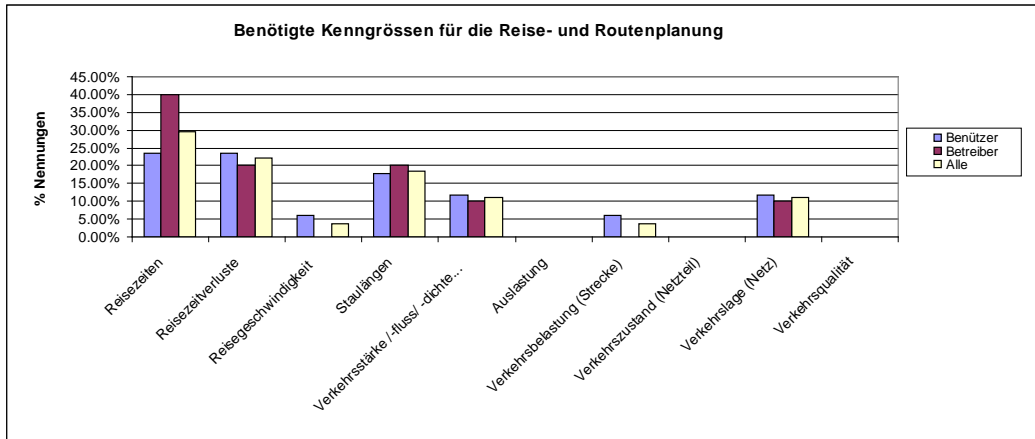


Abbildung 12 Kenngrößen von Stauprognosesystemen für die Reise- und Routenplanung

Das Ergebnis der Auswertung für den Anwendungszweck Reise- und Routenplanung ergibt ein ähnliches Bild wie für die Verkehrsinformation. Die drei Kenngrößen mit dem größten Anteil der Nennungen sind wiederum Reisezeiten, Reisezeitverluste und Staulängen. Angaben zur Verkehrslage und zu Verkehrsbelastungen werden gegenüber Verkehrsinformationen als weniger wichtig angesehen. Als weitere Output-Kenngrößen wurden auch noch Routenvorschläge erwähnt.

Die Rangfolge der Kenngrößen ist bezüglich der wichtigsten Kenngrößen ähnlich wie beim Anwendungszweck Verkehrsinformation. Es ergab sich folgende Rangfolge: 1. Reisezeiten 2. Reisezeitverluste 3. Staulängen 4. Verkehrsstärke/-fluss/-dichte 5. Verkehrslage (Netz) 6. Reisegeschwindigkeit 7. Verkehrsbelastung (Strecke). Die übrigen Kenngrößen (Auslastung, Verkehrszustand Netzteil und Verkehrsqualität) wurden gar nicht genannt. Die Reihenfolge ist für beide Nutzergruppen identisch.

Bezüglich Verkehrsmanagement antworteten vorwiegend nur die Strassenbetreiber.

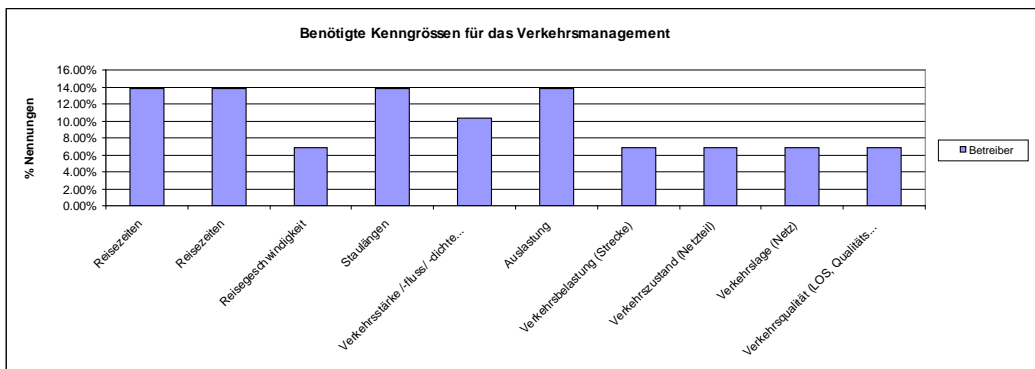


Abbildung 13 Kenngrößen von Stauprognosesystemen für das Verkehrsmanagement

Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei den vorhergehenden Anwendungszwecken, wobei die wichtigsten Kenngrößen ähnlich häufig genannt werden. Neben den Reisezeiten, Reisezeitverlusten und Staulängen haben auch die Auslastung und die Verkehrsstärke (Querschnitt) für das Verkehrsmanagement einen bedeutenden Anteil an den Nennungen. Verkehrsstärken werden richtungsabhängig benötigt. Die übrigen Kenngrößen wurden weniger genannt.

Es ergab sich folgende Rangfolge bei den Kenngrößen: 1. Staulänge 2. Auslastung 3. Reisezeitverluste 4. Reisezeiten 5. Verkehrsstärke 6. Verkehrslage (Netz) 7. Verkehrsqualität 8. Reisegeschwindigkeit 9. Verkehrsbelastung (Strecke) und Verkehrszustand (beide gleicher Rang). Im Vergleich zu den vorherigen Anwendungszwecken gewinnen beim Verkehrsmanagement die Staulängen und Angaben zur Auslastung an Bedeutung.

Frage 3: Für welchen Prognosehorizont oder welche Prognosehorizonte benötigen Sie die Kennwerte?

Gibt es Unterschiede bei den Stauengrößen? Wenn ja, welche?

Unter Prognosehorizont im Zusammenhang mit Stauprognosesystemen verstehen wir kurzfristig=Minuten bis Stunden, mittelfristig=Stunden bis Wochen und langfristig: Wochen bis Monate. Langfristig ist demnach beschränkt auf Monate bis maximal ein Jahr.

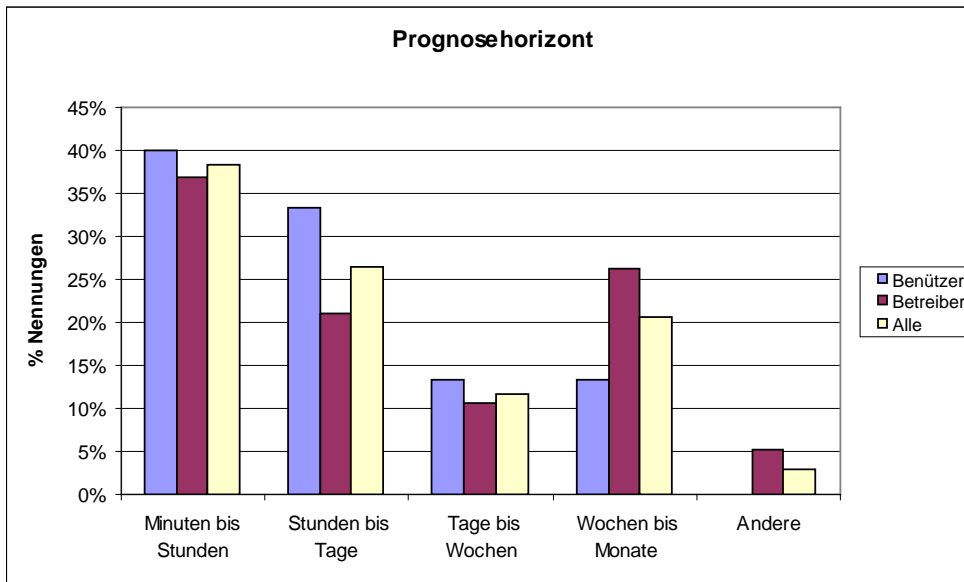


Abbildung 14 Prognosehorizonte Das Ergebnis der Auswertung der Prognosehorizonte kann wie folgt interpretiert werden:

- Den grössten Anteil Nennungen hat der Prognosehorizont Minuten und Stunden, sowohl für die Strassenbenützer als auch für die Strassenbetreiber. Für die Strassenbetreiber werden für das (operative) Verkehrsmanagement sehr kurzfristige Prognosen benötigt. Die Strassenbenützer benötigen sehr kurzfristige und aktuelle on-trip Informationen.
- Den zweitgrössten Anteil der Nennungen entfiel auf Stunden bis Tage, wobei hier die Strassenbenützer diesen Prognosehorizont als wichtiger einstufen als die Strassenbetreiber. Insbesondere für die Disposition von Warentransporten oder die Ferienreiseplanung (z.B. Anfragen beim TCS) ist dieser Prognosehorizont relevant.
- Der drittgrösste Anteil der Nennungen entfiel auf Wochen bis Monate, wobei hier die Strassenbetreiber diesen Prognosehorizont wichtiger einstufen als die Strassenbenützer (z.B. relevant für die Baustellenplanung, Strassenplanung, strategisches Verkehrsmanagement).
- Der Prognosehorizont Tage- bis Wochen wird von den Interviewten als weniger relevant beurteilt.
- Für die langfristige Netzplanung wurde auch noch ein Prognosehorizont von Jahren eingebracht (andere).
- Dass mittel- und langfristige Prognosehorizonte weniger häufig genannt wurden, kann auch mit dem Sample zusammenhängen. Es wurden weniger Personen befragt mit mittel- und langfristig ausgerichteten Tätigkeiten.
- Für die verschiedenen Stau-Kenngrößen ergaben sich keine wesentlichen Unterschiede.

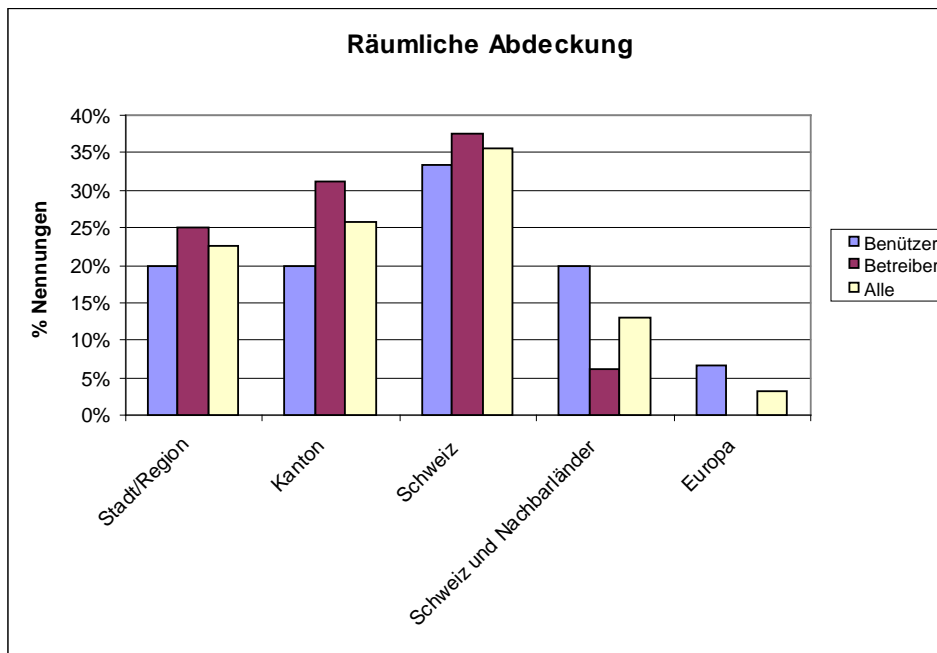
Frage 4: Welche räumliche Abdeckung müsste das System haben?


Abbildung 15 Räumliche Abdeckung

Bezüglich räumlicher Abdeckung eines Stauprognosesystems wurden die Schweiz gefolgt von den Kantonen und Städten/Regionen am häufigsten genannt. Hier zeigt sich der Einfluss des Samples der interviewten Personen, welche in ihrer Tätigkeit einen bestimmten Raum abdecken (vgl. Kapitel 3.3.1). Im Sample überwiegen Personen mit national und kantonal ausgerichteten Tätigkeiten.

Die Strassenbenützer sind erwartungsgemäss stärker an einer länderübergreifenden Abdeckung interessiert als die Strassenbetreiber. Dies gilt vor allem auch für Ferienreisen und Gütertransporte. Insbesondere der Nahbereich im Ausland (z.B. 50 bis 100 km ab Schweizer Grenze) sollte durch das System auch abgedeckt werden, da die Stausituation in der Schweiz mitbeeinflusst wird.

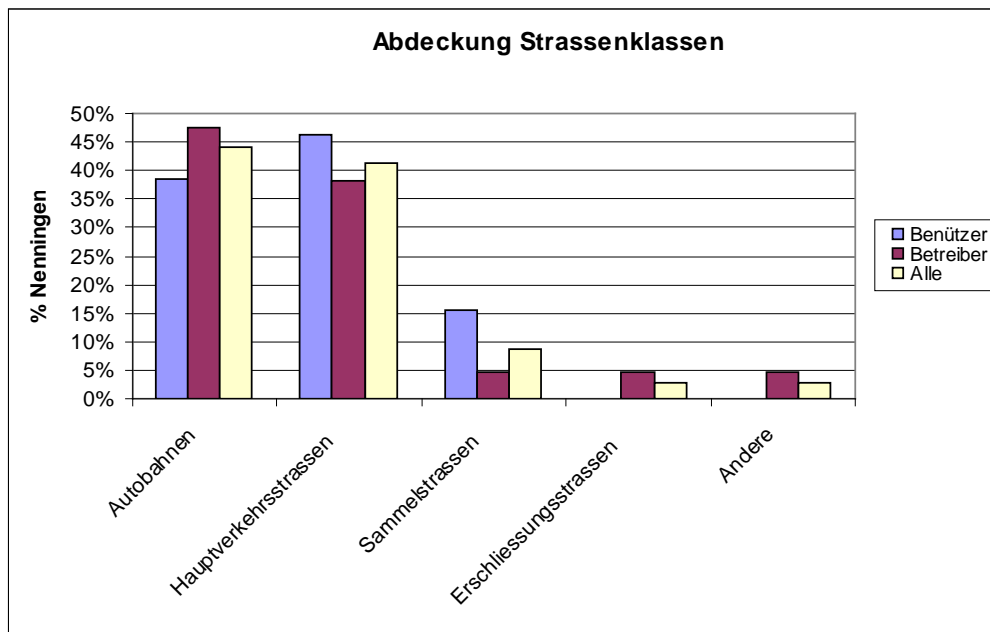
Frage 5: Welche Strassenklassen sollten abgedeckt sein?

Abbildung 16 Abgedeckte Strassenklassen

Sowohl aus Sicht der Strassenbenützer als auch aus Sicht der Strassenbetreiber sollten die Autobahnen und Hauptverkehrsstrassen abgedeckt werden. Der Einbezug von Sammelstrassen wurde deutlich weniger genannt. Ein befragter Experte hat darauf hingewiesen, dass grundsätzlich alle verkehrsorientierten Strassen einbezogen werden sollten (Andere). Es sollen die Strassenkategorien berücksichtigt werden, bei welchen Überlastungserscheinungen und Probleme auftreten; dies sind in der Regel nur die Autobahnen und Hauptverkehrsstrassen. Erwähnt wurde auch das für das nationale Verkehrsmanagement bedeutende Netz.

Als wichtig wird auch der Einbezug von Umfahrungs-/Alternativrouten angesehen sowie der Einbezug von Knoten/Strecken, welche einen Einfluss auf das Verkehrsgeschehen auf dem übergeordneten Netz haben. Auch erwähnt wurden Strassen mit Baustellen, welche die Verkehrsbelastung auf anderen Routen beeinflussen können.

Frage 6: Welche Fahrzeugklassen sollten beim Output berücksichtigt werden?

Rund 60% der Interviewten wünschen eine Differenzierung des Output nach Personen- und Lastwagen; für 40% der Interviewten könnte auf eine Differenzierung verzichtet werden. Bei den Strassenbenützern bevorzugt eine Mehrheit (2/3) eine Differenzierung; Strassenbetreiber zeigen die gleiche Präferenz; etwa 55% wünschen eine Differenzierung und für 45% kann auf eine solche verzichtet werden.

Die Differenzierung kann auf einzelne relevante Outputgrössen (wie Reisezeiten für Lastwagen, voraussichtliche Ankunftszeiten) beschränkt bleiben und muss nicht alle Output-Kenngrössen umfassen.

Auf kürzeren Distanzen (z. B. innerhalb von Agglomerationen) unterscheiden sich die mittleren Geschwindigkeiten von Personen- und Lastwagen kaum, so dass regional auf eine Differenzierung verzichtet werden könnte. Diese Ansicht vertrat die Mehrheit der Kantons- und Städtevertreter.

Auf längeren Distanzen können sich die mittleren Geschwindigkeiten von Lastwagen und Personenwagen stark unterscheiden, sodass eine Differenzierung dieser Fahrzeugklassen sinnvoll wäre. Insbesondere für den Gütertransport mit Lastwagen ist eine separate Ausgabe von Reisezeiten oder auch Alternativrouten (diese können andere sein als für PW wegen Restriktionen) von zentraler Bedeutung. Die Mehrheit der Bundesvertreter und der nationalen Verbände wünscht eine entsprechende Differenzierung.

Neben einer Differenzierung nach Fahrzeugklassen wurde auch eine Differenzierung nach Fahrtzwecken (PENT) genannt; diese sei relevant für die Bewertung von Staukosten. Zur Berücksichtigung von Alternativen sollten auch alternative Verkehrsträger (Bahn, Bus, Autoverlad etc.) berücksichtigt werden.

Frage 7: In welchem Zeitintervall benötigen Sie eine Aktualisierung?

Gibt es Unterschiede bei den Stauengrößen? Wenn ja, welche?

Bei dieser Frage waren keine Antwortmöglichkeiten vorgegeben, so dass eine Auswertung von Nennungen nicht möglich war. Bezüglich der Stauengrößen wurden keine Unterschiede angegeben.

Das Spektrum der Antworten reichte von Echtzeit/Minuten (Verkehrsinformation, Verkehrsmanagement) über Stunden (Baustellenüberwachung) bis mehrere Jahre (Strassenplanung). Insbesondere im Ereignisfall werden sehr kurze Reaktionszeiten erforderlich, so dass auch sehr kurze Aktualisierungszeiten notwendig werden (z.B. 1-3 Minuten). Aus Sicht der Ereignisdienste wären sogar Echtzeitinformationen wünschbar. Auch für das Verkehrsmanagement werden Aktualisierungen in sehr kurzen Zeiträumen (auch 1 bis 3 Minuten) benötigt, damit auf Ereignisse mit Massnahmen oder auf eine beginnende Staubildung reagiert werden kann. Von den Strassenbetreibern wurde auch zu bedenken gegeben, dass die Intervalle auch nicht zu kurz sein dürfen (< 1 bis 2 Minuten), da sonst die Outputwerte nicht geglättet sind und der Output für den Betreiber nicht mehr beherrschbar ist. Insbesondere bei Änderungen des Verkehrszustandes ist eine Aktualisierung notwendig, was auch kurze Aktualisierungszeiten erfordert. Für das Verkehrsmanagement und die Verkehrsinformation (on-trip) sollte eine Aktualisierung innerhalb 1 bis 5 Minuten erfolgen.

Für Pre-Trip Information (15 bis 30 Minuten bis Stunden) und die Planung (Monate bis Jahre) können längere Aktualisierungszeiten in Kauf genommen werden. Für die Verkehrsinformation (Pre-Trip) und Planung (Strassen, Baustellen, Disposition von Warentransporten etc.) können 15 Minuten und länger in Kauf genommen werden.

Frage 8: a) Welche Zuverlässigkeit / Qualität sollten die Output-Kenngrößen aufweisen? (im Sinne von Standardabweichungen)

b) In wie vielen von 100 Fällen dürfte eine Prognose falsch sein, damit sie diese als zuverlässig beurteilen?

Gibt es Unterschiede bei den Stauengrößen? Wenn ja, welche?

Bei dieser Frage waren keine Antwortmöglichkeiten vorgegeben, so dass eine Auswertung von Nennungen nicht möglich war. Bezüglich der Stauengrößen wurden nur von wenigen Interviewten Unterschiede in den Qualitätsanforderungen angegeben.

Bezüglich Zuverlässigkeit/Qualität der Outputkenngrößen wurde für die Standardabweichung eine Bandbreite von 10 bis 30% angegeben. Der Mittelwert der Antworten liegt bei 16%; der Median bei 15%; das heisst für 50% der Interviewten ist eine Standardabweichung von bis zu 15% akzeptabel. Die Abweichungen können für Staulängen tendenziell eher etwas grösser sein als für Reisezeiten bzw. Reisezeitverluste. Für Strassenbenutzer und Strassenbetreiber bestehen keine signifikanten Unterschiede.

Bezüglich Anzahl falscher Output-Kenngrößen¹ pro 100 Fälle wurde von den Interviewten eine Bandbreite von 5 bis 30 Fällen angegeben, damit Output-Kenngrößen noch als zuverlässig gelten könnten. Für kurzfristige Stauprognosen werden im Mittel 7 bis 8 falsche Prognosen auf 100 Prognosen akzeptiert. Die Strassenbenutzer liegen bei einem Mittelwert zwischen 6 und 7; die Strassenbetreiber bei einem Mittelwert zwischen 7 und 8. Bei mittel- und langfristigen Stauprognosen darf die Anzahl falscher Prognosen höher sein. Im Mittel werden zwischen 17 und 18 falsche Outputkennwerte auf 100 akzeptiert. Die Strassenbenutzer haben höhere Anforderungen (ca. 10 pro 100) als die Strassenbetreiber (ca. 25 pro 100). Die Fehlerakzeptanz sollte auch vom Potential der möglichen

¹ Ein Output-Kennwert wird dann als falsch bezeichnet, wenn die Abweichung >> als 30% ist oder die daraus abgeleitete Meldung falsch ist (z.B. Angabe von Stau wenn keiner ist).

Auswirkungen abhängig gemacht werden.

Die Anforderungen sind für das Verkehrsmanagement höher als für die Verkehrsinformation oder die Reise- und Routenplanung.

Für die Akzeptanz eines Stauprognoseystems ist insbesondere die Anzahl falscher Stauprognosen relevant. Mit der Angabe von Standardabweichungen oder Wahrscheinlichkeiten für Outputkennwerte kann diese Akzeptanz verbessert werden.

Frage 9: Wie sollten die Outputkenngrößen dargestellt werden?

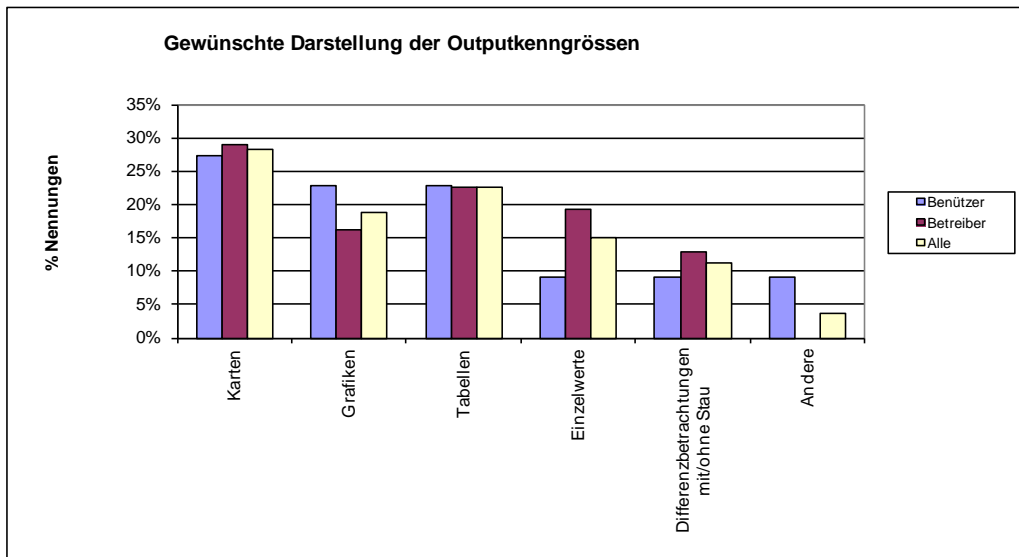


Abbildung 17 Darstellung der Outputkenngrößen

Aus Sicht der Interviewten werden grundsätzlich alle Darstellungsformen benötigt. Karten, Tabellen und Grafiken erreichten einen höheren Anteil an Nennungen als Einzelwerte und Differenzangaben mit/ohne Stau. Als weitere Darstellungsform wurden in den Interviews noch Textangaben (inkl. Fachbericht) erwähnt. Ausser der grösseren Präferenz der Betreiber für Einzelwerte, weisen die Bedürfnisse der Strassenbenützer und -betreiber keine wesentlichen Unterschiede auf.

Es besteht zur Darstellungsform eine Abhängigkeit zum Anwendungszweck und zum Zeitpunkt der Informationsvermittlung (Pre- oder On-Trip). Idealerweise geht die Darstellung vom Groben ins Feine, z.B. Karte mit Gesamtbild mit Zoom-Möglichkeiten und link- und routenbezogenen Detailinformationen. Auch die Differenzdarstellung (ohne/mit Stau) sollte als Darstellungsoption integriert sein.

Frage 10: Über welches Medium sollten die Stauprognoseergebnisse verbreitet werden?

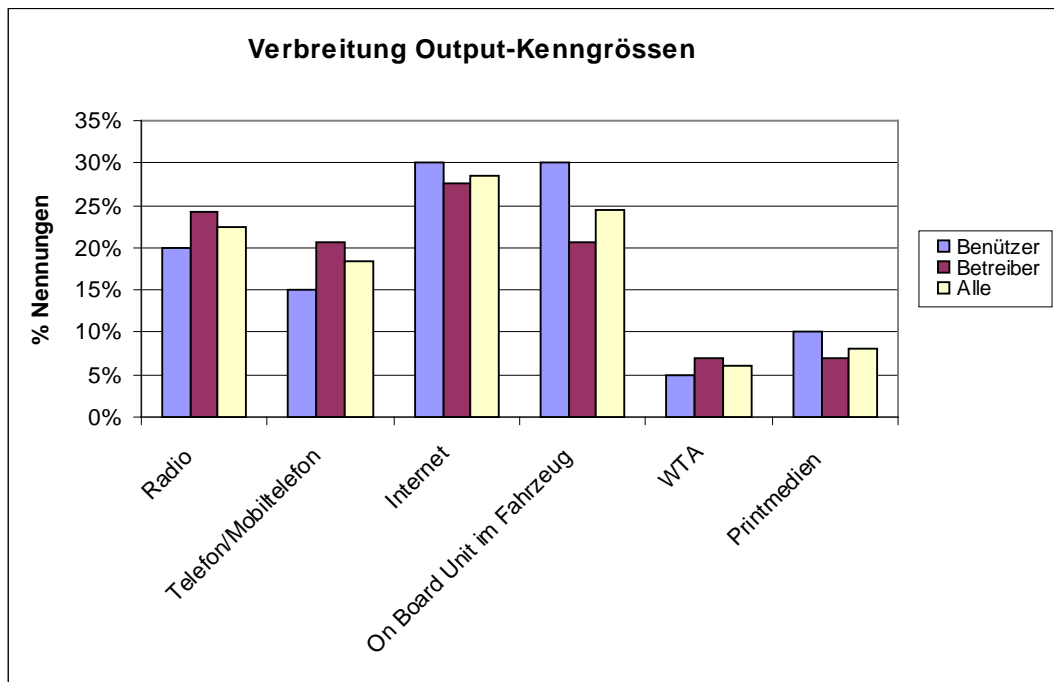


Abbildung 18 Verbreitung Outputkenngrößen

Für die Interviewten spielen alle Verbreitungs Kanäle eine Rolle. Als weitere Möglichkeiten wurden Printmedien (zum Beispiel für Angaben zum Osterstau), Wechseltextanzeigen (entlang der Strassen) und Monitore (an Raststätten, Tankstellen) angegeben. Die Antworten waren nicht vorgegeben, so dass sie unterrepräsentiert sind.

Den höchsten Anteil an Nennungen erreichten das Internet und On Board Unit im Fahrzeug. Radio und Telefon bleiben wichtige Verbreitungs Kanäle; auch wenn sie gegenüber Internet und OBU tendenziell an Bedeutung eingebüsst haben.

Für die Pre-Trip/Planung ist insbesondere das Internet zentral; für die On-Trip Information On Board Unit, Radio und Mobiltelefon. Die Prognoseverbreitung sollte auf aussergewöhnliche nicht regelmässige Situationen fokussieren.

3.3.3 Input

Der zweite Teil der Fragen betraf die gewünschten Inputgrößen für ein Stauprognose-system. Diese Fragen richteten sich nur an die Strassenbetreiber.

Frage 11: Welches sind die wichtigsten Einflussfaktoren die aus Ihrer Sicht berücksichtigt werden sollten?

Bei mehreren Einflussfaktoren: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit? (1=wichtigste)

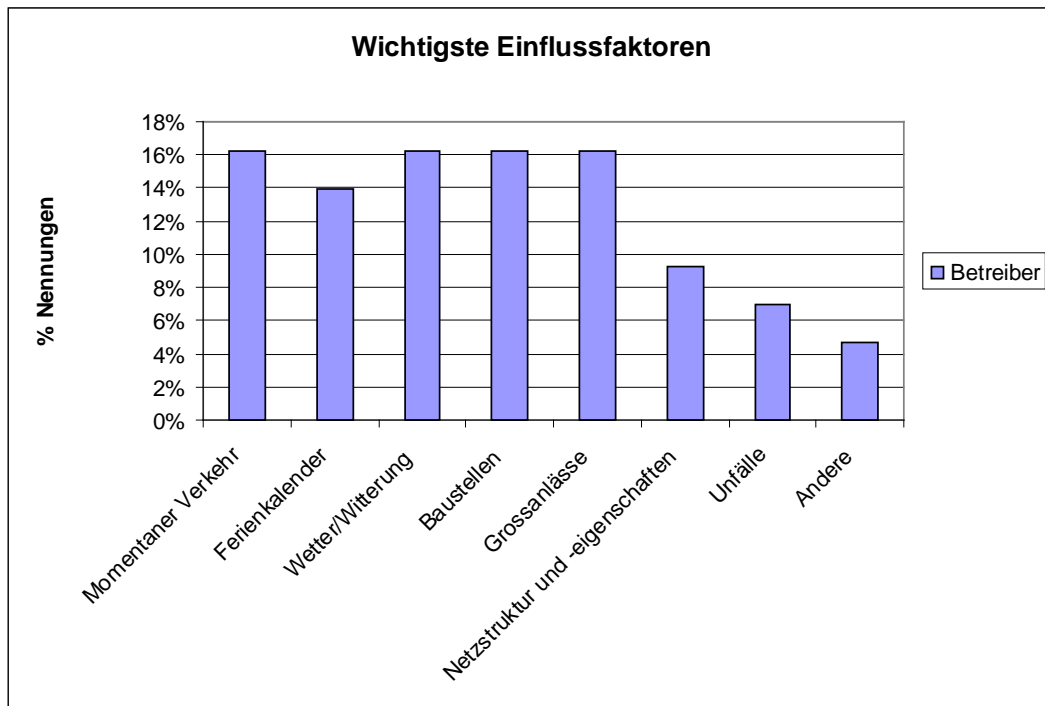


Abbildung 19 Wichtigste Einflussfaktoren

Bezüglich des Anteils Nennungen gibt es für die wichtigsten Einflussfaktoren kaum Unterschiede; der Anteil der Nennungen ist identisch. Die Befragten bevorzugten ein Stauprognosesystem, das möglichst viele Einflussfaktoren berücksichtigt. Hier wurden nur Betreiber befragt, trotzdem haben auch einige Strassenbenützer geantwortet (3 Interviewte), die in der Graphik nicht dargestellt sind. Ihre Meinung stimmt mit der Meinung der Strassenbetreiber überein: Möglichst viele Einflussfaktoren sollten einbezogen werden. Unter der Kategorie Andere haben zwei Befragte die Betrachtung des öffentlichen Verkehrs erwähnt. Aufgrund des ausgeglichenen Ergebnisses wurde auf die Ermittlung einer Rangfolge verzichtet. Weitere Bemerkungen aus den Interviews waren:

- Neben dem momentanen Verkehr müssen auch historische Verkehrsdaten genutzt werden.
- Verfügbarkeit der Strasse (bzw. der Anzahl Fahrspuren) bei Netzstruktur wichtig.
- Unfälle nicht oder kaum prognostizierbar.
- Es müssen mehrere Einflussfaktoren genutzt werden; keiner genügt alleine.
- Konjunkturelle Entwicklung beeinflusst Verkehrsaufkommen (auch saisonale Schwankungen).
- Für die Strassenplanung sind langfristige Bauprogramme relevant.
- Multimodale Betrachtung sinnvoll: Autoverlad, Autofähre, SBB

Frage 12: Welches sind die wichtigsten Verkehrsdaten, die aus Ihrer Sicht berücksichtigt werden sollten?

Bei mehreren Verkehrsdatenquellen: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit? (1=wichtigste)

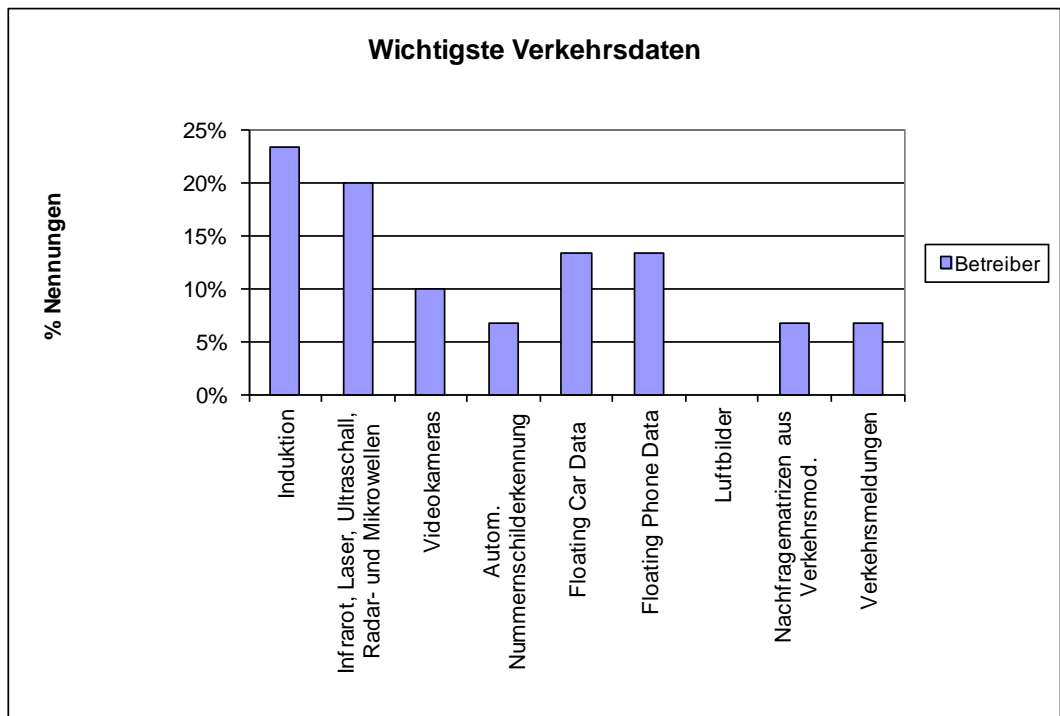


Abbildung 20 Wichtigste Verkehrsdaten

Am häufigsten wurden automatische Verkehrszähldaten genannt (Induktionsschlaufen, Infrarot etc.). Am zweithäufigsten wurden Floating Car/Phone Data genannt. Die übrigen Verkehrsdatenquellen erhielten nur noch wenige Nennungen. Es ergibt sich die folgende Rangfolge: 1. Automatische Verkehrszähldaten (Induktion) 2. Automatische Verkehrszähldaten (Infrarot, Laser, Ultraschall, Radar- und Mikrowellen) 3. Floating Car Data und 4. Floating Phone Data 5. Videokameras 6. Autom. Nummernschilderkennung 7. Verkehrsmeldungen 8. Nachfragematrizen aus Verkehrsmodellen. Weitere Bemerkungen aus den Interviews waren:

- Die Nutzung der Verkehrsdaten ist abhängig von der gewünschten räumlichen Auflösung.
- In der Zukunft werden Floating Car/Phone Data an Bedeutung gewinnen.
- Verkehrszusammensetzung (Zwecke, Fahrzeugklassen) auch wichtig.
- Videokameras mit digitaler Bildauswertung nur ergänzend zur Überprüfung von kritischen Stellen.
- Für Strassennetzplanung auch strukturelle Entwicklungen wichtig (Bevölkerungsentwicklung, Entwicklung der Arbeitsplätze).
- Technologie für eine Erfassung und online-Auswertung von Luftbildern noch nicht ausreichend ausgereift.

Frage 13: Welches sind die wichtigsten Umfelddaten, die aus Ihrer Sicht berücksichtigt werden sollten?

Bei mehreren Umfelddaten: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit? (1=wichtigste)

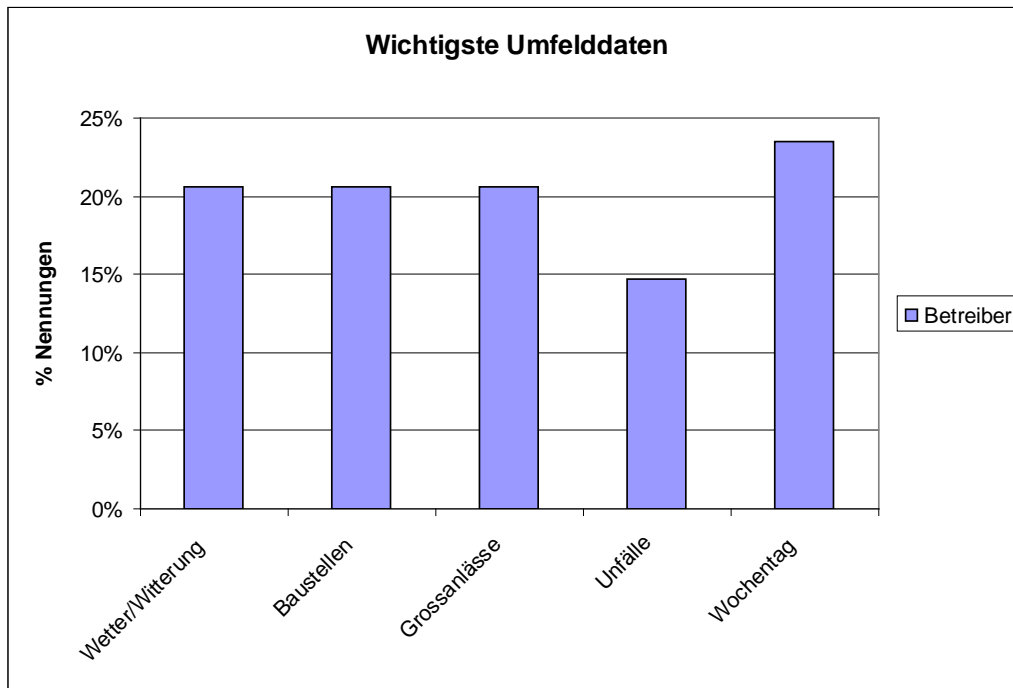


Abbildung 21 Wichtigste Umfelddaten

Entsprechend dem Ergebnis der Einflussfaktoren wurden alle Umfelddaten ähnlich häufig genannt. Weitere Bemerkungen aus den Interviews waren:

- Differenzierung Wetter und Witterung wichtig (z.B. für Strassenzustand); z.B. wird Witterung mittels Sensoren für Temperatur und Luftfeuchtigkeit gemessen.
- Ferien-/Feiertagskalender auch wichtig.
- Probleme auf anderen Verkehrsträgern (z.B. Bahn) können das Verkehrsgeschehen auf der Strasse wesentlich mitbeeinflussen.
- Situation mit effektiven Unfällen könnten für eine Steigerung der Prognosegenauigkeit bei der nächsten Aktualisierung genutzt werden.

3.3.4 System

Der dritte Teil der Fragen betraf die Schnittstellen des Stauprognosesystems zu anderen Systemen. Diese Fragen richteten sich nur an die Strassenbetreiber.

Frage 14: Welche Schnittstellen zu bestehenden Systemen (Verkehrserfassung, Verkehrsmanagement etc.) müssten aus Ihrer Sicht berücksichtigt werden?

Aus Sicht der Strassenbetreiber sind für die Ausgestaltung eines Stauprognosesystems insbesondere folgende Schnittstellen zu berücksichtigen:

Tabelle 15 Schnittstellen zu bestehenden Systemen

Schnittstellen für Input von Stauprognosesystemen	Schnittstellen für Output von Stauprognosesystemen
<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsdatenerfassungssysteme (online, offene Datenschnittstelle) • Integrierte Applikationen (INA); in INA werden diverse online Verkehrsdaten von unterschiedlichen Sensoren (Induktion, LowCost-Zähler, TomTom, VBS Sensoren) auf eine einheitliche Datenstruktur umformatiert • Schnittstelle zum DataWarehouse des Verkehrsmonitorings für die Integration von historischen Verkehrsdaten • Wetterprognosesysteme (online) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsmanagementsysteme und Verkehrssteuerung • Verkehrsinformationssysteme • Kantonale Verkehrsrechner/Verkehrsmanagementsysteme • Geographische Informationssysteme (Darstellung von Prognosezuständen) • Verkehrsmodell VM-UVEK (Integration Stauprognosemodul) • Regionale und lokale Verkehrsmodelle (Rückkoppelung)

<ul style="list-style-type: none"> • Baustellenplanung/Bauprogramme (offline) 	<ul style="list-style-type: none"> • Datenaustausch (z.B. Schnittstelle zu Viasuisse, Import von Rohdaten) • Externer Zugriff auf die produzierte Stauinformation (Karten, Tabellen) • Schnittstellen zu ÖV-Systemen (z.B. Betriebsleitsystemen von ÖV-Unternehmen) • Einsatzzentralen von Ereignisdiensten
--	---

Im Zusammenhang mit den Schnittstellen wurde auch die notwendige Flexibilität bezüglich neuer Technologien/Datenerfassungssysteme erwähnt.

Frage 15: Welche weiteren Schnittstellen sind zu beachten?

Aus Sicht der Strassenbetreiber sind für die Ausgestaltung eines Stauprognosesystems insbesondere folgende weiteren Schnittstellen zu berücksichtigen:

Tabelle 16 Weitere Schnittstellen

Schnittstellen für Input von Stauprognose-systemen	Schnittstellen für Output von Stauprognosesystemen
<ul style="list-style-type: none"> • Polizei (Dauer von Unfallabsperungen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsinformationsdienste (Verkehrsmeldungen) • Routenplanungssysteme • Navigationssysteme • Strassenreinigung und –unterhalt (wegen Staubildung, Gegenmassnahmen) • Polizei • Datenablage/-archivierung und Statistik • Rohdatensätze generieren können • Möglichkeit Weiternutzung von Output (z. Bsp. für Simulationen)

3.3.5 Weiteres

Der vierte Teil der Fragen betraf generell die (weiteren) Anforderungen an Stauprognosesysteme. Diese Fragen richteten sich wieder an beide Nutzergruppen. Da die Strassenbetreiber bereits im dritten Teil zu Systemanforderungen Stellung nehmen mussten, konzentrierten sich die Beiträge auf Strassenbenützer.

Frage 16: Welche (weiteren) Anforderungen stellen Sie an Stauprognosesysteme?

Von den Interviewten wurden folgende (weiteren) Systemanforderungen genannt:

Tabelle 17 Weitere Systemanforderungen

Strassenbenützer	Strassenbetreiber
<ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung von Normen/Standards • Integration in bestehende Fahrzeugausrüstung (Keine zusätzlichen Geräte in den Fahrzeugen) • Kompatibilität mit Planungs-/Dispositionssystemen, funktionierende Schnittstellen • Lernfähigkeit des Systems (aus aktuellen Daten und Prognosen) • Angaben von Alternativrouten (z.B. beste 3 Alternativrouten zur zugestauten Route) • Ausrüstung aller Fahrzeuge mit GPS-Chip in Kennzeichen für Verkehrserfassung (anonymisiert) • Berücksichtigung von Wetter, Grossanlässen und Baustellen • Hohe Aktualität und Zuverlässigkeit des Outputs • Nutzbarkeit für strategische Entscheide über Stützpunkte für Ereignisdienste • Hoher räumlicher Feinheitsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Flächendeckende Ausgestaltung • Hohe Zuverlässigkeit des Systems (wichtig für Nutzung und Akzeptanz) • Pre-Trip Information für Routen- und Verkehrsmittelwahl • Einbezug vorhersehbarer Wintereinbrüche für vorbeugende Massnahmen zur Reduktion von Verkehrsbehinderungen • Einbezug des Langsamverkehrs • Einbezug von Netzänderungen und Unfällen (wo keine Detektion des Verkehrszustandes) • Aktualisierung/Pflege sicherstellen

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Hohe zeitliche Auflösung • Kurze Reaktionszeit auf Veränderungen in der Stausituation • Information über Staudauer wichtig | |
|--|--|

3.3.6 Kritische Würdigung der Ergebnisse

Die Nutzergruppen eines Stauprognosesystems sind vielfältig (vgl. Kap. 3.2). Mit den durchgeführten 16 Interviews konnten die massgebenden Nutzergruppen abgedeckt werden. Bei den Auswertungen wurde nach zwei Hauptgruppen – Strassenbenützer und Strassenbetreiber - differenziert. Eine weitere Differenzierung nach Untergruppen macht aufgrund der beschränkten Anzahl der Interviews keinen Sinn, da die vertretenen Untergruppen nicht mehr mit genügend interviewten Personen abgedeckt sind. Die Befragungsergebnisse werden stark durch die Zusammensetzung des Interview-Samples beeinflusst. Auf diese Einflüsse wurde – wo relevant – bei den Auswertungen in den vorherigen Kapiteln hingewiesen.

Grundsätzlich erscheinen die Interviewergebnisse aus Sicht der Forschungsstelle plausibel und enthalten keine wesentlichen Überraschungen. Folgendes ist jedoch aufgrund der Zusammensetzung des Interviewsamples zu beachten:

- Es wurden mehr Personen interviewt, welche Tätigkeiten mit einem kurz- bis mittelfristigen Planungshorizont ausüben. Es sind mehr Interviewte operativ tätig und weniger Interviewte strategisch tätig. Das hat zur Folge, dass bei den Anwendungszwecken Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement gegenüber anderen Anwendungszwecken (Reise-/Routenplanung, Strassennetzplanung, Baustellen-/Unterhaltsplanung) tendenziell überbewertet werden. Entsprechend werden auch Kenngrössen, welche für operative Tätigkeiten benötigt werden, tendenziell überbewertet (z.B. Reisezeiten/Reisezeitverluste, Staulängen gegenüber Verkehrsbelastungen, Auslastungen). Gleichzeitig werden die kurzen Prognosehorizonte gegenüber den längeren Prognosehorizonten eher etwas überschätzt. Durch das befragte Sample ergeben sich auch höhere Anforderungen an die Intervalle für eine Aktualisierung und an die Zuverlässigkeit für eine Prognose.
- Es wurden mehr Personen interviewt, welche nationale oder kantonale Aufgaben wahrnehmen. Das hat zur Folge das städtische/lokale Bedürfnisse unterrepräsentiert sind. Damit wird zum Beispiel die nationale / kantonale Abdeckung eines Stauprognosesystems gegenüber einer städtischen/regionalen Abdeckung auch tendenziell überschätzt.
- Weiter ist zu beachten, dass die Interviewten aufgrund ihres unterschiedlichen Kenntnisstandes und ihrer unterschiedlichen Tätigkeiten sich nicht immer das gleiche vorstellen. Das heisst, dass sie auch verschiedene Begriffe und Antwortmöglichkeiten unterschiedlich interpretieren. Folgendes liess sich aus den Auswertungen feststellen:
- Die Verkehrsinformation wurde nicht immer im Sinne einer Stauprognoseinformation verstanden, sondern oft im Sinne einer Ist-Stauinformation. Damit wurde die Verkehrsinformation gegenüber anderen Anwendungszwecken eher überschätzt.
- Verkehrsmonitoring wurde nicht immer im Sinne eines Staumonitorings verstanden, sondern eher im Sinne eines Monitoring der Verkehrsbelastung oder des Verkehrsaufkommens. Somit wurde das Verkehrsmonitoring im Vergleich zu anderen Anwendungszwecken eher unterschätzt.

Trotz dieser Einschränkungen hält die Forschungsstelle die Befragungsergebnisse für nützlich und wertvoll für die Festlegung von Systemanforderungen. Es ist jedoch zu beachten, dass auch Anwendungszwecke mit mittel- und langfristiger Ausrichtung (Reise- und Routenplanung, Strassenplanung, Baustellen-/Unterhaltsplanung) nicht vernachlässigt werden dürfen.

3.3.7 Künftige Entwicklung der Bedürfnisse

Die Bedürfnisse bezüglich eines Stauprognosesystems können sich mit der Zeit verändern. Es wurden daher Entwicklungstrends und ihr Einfluss auf die Bedürfnisse analysiert. Dabei wurde zwischen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen, technologischen und politischen Entwicklungstrends unterschieden. Die Bearbeitung beschränkte sich auf eine Grobanalyse ohne Anspruch auf Vollständigkeit. Eine Vertiefung hätte den Rahmen der Untersuchung gesprengt. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Analyse in stark aggregierter Form aufgezeigt:

Tabelle 18 Entwicklungstrends: Einflüsse auf Bedürfnisse und Systemmöglichkeiten

Bereich	Einfluss auf Bedürfnisse	Einfluss auf Systemmöglichkeiten
<p>Gesellschaftliche Trends (Beispiele) Weiteres Bevölkerungswachstum/Migration, Überalterung, Urbanisierung, steigende Personenverkehrsnachfrage, Flexibilisierung der Arbeitsformen/-zeiten, verstärkte Nutzung von Social Media (inkl. deren Integration in technische Systeme), weitere Zunahme der elektronische Vernetzung (Internet etc.), wachsende Bedeutung des Werts der Nachhaltigkeit, wachsende Bedeutung des Wertes der Zeit, verstärkte Bedeutung von komplexen Systemen und Prozessen, steigende Komfortansprüche etc.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme Bedarf nach einem solchen System • Erhöhung der Systemanforderungen (z.B. Umfang verarbeitete Informationen, räumliche Detaillierung, Zuverlässigkeit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung Systeminput (z.B. Verkehrsdaten) • Verstärkte Nutzung System-Output (z.B. Reiseplanung)
<p>Wirtschaftliche Trends (Beispiele) Weitere Globalisierung, Weitere Arbeitsteilung, Verschärfter Standortwettbewerb, Druck zur Produktivitäts-/Effizienzsteigerung, Kostendruck, steigende Güterverkehrsnachfrage, steigende Bedeutung der Logistik für die Wettbewerbsfähigkeit, steigende Bedeutung IT und elektronischer Datenaustausch, steigende Bedeutung der Zuverlässigkeit gegenüber Preis, verstärktes Controlling/Monitoring der Prozesse, Zunehmende Bedeutung der Nachhaltigkeit in der Produktion und in der Logistik etc.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme Bedarf nach einem solchen System • Erhöhung der Systemanforderungen (z.B. Umfang verarbeitete Informationen, räumliche Detaillierung, Zuverlässigkeit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung Systeminput (z.B. Verkehrsdaten) • Verstärkte Nutzung System-Output (z.B. Flottenmanagement)
<p>Technologische Trends (Beispiele, Fokus Anwendungen Verkehr) Nutzung von I&K-Technologien, Infrastrukturmanagementsysteme, Fahrerassistenzsysteme, Dynamische Reise-/Routenplanung und Zielführung, Tracking und Tracing Systeme (inkl. GPS, RFID), Dynamische Tourenplanung/Flottenmanagement, Entwicklung kooperativer Systeme (inkl. Platooning), Entwicklungen Verkehrsdatenerfassung, Elektronischer Informations- und Dokumentenaustausch, Unfallersfassungssystem, Verbesserung/Verfeinerung von Simulationsmodellen, Entwicklungen Wetter-/Witterungsmesssysteme etc.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme Bedarf nach einem solchen System • Erhöhung der Systemanforderungen (z.B. Umfang verarbeitete Informationen, räumliche Detaillierung, Zuverlässigkeit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung Systeminput (z.B. Verkehrsdaten) • Verbesserung Stauprognosemodelle • Verbesserung Systemoutput (Qualität, räumliche Differenzierung etc.)
<p>Politische Trends (inkl. Regulierung) Steigende Bedeutung der Nachhaltigkeit (auch bez. Mobilität/Verkehr), Sicherung wirtschaftliche Entwicklung, Sicherung Standortgunst/Erreichbarkeit, anhaltend hohe Bedeutung des Datenschutzes, optimale Nutzung/Bewirtschaftung der bestehenden Infrastruktur, Zeit-/sachgerechter Unterhalt der Infrastruktur, weiter steigende Bedeutung Verkehrssicherheit, steigender Informationsbedarf für politische Entscheide, Standardisierungs-Initiativen etc.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Zunahme Bedarf nach einem solchen System • Erhöhung der Systemanforderungen (z.B. Umfang verarbeitete Informationen, räumliche Detaillierung, Zuverlässigkeit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung Systeminput (z.B. Verkehrsdaten) • Verstärkte Nutzung System-Output (z.B. Monitoring Staustunden)

Bezüglich Bedürfnisse führen die identifizierten Entwicklungstrends grundsätzlich zu einem eher zunehmenden Bedarf nach Stauprognosesystemen sowie zu einer Erhöhung der Systemanforderungen (bez. verarbeiteten Informationen, räumlicher Auflösung und Zuverlässigkeit).

Bezüglich Stauprognose-Systemmöglichkeiten führen die identifizierten Entwicklungstrends zu einem verbesserten Systeminput, zu verbesserten Stauprognosemodellen und zu einem verbesserten Systemoutput.

Auf die technischen Entwicklungen bezüglich Datenerfassung und –verfügbarkeit wird im Kapitel 5 eingegangen.

3.4 Gewichtung der Bedürfnisse und Einschätzungen

3.4.1 Output

Aus der nachfolgenden Tabelle gehen die Gewichtungen der Bedürfnisse für den Output aus einem Schweizerischen Stauprognosesystem hervor:

Tabelle 19 Gewichtung der Bedürfnisse (Output)

Gewichtung der Bedürfnisse (Einschätzung)		
Bereich		Fokus für Forschungsprojekt
Anwendungszwecke	<p>Höhere Priorität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsinformation • Reise- und Routenplanung • Verkehrsmanagement <p>Tiefere Priorität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baustellen- und Unterhaltsplanung • Strassennetzplanung • Verkehrsmonitoring 	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung für Verkehrsinformation, Reise- und Routenplanung und Verkehrsmanagement (andere Zwecke nachgelagert bzw. über Schnittstellen integrierbar)
Kenngrossen aus dem Stauprognosesystem	<p>Höhere Priorität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reisezeiten • Reisezeitverluste • Staulängen • Verkehrslage/-zustand/-belastung • Staudauer <p>Tiefere Priorität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reisegeschwindigkeit • Auslastung • Verkehrsqualität 	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung auf Reisezeiten, Reisezeitverluste, Staulängen und Verkehrslage/-zustand/-belastung. • Für die Ermittlung dieser Grössen können weitere Zwischengrössen relevant werden (z.B. Staudauer, welche über eine bestimmte Route aufsummiert werden muss).
Prognosehorizonte	<p>Höhere Priorität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Minuten bis Stunden • Stunden bis Tage <p>Tiefere Priorität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wochen bis Monate • Tage bis Wochen 	<ul style="list-style-type: none"> • Im Vordergrund steht Kurzfristprognose, ergänzt mit Mittel- und Langfristprognose.
Räumliche Abdeckung	<p>Höhere Priorität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schweiz- und grenznaher Bereich im Ausland <p>Tiefere Priorität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kanton • Stadt/Region 	<ul style="list-style-type: none"> • Konzeption für gesamte Schweiz und nahes Ausland, statistische Analyse und Testanwendung für Teilregion (mit kantonalen und städtischen Gebieten)
Strassenklassen	<p>Höhere Priorität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Autobahnen • Hauptverkehrsstrassen <p>Tiefe Priorität:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sammelstrassen • Erschliessungsstrassen 	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung Autobahnen, Autostrassen und HVS (inkl. Verbindungsstrassen), evtl. Netz von Bedeutung für das VM auf Nationalstrassen
Fahrzeugklassen	Zu berücksichtigende Fahrzeugklassen:	<ul style="list-style-type: none"> • Differenzierung des Outputs

	<ul style="list-style-type: none"> • Personenwagen • Lastwagen 	nach zwei Klassen (wo dies relevant ist, z.B. bei Reisezeiten)
Zeitintervall für eine Aktualisierung	<ul style="list-style-type: none"> • 1-5 Minuten (Verkehrsmanagement, On-trip Verkehrsinfo) • 15 Minuten bis Stunden (Pre-Trip, Planung/Disposition) • längere Zeiträume nur für Mittel- und Langfristplanung relevant • im Ereignisfall kurzfristig höhere Anforderungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung auf 1-5 Minuten für Kurzfristprognose • Längere Zeiträume für Mittel- und Langfristprognose
Zuverlässigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • +/-10% bis 20% Abweichung vom effektiven Wert • max. 5 Falschmeldungen von 100 Meldungen (Falsch heisst deutlich grössere Abweichungen von > +/- 50% bzw. wenn Stau prognostiziert ist jedoch effektiv kein Stau besteht) • Mit Zunahme der Prognosedauer darf auch Abweichung zunehmen 	<ul style="list-style-type: none"> • Zielgrösse für Zuverlässigkeit von +/- 10% für Reisezeiten/Reisezeitverluste, +/-20% für Staulängen (kurzfristig) sowie +/- 20% für Reisezeiten/Reisezeitverluste, +/-30% für Staulängen (mittel- und langfristig) • Zielgrösse von max. 5% Falschmeldungen (kurzfristig) bzw. 15% (mittel- bis langfristig)
Darstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Im Vordergrund stehen Karten und Tabellen, aber auch Grafiken und Einzelwerte 	<ul style="list-style-type: none"> • Grundsätzlich sollten alle Möglichkeiten gegeben sein. • Kein Forschungsschwerpunkt innerhalb der Phase I dieses Forschungsprojektes
Verbreitung	<ul style="list-style-type: none"> • Im Vordergrund stehen Internet (Pre-Trip) und On Board Unit (On-trip), aber auch Radio (Pre- und On-trip), Mobiltelefon (On-trip), Wechseltextanzeigen (on-trip) und Printmedien (pre-trip) 	<ul style="list-style-type: none"> • Grundsätzlich sollten alle Möglichkeiten gegeben sein. • Kein Forschungsschwerpunkt innerhalb der Phase I dieses Forschungsprojektes

3.4.2 Input

Aus der nachfolgenden Tabelle geht die Gewichtung der Einschätzungen für den Input eines Schweizerischen Stauprognosesystems hervor:

Tabelle 20 Gewichtung der Bedürfnisse (Input)

Gewichtung der Bedürfnisse (Einschätzung)		
Bereich		Fokus für Forschungsprojekt
Berücksichtigte Einflussfaktoren	Rangfolge: <ol style="list-style-type: none"> 1. Momentaner Verkehr 2. Baustellen 3. Wetter/Witterung 4. Grossanlässe 5. Ferienkalender 6. Netzstruktur 7. Unfälle 	<ul style="list-style-type: none"> • Relevante Einflussfaktoren ermitteln und einbeziehen (Wetter und Witterung in einem ersten Schritt separat behandeln)
Wichtigste Verkehrsdaten	Rangfolge: <ol style="list-style-type: none"> 1. Automatische Verkehrszählungen 2. Floating Car/Phone Data 3. Videoerfassung 4. Autom. Nummernschilderkennung 5. Verkehrsmeldungen 6. Nachfragedaten Verkehrsmodelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Auslegung auf autom. Verkehrsdaten und Floatingcar/phone data • Andere Erfassungsmethoden in Ergänzung für kritische Stellen (für die Plausibilisierung/Verifizierung)

3.4.3 System

Aus der nachfolgenden Tabelle gehen die Einschätzungen der Notwendigkeit von Systemanforderungen für ein Schweizerisches Stauprognosesystem hervor:

Tabelle 21 Bedürfnisse (Systems)

Bereich	Zu berücksichtigen	Fokus für Forschungsprojekt
Schnittstellen Input (von Stauprognosesystemen)	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsdatenerfassung • Verkehrsmonitoring (historische Daten) • Wetterprognosen • Witterungsmessstellen • Baustellenplanung (nicht online) • Unfallerefassungsinstrumente 	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichkeiten und Zweckmässigkeit zu prüfen
Schnittstellen Output (von Stauprognosesystemen)	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsinformationssysteme • Verkehrsmanagementsysteme • Verkehrsinformationsdienste • Routenplanung- und -navigation • Ereignisdienste (Polizei, Sanität etc.) • Strassenreinigung, Strassenunterhalt/Tagesbaustellen • Betriebsleitzentralen des öffentlichen Verkehrs 	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichkeiten und Zweckmässigkeit zu prüfen

Bei den Schnittstellen von Stauprognosesystemen sind nationale und regionale Systeme zu beachten.

3.4.4 Weiteres

Aus der nachfolgenden Tabelle geht die Einschätzung der Notwendigkeit für weitere Anforderungen hervor:

Tabelle 22 Bedürfnisse (Weitere)

Bereich	Zu berücksichtigen	Fokus für Forschungsprojekt
Systemmöglichkeiten	<ul style="list-style-type: none"> • Linienspezifische Information wichtig (ÖV) • Lernfähigkeit des Systems • Hohe räumliche Auflösung für Erfassung des Verkehrs und weiterer Einflussfaktoren • Hohe räumliche Auflösung für die Erfassung der Staudauer • Hohe zeitliche Auflösung • Angaben von Alternativrouten • Einbezug Staudauer 	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichkeiten und Zweckmässigkeit zu prüfen
Kompatibilität	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung von bestehenden Standards (Karten/Daten/Info) • Kompatibilität mit Dispositionswerkzeugen • Kompatibilität mit bestehenden Fahrzeug On Board Einrichtungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichkeiten und Zweckmässigkeit zu prüfen

3.5 Folgerungen

Als Ergebnis der Bedürfnisanalyse liegen nun die Bedürfnisse betreffend Anwendungszwecken, Output, Input und Systemausgestaltung und deren Einschätzung vor. Diese Bedürfnisse sind je nach Anwendungszweck unterschiedlich.

Die Ergebnisse bilden einen wichtigen Input für die Systemkonzeption (Kapitel 6). Diese Bedürfnisse wurden nach Vorliegen weiterer Ergebnisse aus den Arbeitspaketen 3 (Evaluation Prognoseverfahren), AP4 (Datenbedarf/Prognosevariablen) und AP 5 (Datenverfügbarkeit/-bereitstellung) nochmals überprüft und angepasst (Kapitel 6).

4 Prognoseverfahren und Prognosevariablen

4.1 Einleitung

Das vorliegende Kapitel beschäftigt sich mit der Evaluation von Prognoseverfahren und Aspekten des Datenbedarfs und der Prognosevariablen eines Stauprognosesystems.

Folgende Fragestellungen wurden untersucht:

Analyse, Tests und Evaluation von Algorithmen mit Anwendung auf Verkehrs- bzw. Stauprognosen

Resultat: Die relevanten Prognosealgorithmen aus der aktuellen (interdisziplinären) Forschung wurden implementiert und für gewisse Modellsituationen getestet. Verschiedene Masse (statistische und methodische) zur Definition der Prognosegüte wurden verwendet, um Vor- und Nachteile der einzelnen Algorithmen aufzuzeigen.

Grobkonzept, wie diese Algorithmen in ein Stauprognosesystem einfließen können

Resultat: Ein Prognosesystem wird aufgrund der festgestellten Dateneigenschaften aus mehreren Teilsystemen bestehen, welche situativ (d.h. in Abhängigkeit von Ort, Zeit, Prognosehorizont und Verkehrslage) eingesetzt werden. Die untersuchten Algorithmen decken verschiedene Aspekte ab und können zu einem solchen System kombiniert werden.

Evaluation der Datengrundlagen und Erschliessen der entsprechenden Datenquellen

Resultat: Die Zählerdaten des ASTRA eignen sich als Rückgrat für ein Prognosesystem. Ein automatisierter Zugriff auf diese Daten wurde programmiert, Datenbereinigungen wurden halbautomatisch gemacht.

Tests und Evaluation von Methoden zur Bestimmung relevanter Grössen für Verkehrs- bzw. Stauprognosen

Resultat: Klassische Methoden sowie Resultate aus aktueller Forschung wurden implementiert und an Fallbeispielen getestet. Die Methoden lassen sich in einem System anwenden, um Verkehrsdaten sinnvoll vorzustrukturieren und die relevanten Einflussgrössen für die Prognosen automatisch zu ermitteln.

Testanwendungen von Algorithmen auf relevante Einflussgrössen

Resultat: Es wurden Algorithmen auf Geschwindigkeiten und Verkehrsdichten angewandt, zur Prognose derselben und zur Prognose von Reisezeiten. Ein Algorithmus wurde entwickelt und evaluiert, um prognosebasierte on-trip Reisezeitvorhersagen zu berechnen.

Die folgende Tabelle liefert eine summarische Übersicht über die Inhalte der einzelnen Kapitel in diesem Bericht.

Tabelle 23 Übersicht über die Kapitel und deren Inhalte

Kapitel	Inhalt
4.2 Verkehrsdaten von ASTRA-Zählern	Datensammlung und Datenaufbereitung von Detektordaten, Ableitung relevanter Grössen
4.3 Multivariate Eigenschaften von Verkehrsdaten	Identifikation von Einflussparametern, Clustering, Vorstrukturierung der Daten
4.4 Generelle Prognosestrategien und Prognosequalität	Prognosegrössen, allgemeine Strategien zur Reisezeitprognose, Prognosequalität und Prognosefehler
4.5 Univariate statistische Prognosen	Vorhersage von Prognosegrössen anhand Daten einzelner Detektoren, Charakteristiken einiger relevanter Algorithmen
4.6 Univariate Modelle für verschiedene Vorhersagehorizonte	Methoden und Probleme für verschiedene Vorhersagehorizonte
4.7. Multivariate (lineare) Zeitreihenmodelle	Zeitreihenmodelle für mehrere Detektoren, Diskussion der Probleme
4.8. Reisezeitprognosen mit neuronalen Netzen	Reisezeitprognose für Horizonte von Minuten bis Stunden
4.9. Schlussfolgerungen für das Systemkonzept	Zusammenfassung der Anwendbarkeit einzelner Methoden

Die Kapitel werden im Folgenden übersichtsartig besprochen. Detailliertere und technische Betrachtungen und Diskussionen finden sich im Anhang III.

Im **Kapitel 4.2** geht es um das Sammeln der Rohdaten von cnlab, deren Aufbereitung (fehlende Daten) und die Rekonstruktion relevanter Prognosegrössen (Geschwindigkeiten, Reisezeiten). Diese Grössen werden analysiert hinsichtlich statistischer Eigenschaften (Stationarität, Linearität, Muster), welche die Prognosestrategien wesentlich mitbestimmen.

Kapitel 4.3 befasst sich mit Fragestellungen zu Einflussfaktoren. Eine qualitative Aufstellung von Einflussfaktoren wird diskutiert. Quantitative Methoden (Clustering, einfache statistische Tests, informationstheoretischer Ansatz) werden vorgestellt und exemplifiziert anhand konkreter Daten. Der Nutzen einer Vorstrukturierung wird hervorgehoben.

Im **Kapitel 4.4** geht es erst um allgemeine Vorhersagestrategien, alle im Hinblick darauf, Reisezeiten zu prognostizieren und um die Prognosequalität.

Die nachfolgenden Kapitel fokussieren sodann auf Teilaspekte der beschriebenen Strategien. In **Kapitel 4.5** geht es um den einfachsten Fall, die Prognose von Daten eines einzelnen Detektors ohne äussere Einflüsse. Klassische Methoden aus der Zeitreihenanalyse werden vorgestellt und mit Anpassungen auf Verkehrsdaten angewendet. Um verschiedene Zeithorizonte für solche Methoden geht es im **Kapitel 4.6**. **Kapitel 4.7** bespricht die Verallgemeinerung der Methoden aus Kapitel 4.6 auf gleichzeitig mehrere Datenquellen und den Einbezug externer Faktoren. In **Kapitel 4.8** wird eine Methode vorgestellt, wie Reisezeiten direkt aus den Daten prognostiziert werden können. **Kapitel 4.9** fasst die vorgestellten Methoden nochmals zusammen und beleuchtet die definierten

Vorhersagestrategien hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit.

4.2 Verkehrsdaten von ASTRA-Zählern

Eigenschaften der Zählerdaten:

Die vom ASTRA auf den Nationalstrassen eingesetzten Induktionszähler bestehen aus zwei Induktionsschlaufen, die eine direkte Messung von Grössen wie der Fahrzeuggeschwindigkeit oder Fahrzeuglänge erlauben. Die Daten, die dieser Studie zu Grunde liegen, wurden von cnlab (www.cnlab.ch) erfasst. Sie enthalten Messungen von Einzelfahrzeugen. Eine solche Einzelmessung wird im Folgenden 'event' genannt. Tabelle 24 enthält eine Zusammenfassung aller erfassten Grössen. Details zur Struktur der Daten und einige Beispiele finden sich in [ZHAW/Rapp, 2012c].

Tabelle 24 Daten von ASTRA-Detektoren

Datentyp	Beschreibung
Event-ID	Eindeutiger ganzzahliger Wert für jedes Event
Datum	Datum des Events (ddmmyy)
Zeit	Zeit (Auflösung 1/100 s)
Fahrbahn	Nicht-standardisierter Fahrbahn-Code für beide Richtungen (inkl. Pannestreifen / emergency lane)
Richtung	Spezifizierung, ob Fahrzeug in die vorgesehene (1) Fahrbahnrichtung fährt oder nicht ((2) = Geisterfahrer oder aufgrund Bauarbeiten)
Zeit front-front	Zeitdifferenz für das Passieren des Fahrzeuganfangs zwischen den beiden Induktionsschlaufen. Wird für die Geschwindigkeitsbestimmung genutzt.
Zeit front-rear	Zeitdifferenz von Fahrzeuganfang bis Fahrzeugende beim Passieren einer Induktionsschlaufe. Wird zur Bestimmung der Fahrzeuglänge benutzt.
Geschwindigkeit	Geschwindigkeit in km/h
Fahrzeuglänge	Länge in cm
Fahrzeugtyp	Fahrzeugtyp gemäss SWISS 10 Klassifikation (10 Klassen)
Fahrzeughöhe	Schätzung der Chassishöhe (very low, low, medium, high)

Die folgenden Studien zu Verkehrs- und Stauprognosen beziehen sich primär auf die Grössen

- Zeit eines Events, d.h. Zeit einer Fahrzeugdetektion (event time, t_e)
- Geschwindigkeit (km/h)
- Verkehrszusammensetzung/Verkehrsmischung

Preprocessing der Zählerdaten

Die Rohdaten müssen zunächst vorverarbeitet werden, wobei etwa fehlende oder fehlerhafte Daten erkannt und korrigiert werden müssen. Verkehr ist ein makroskopisches Phänomen, daher müssen aus den Einzeldaten der Events makroskopische Grössen ab-

geleitet werden, die der Charakterisierung des Verkehrs auf einem definierten Strassenabschnitt dienen. Die Einzelmessungen werden daher zunächst aggregiert. Die Wahl der Länge der Aggregationszeitintervalle ist relevant, da sie einen wichtigen Einfluss auf die abgeleiteten statistischen Grössen hat. Auf die für diese Studie gewählte Strategie wird im Anhang III.1.1 näher eingegangen.

Die wichtigsten abgeleiteten makroskopischen Grössen sind:

- Verkehrsfluss
- Verkehrsdichte
- Lokale Geschwindigkeit

Die Grössen sind im Anhang III.1 definiert. Bei der Geschwindigkeit gilt es zu unterscheiden zwischen dem arithmetischen Geschwindigkeitsmittel und dem harmonischen Geschwindigkeitsmittel. In Abbildung (Anhang) 8 im Anhang wird der Unterschied erläutert. Erstaunlich ist, dass der Unterschied offenbar bei Detektoren (im Ausland), die bereits selber eine Datenvorverarbeitung vornehmen, häufig vernachlässigt wird ([van Lint, 2010]). Wenn weitere Berechnungen nur auf der Bestimmung des arithmetischen Mittelwerts beruhen, so besteht die Gefahr, dass dadurch die Geschwindigkeit systematisch überschätzt und abgeleitete Reisezeiten unterschätzt werden. Im Falle der ASTRA-Zähler liegt der glückliche Fall vor, dass durch die Zähler keine Vorverarbeitung der Daten vorgenommen wird, was eine grundlegende Analyse der Rohdaten erlaubt.

Reisezeiten und Reisezeitrekonstruktion

Die oben erwähnten makroskopischen Verkehrsgrössen erlauben in der Regel eine gute Charakterisierung der lokalen Verkehrssituation. Für die Verkehrsinformation im Rahmen einer Verkehrs- und Stauprognose sind allerdings die Reisezeit oder Reisezeitverluste auf bestimmten Strassenabschnitten ebenso wichtige Kenngrössen. Die Reisezeit (oder Reisezeitverluste) können überdies auch als Ausgangsgrössen für die Detektion von Stausituationen dienen, gerade in Situationen, wo sich diese (noch) nicht in den Messungen einzelner Verkehrszähler manifestieren oder wo in den Detektordaten vermeintliche Stauspuren auftauchen. Der letztere, weniger offensichtliche Aspekt wird illustriert in Abbildung 22, in der die Geschwindigkeitsdaten von 3 Detektoren und die Reisezeiten für einen 15 km langen Nationalstrassenabschnitt gezeigt werden. In den Geschwindigkeitsprofilen sind verschiedentlich Negativspitzen zu erkennen, wobei allerdings nur ein Teil auch mit einer Reduktion der Reisezeit, also einer relevanten Stausituation, verbunden ist. Die Reisezeit eignet sich daher, im Sinne einer datenbasierten Analyse, besser zur Klassifizierung des Verkehrszustandes als die Geschwindigkeitsdaten von den Detektoren.

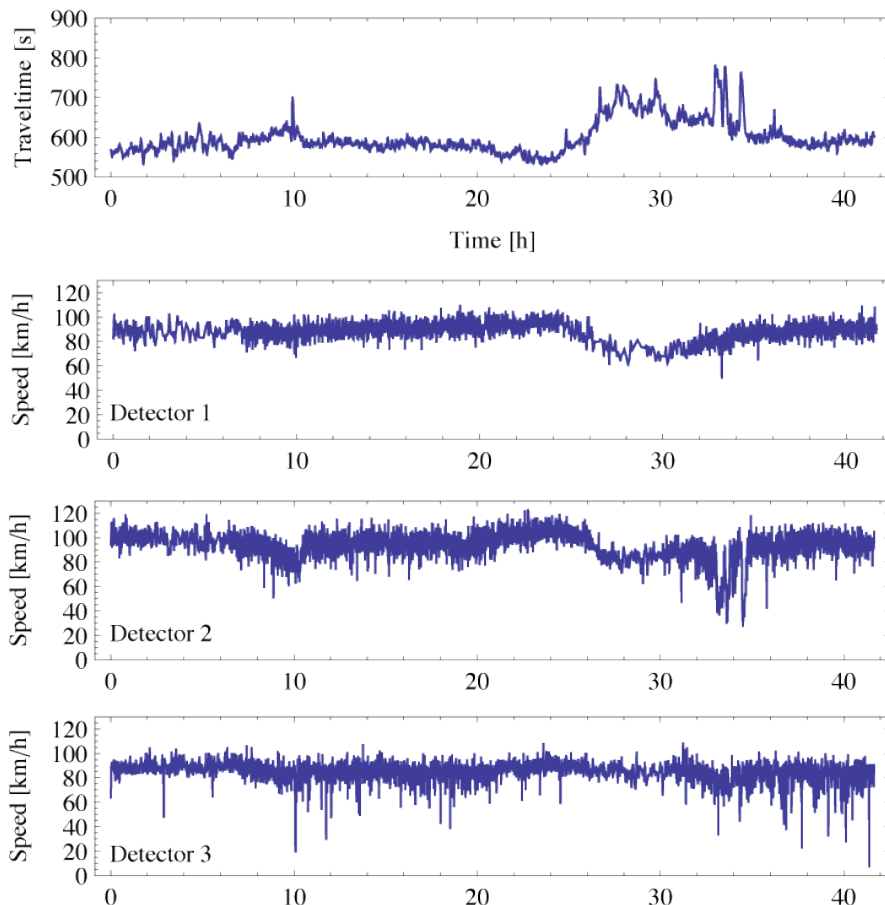


Abbildung 22 Reisezeit (oben, 1. Reihe) als Funktion der Zeit. Die Reisezeit zeigt deutliche Peaks, die mit einer Stausituation verbunden sind. Diese sind allein auf Basis der Geschwindigkeitsprofile (Reihe 2-4) schwierig zu identifizieren.

Die Reisezeit ist eine Grösse, die von den Detektordaten nicht direkt ablesbar ist. Reisezeiten müssen daher auf anderen Wegen erfasst bzw. geschätzt oder dann aus den Detektordaten annäherungsweise rekonstruiert werden (Reisezeitrekonstruktion). Diese Rekonstruktion ist selbst noch keine Vorhersagetechnik im Sinne einer echten Prognose, dient aber als Grundlage für direkte Reisezeitprognosen (siehe Kapitel 4.8).

Reisezeiten können auf Basis von FCD (floating car data) oder FPD (floating phone data) bestimmt werden oder mittels Nummernschilderkennung. Alternativ erfolgt eine Rekonstruktion aufgrund Detektordaten, etwa aufgrund von Verkehrsmustern [Steiner, 2008] oder mit dem PLSP-Algorithmus [van Lint, 2005], (siehe auch Anhang III.1.1 für weitere Angaben).

Eigenschaften der Daten einzelner Verkehrszähler

Nicht-Stationarität:

Die Zeitreihen für die Messgrößen einzelner Detektoren zeigen klare Regelmässigkeiten. Abbildung 23 zeigt zwei Zeitreihen für den Verkehrsfluss und die Geschwindigkeit von zwei unterschiedlichen Verkehrszählern (Aggregationsintervall: 3 min). Regelmässigkeiten in Form von wöchentlichen Mustern und Tagesmustern sind erkennbar. Diese Muster werden allerdings von Zeit zu Zeit durchbrochen durch auftretende Stausituationen. Aufgrund dieser Stausituationen und anderer Ereignisse sind die Zeitreihen nicht global stationär und nicht global linear (siehe Anhang III.1.2 für Ausführungen). Dies ist eine wichtige Beobachtung, denn zeitreihenbasierte Standardprognosemethoden gehen i.d.R. von stationären Zeitreihen aus. Eine Konsequenz davon ist, dass die Zeitreihen in verschiedene (bestenfalls lokal stationäre) Regimes unterteilt werden sollten, in denen unter Umständen unterschiedliche Methoden für die Prognose zur Anwendung kommen.

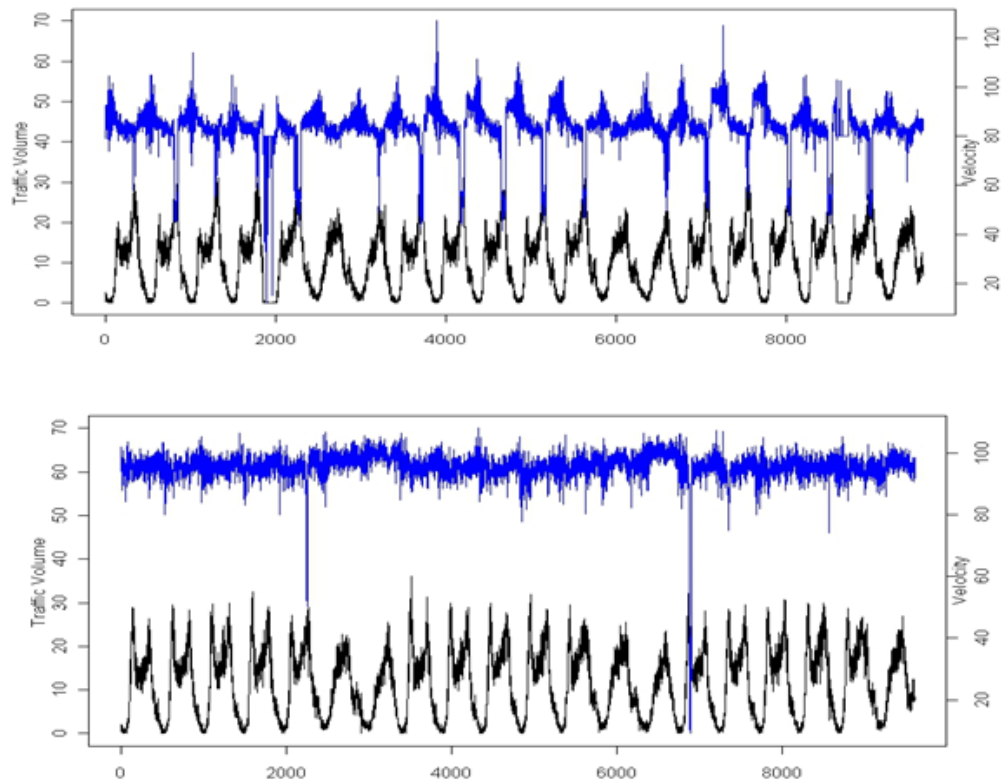


Abbildung 23 Detektordaten über 3 Wochen von AG1411 (oben) and ZH1206 (unten). Erklärung siehe Text.

Zusammenhang von Geschwindigkeit und Verkehrsfluss:

Das Fundamentaldiagramm in Abbildung 24 illustriert den Zusammenhang der bei einem Zähler gemessenen Geschwindigkeit und des Verkehrsflusses. Der Zusammenhang ist offenbar nichteindeutig und situationsgebunden: Ein kleiner Verkehrsfluss kann einhergehen mit einer praktisch konstanten hohen Geschwindigkeit (freier Fluss) oder einer sehr kleinen Geschwindigkeit (Stausituation). Ein wachsender Verkehrsfluss kann mit einer Erhöhung der Geschwindigkeit einhergehen (Stauauflösung) oder gekoppelt mit einer Reduktion der Geschwindigkeit eine Stautenstehung anzeigen. Die weiteren Analysen in Kapitel 4 werden aufzeigen, dass sich je nach Situation zum Teil unterschiedliche Methoden für die Prognose der individuellen Zeitreihen der Geschwindigkeit und des Verkehrsflusses eignen.

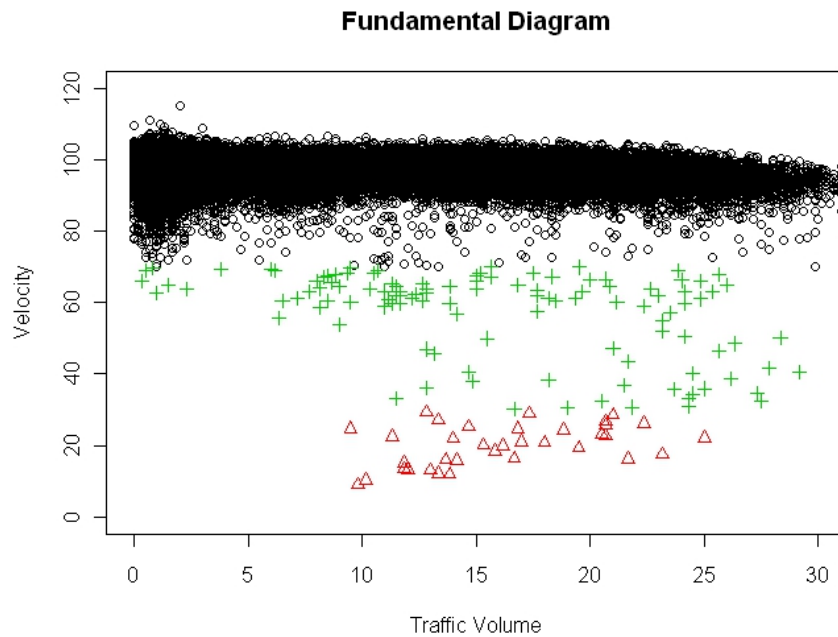


Abbildung 24 Fundamentaldiagramm für Geschwindigkeit und Verkehrsfluss (detector AG1411). Die Farben kennzeichnen drei unterschiedliche Geschwindigkeitsstufen.

4.3 Multivariate Eigenschaften von Verkehrsdaten

Eines der Ziele dieses Projekts ist es, eine Methodik zu geben, die es erlaubt die Faktoren abzuschätzen, welche die Verkehrsdaten beeinflussen, oder präziser, die Faktoren zu eruiieren, deren Einbezug die Prognosequalität signifikant erhöhen kann. Bei Prognosen, die auf multivariaten Prognose-Methoden, z.B. Multi-Zeitreihenanalysen mit externen Informationen, beruhen, ist es aus rein praktischer Sicht unmöglich, alle verfügbaren Informationen für die Vorhersage zu nutzen. Dies ist der Grund, weshalb eine vorhergehende Strukturierung der Daten notwendig wird. In den folgenden Unterkapiteln werden wir Strategien aufzeigen, die helfen, relevante Informationen im Prozess der Vorstrukturierung auszuwählen. Es ist im Allgemeinen anzunehmen, dass nicht alle möglichen Einflussfaktoren zu jeder Zeit an jedem Ort (Detektorstandorte) die gleiche Relevanz haben. Abbildung 25 zeigt qualitativ die wichtigsten Einflussfaktoren der beobachteten Verkehrsdaten. Wir unterscheiden direkte physische Einflussfaktoren (rechteckige Kästchen) und andere Einflussfaktoren (abgerundete Kästchen), welche die Quelle-Ziel-Beziehungen der Verkehrsteilnehmenden (Origin-Destination-Matrix, kurz: OD-Matrix) mitbestimmen. Eine solche OD-Matrix könnte im Prinzip vorhergesagt oder geschätzt werden, was in der Regel allerdings sehr schwierig bzw. aufwendig ist. Vorerst werden daher die OD-Muster als versteckte Variable(n) betrachtet, welche in direktem Bezug zu den beobachtbaren Verkehrsdaten stehen.

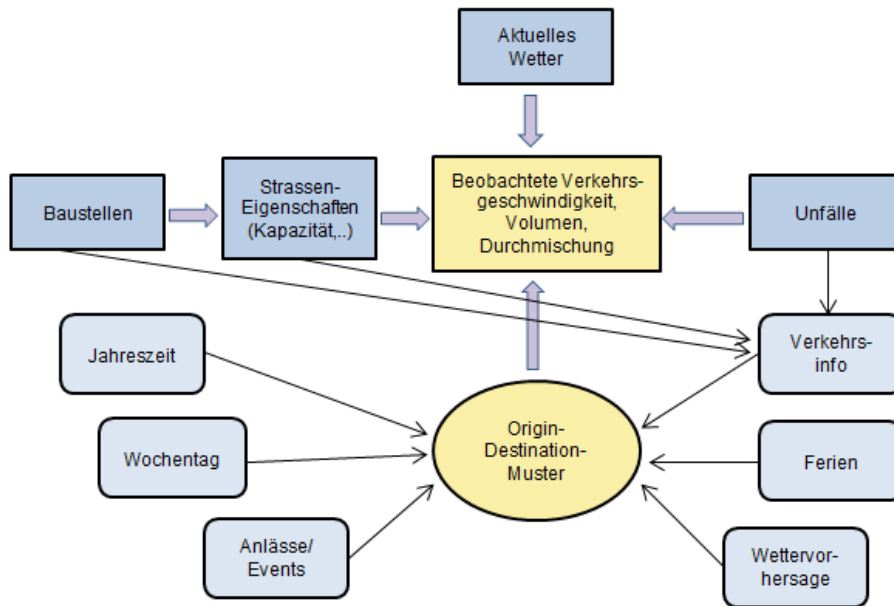


Abbildung 25 Zusammenfassung der wichtigsten Einflussfaktoren auf beobachtbare Verkehrsdaten (siehe Text).

Für die Vorstrukturierung der Daten in Kombination mit einer (mehr oder weniger) automatischen Evaluation von wichtigen Einflussfaktoren stehen unterschiedliche Methoden und Strategien zur Auswahl. Tabelle 25 gibt eine Zusammenfassung der Methoden, die im Rahmen dieser Studie genauer untersucht wurden. Detaillierte Beschreibungen und einige Fallbeispiele finden sich im Anhang III.2.

Tabelle 25 Strategien zur Vorstrukturierung der Daten und der Evaluation von Einflussfaktoren

Methode	Beschreibung und Potential	Schwierigkeiten
Qualitative Auswahl von Faktoren	<p>Eine Vorstrukturierung der Daten erfolgt aufgrund zuvor fix gewählter Einflussfaktoren (wie Ferienkalender, Zeit, Wetter,...)</p> <p>Neue Beobachtungsdaten werden vorklassifiziert gemäss diesen gewählten Einflussfaktoren. Für die Prognose dienen die entsprechenden Klassen als Referenzklassen.</p> <p>Die Methode ist konzeptionell einfach.</p>	<p>Die Wahl der Einflussfaktoren ist fix und nimmt keine Rücksicht auf lokale und zeitliche Unterschiede. Tatsächlich ist aber zu erwarten, dass zumindest die Gewichtung der Einflussfaktoren variabel ist.</p> <p>Die Methode beruht auf der Eingabe eines Experten und ist daher statisch und wenig automatisierbar.</p>
Automatische Klassifizierungsmethoden	<p>Diese Methode beruht ebenfalls auf der Idee vorgegebener Klassen, die sich z.B. über vorgegebene Einflussfaktoren definieren. Aufgrund dieser Klassen werden dann Klassifikatoren trainiert. Die Klassifizierung neuer Daten geschieht über einen Mustervergleich und nicht über die Einflussfaktoren. Die entsprechenden Klassen dienen wieder als Referenzklassen für die Prognose.</p>	<p>Falls externe Faktoren für die Definition der Klassen genutzt werden, so muss ihre Bedeutung in Abhängigkeit von Ort und Zeit zuerst überprüft werden. Andernfalls können die Klassen sich als irrelevant für die Prognosen herausstellen.</p>
Automatisches	<p>Die Klassen werden nicht vorgegeben, sondern in einem Clusteringprozess gesucht. Das Clus-</p>	<p>Strukturell relevante Einflussaktoren können direct aus den Daten</p>

Clustering	tering kann online wiederholt werden. Einflussfaktoren können mitgeclustert und ihre Wichtigkeit abgeleitet werden (siehe Kapitel 6).	bestimmt werden. Ihre Interpretation ist aber allenfalls schwierig.
Statistische Korrelations – und Kausalitätsanalysen	Bei diesen Ansätzen werden verschiedene Zeitreihen auf lineare Zusammenhänge geprüft (z.B. Regression, Korrelation, Granger-Causality). Mittels statistischer Tests kann die Signifikanz von potentiellen Einflussfaktoren ermittelt werden. Die Resultate können dann in andere Klassifizierungsverfahren (s. oben) einfließen.	Die Annahme der Linearität ist bei Verkehrsdaten i.d.R. verletzt, was weitere Analysen oder alternative Ansätze erfordert.
Transfer Entropy	Eine parameterfreie Alternative zu herkömmlichen statistischen Methoden (Kausalitätsanalysen), die auf einem informationstheoretischen Ansatz beruht (siehe Anhang III.2.3 für Erklärung).	Die Methode wurde zuletzt erfolgreich in unterschiedlichen Gebieten eingesetzt. Ihre Anwendbarkeit bei Verkehrszeitreihen ist jedoch noch wenig erforscht.

4.4 Generelle Prognosestrategien und Prognosequalität

Prognosegrößen

Tabelle 26 gibt eine Zusammenfassung von Größen, die sich als Inputgrößen für Prognosealgorithmen eignen oder die selbst Zielgrößen einer Prognose sein können.

Tabelle 26 Eigenschaften möglicher Prognosegrößen

Grösse	Verfügbarkeit	Vorhersagbarkeit (Methodik)	Verwendbarkeit
Verkehrsfluss	Direkt von Detektordaten	Methoden für uni-/multivariate Zeitreihen	in Kombination mit weiteren Daten; keine direkte Reisezeitinformationen
Geschwindigkeit	Direkt von Detektordaten	Methoden für uni-/multivariate Zeitreihen	Reisezeitinformation kann abgeleitet werden
Reisezeit	Abgeleitet aus Geschwindigkeitsdaten oder direkt (floating car/phone data)	Uni-/multivariate Zeitreihen, Neuronale Netze und ähnliche Ansätze	Wichtige Outputgrösse eines Prognosesystems
Stau	Abgeleitet aus Detektordaten (mit gewissen technischen Schwierigkeiten verbunden), abgeleitet aus anderen Datenquellen (FCD/FPD etc.)	Unterschiedliche Methoden möglich, Qualität z.T. noch nicht gut erforscht.	Information psychologisch wichtig im Sinne der Verkehrsinformation
Verkehrszusammensetzung / Verkehrsmischung	Abgeleitet aus Detektordaten (theoretisch auch ableitbar aus OD-Matrix)	Methoden für uni-/multivariate Zeitreihen	kann bei der Modellierung eine Rolle spielen.
OD-Matrix	Hoher Datenbedarf	Historische Daten mit Umlegungsverfahren	Keine direkte Reisezeitinformationen, grundlegend für Simula-

			tionen
Externe Faktoren (Kalender, Ferien, Wetter,...)	Abhängig von Faktor	Zusätzliche externe Prognosen (Wetter) oder determiniert (Wochentag, Ferien, etc.)	Fallabhängig, z.T. noch nicht sehr gut erforscht

Die Grössen und ihre Relevanz für Prognosen werden im Anhang III.3.1 detaillierter ausgeführt.

Prognosestrategien

Wie in Kapitel 2 ausgeführt, gibt es grundsätzlich unterschiedliche Strategien für Verkehrsprognosen. Vier grundlegende Strategien, die für ein Verkehrs- und Stauprognose-system in Frage kommen, sind in der nachfolgenden Tabelle 27 zusammengefasst. Sie könnten je mit verschiedenen Vorstrukturierungsstrategien (Kapitel 4.3) kombiniert werden. Weitere Ausführungen zu den Strategien sind wiederum im Anhang III.3.2 zu finden.

Tabelle 27 Vier Prognosestrategien

Strategie	Einsatz	Eigenschaften
Univariate Zeitreihen	<ul style="list-style-type: none"> • Kurzfristprognosen für Detektorgrössen (wie Verkehrsfluss oder Geschwindigkeit) für Ort des Detektors • Kann als Grundlage für kurzfristige VM-Massnahmen dienen (z.B. Geschwindigkeitsanpassungen). 	<ul style="list-style-type: none"> • Beziehen sich nur auf einzelne Detektoren, keine direkten Netzwerkinformationen fliessen ein • Einfache Implementation • Ableitung von Reisezeitprognosen mit Unsicherheiten
Multivariate Zeitreihen	<ul style="list-style-type: none"> • Kurzfristprognosen für Detektorgrössen (wie Verkehrsfluss oder Geschwindigkeit) für Ort des Detektors • Kann als Grundlage für kurzfristige VM-Massnahmen dienen (z.B. Geschwindigkeitsanpassungen). 	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigt Netzwerk von Detektoren • Probleme bei Parameterbestimmung bei grossen Modellen • Ableitung von Reisezeitprognosen mit Unsicherheiten
Direkte Reisezeitprognosen	<ul style="list-style-type: none"> • On-trip Reisezeitprognosen • Pre-trip Reisezeitprognosen ergeben sich durch Kombination mit anderen Methoden 	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigt Netzwerk von Detektoren • Relativ einfache Implementation
Simulationen	<ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsplanung (sehr langfristige Prognosen) bei komplexen Situationen • Kurzfristprognosen für kleinere Segmente, z.B. bei Stausituationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Basierend auf physikalisch begründeten Modellen • Potentiell hoher Rechenbedarf • Potentiell schwierige Parameteranpassungen

Ein besonderes Augenmerk bei der Auswahl geeigneter Prognosestrategien ist auf den Prognosehorizont zu richten. Wir unterscheiden zwischen drei unterschiedlichen Regimes, die unterschiedliche Herausforderungen an die Prognosestrategie stellen (siehe auch Anhang III.3.2).

- **0 bis ca. 30 min:** Für Kurzfristprognosen gibt es eine Anzahl i.d.R. zuverlässiger Algorithmen. Die Prognosen beruhen auf aktuellen Verkehrsdaten. Der Bezug externer Faktoren ist in der Regel nicht nötig (Ausnahme: unvorhergesehene Ereignisse mit Auswirkung auf den Verkehr, wie Unfälle etc).

- **Ca. 30 min bis ca. 1 Tag:** Mit zunehmendem Prognosehorizont wird der Einbezug externer Faktoren wichtiger und die aktuelle Verkehrssituation wird für die Prognose weniger wichtig. In der Regel liegt in diesem Zeitfenster methodenseitig die grösste Herausforderung.
- **Tag bis einige Monate:** Die aktuelle Verkehrssituation spielt praktisch keine Rolle mehr für die Prognosen. Historische Verkehrsmuster und der Einbezug externer Faktoren (Ferienkalender etc.) spielen für die Prognose die Hauptrolle.

Prognosegüte

Eine weitere Frage ist die, der Prognosequalität in Abhängigkeit des Prognosehorizonts. Intuitiv würde man davon ausgehen, dass ein längerer Prognosehorizont immer zu einer grösseren Prognoseunsicherheit führt. Das Beispiel von Reisezeitprognosen führt aber vor Augen, dass die nicht unbedingt der Fall sein muss. Bei Reisezeitprognosen spielt nämlich auch die Länge der geplanten Reise eine Rolle. Bei längeren Reisen verlängert sich zwar der Prognosehorizont, es können sich aber unvorhergesehene Abweichungen von der Prognose eher ausgleichen oder haben weniger Gewicht als bei Kurztrips.

Zur Messung der Prognosequalität kommt eine Vielzahl von unterschiedlichen Methoden und Massen in Betracht. In dieser Studie wurden unter anderem bekannte etablierte Methoden aus der Statistik eingesetzt, wie MAPE (mean average percentage error) oder Residuenanalysen. Ausführungen und Beispiele finden sich im Anhang III.3.3.

4.5 Univariate statistische Prognosen

Prognosen mittels univariater Zeitreihenmodelle basieren auf einzelnen Zeitreihen (z.B. der Verkehrsfluss gemessen mit einem Verkehrszähler). Weitere Grössen oder externe Einflussgrössen werden vernachlässigt. Obwohl oder gerade weil dies offensichtlich eine starke Vereinfachung darstellt, werden univariate Methoden häufig für Verkehrsprognosen genutzt (siehe Kapitel 2.2). Univariate Zeitreihenmodelle sind geeignet für stationäre, lineare Prozesse bzw. Zeitreihen. Da diese Bedingungen für Verkehrszeitreihen i.d.R. nicht global erfüllt sind, werden univariate Modelle im Rahmen dieser Studie in einer zeitlich adaptiven Weise eingesetzt. Dabei werden die Parameter für ein jeweils lokales Zeitfenster, in dem die Bedingungen annäherungsweise erfüllt sein sollen, neu geschätzt.

Verschiedene Methoden von unterschiedlicher Komplexität wurden anhand von Fallbeispielen getestet. Als Vergleichsbeispiels wurden insbesondere Daten des Detektors AG1411 genutzt (siehe Abbildung 26). Das genaue Vorgehen bei der Datenaufbereitung ist im Zwischenbericht AP3/4 [ZHAW/Rapp, 2012c] dargestellt.

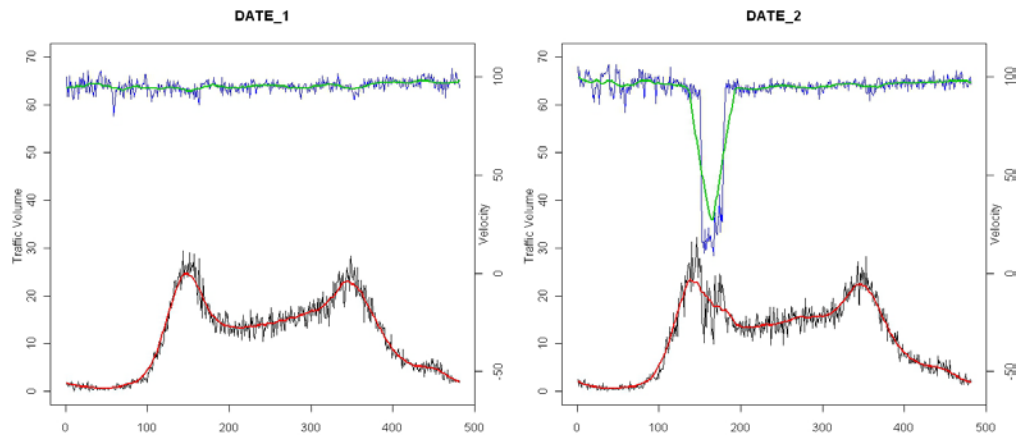


Abbildung 26 Geschwindigkeit und Verkehrsfluss für den Detektor AG1411 (3' Aggregation, rot/grün: Moving Average Filters für die Visualisierung). Im linken Bild ist ein typisches Verkehrsmuster für einen Arbeitstag ohne Stau zu erkennen. Im zweiten Datensatz (rechtes Bild) tritt eine Stausituation zur Morgenspitzenzeit auf.

Für die Studie wurden die folgenden Methoden verglichen:

- Daily Average Prognose
- Daily Pattern Prognose
- Moving Average
- Exponential Smoothing
- ARMA

Eine Beschreibung der Ergebnisse ist in Anhang III.4 zu finden. Das Interesse gilt dabei zunächst einem sehr kurzen Prognosehorizont. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass komplexere Modelle, wie AR(I)MA, sowohl für reguläre Situationen wie auch Stausituationen die besten Kurzzeitprognosen liefern. Allerdings stellen sie hinsichtlich der Rechenzeit und Implementationskomplexität auch entsprechend höhere Ansprüche, insbesondere da aufgrund der zeitlichen Adaptivität die Zahl der Parameterschätzungen sehr gross werden kann. Diese „Kosten“ kann man teilweise mit dem Einsatz von „Kalman Filtering“ oder dem Einsatz von Modellen, die mit instationären Zeitreihen umgehen können, wie GARCH Modelle, reduzieren [Brockwell, 2002].

4.6 Univariate Modelle für unterschiedliche Prognosehorizonte

Im Kapitel 4.5 wurde von sehr kurzen Prognosehorizonten (einige Minuten) ausgegangen. Im Folgenden wird untersucht, wie sich die Prognosegüte (gemessen in Form des MAPE) verhält, wenn man den Prognosehorizonte vergrössert. Konzeptionell wird dabei einfach das Aggregationsintervall vergrössert und eine Einschrittprognose gemacht. Mehrschrittprognosen führen, wie früher ausgeführt, schnell zu einer Vergrösserung des Prognosefehlers und sind daher nicht geeignet. Ein Nachteil der Methode liegt darin, dass die Berechnung des MAPE auch auf den aggregierten Zeitreihen beruht und so kurzfristige Fluktuationen unterdrückt werden. Es kann daher keine Aussage über die Genauigkeit von Prognosen mit längerem Prognosehorizont auf kurzzeitigen Skalen gemacht werden.

Im Folgenden ist ein Beispiel dargestellt für ein reguläres ARMA-Modell. Eine Erweiterung auf SARIMA-Modelle (Seasonal ARIMA Model) finden sich im Anhang III.5.1.

Für das Testsetting wurde der Prognosehorizont variiert von 1 min bis 24 h (siehe Abbildung 27/Abbildung 27).

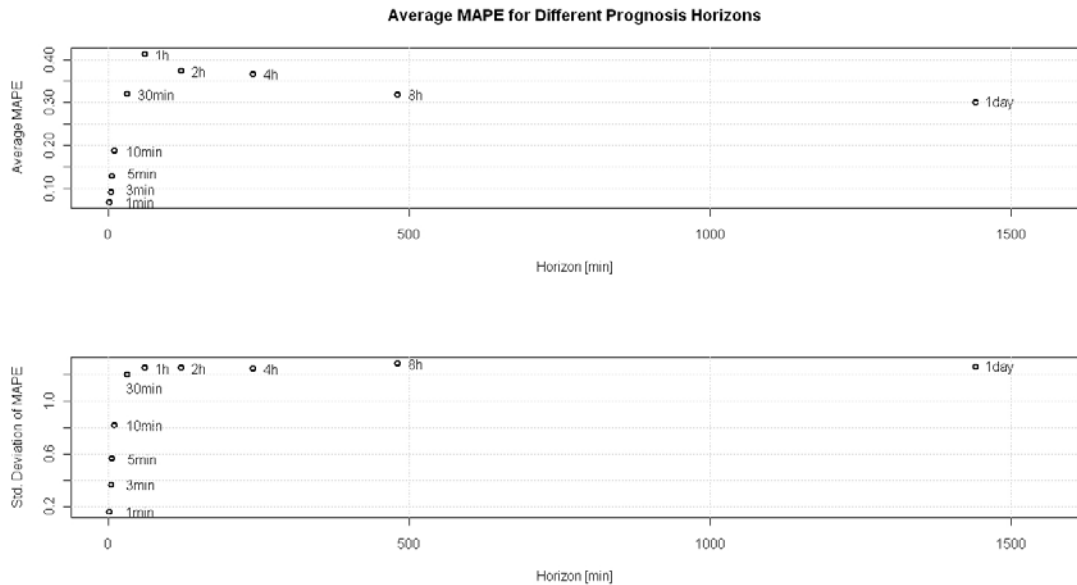


Abbildung 27 Beispiel für einen Stautag für Daten des Detektors AG1411. ARMA(3,3)-Modelle für unterschiedliche Prognosehorizonte wurden gefittet (adaptiver Fit, 10 Punkte für Fit) und die Prognosen wurden mit den exakten Werten (1 Minute Aggregationsintervalle) verglichen. Dabei zeigt sich, dass nicht nur der MAPE selbst zunimmt (oben), sondern auch die Standardabweichung der MAPE-Verteilung (unten), was auch die Vorhersage der Prognosegenauigkeit erschwert mit zunehmendem Prognosehorizont.

4.7 Multivariate (lineare) Zeitreihenmodelle

Eine natürliche Erweiterung von univariaten Zeitreihenmodellen sind multivariate Zeitreihenmodelle. Sie erlauben einerseits die Kombination der Daten von verschiedenen Detektoren und andererseits können zum Teil auch weitere externe Faktoren bzw. Zeitreihen (wie Wetterdaten etc.) einbezogen werden. Die folgenden Modelle wurden im Rahmen dieser Studie näher betrachtet:

- AR(I)MAX: Eine Erweiterung der AR(I)MA-Modelle, die den Einbezug von externen Faktoren erlauben.
- VARIMA (Vector ARIMA): Hier werden mehrere Zeitreihen gleichzeitig prognostiziert, wobei gegenseitige Abhängigkeiten bestehen können.
- State Space Models: Diese können als Verallgemeinerung der VARIMA-Modelle verstanden werden. Die Grundidee des Ansatzes besteht in einer Aufteilung der Zeitreihen in Zustandsgleichungen und dynamische Gleichungen.

Beispiele und Erläuterungen zu den Modellen werden in Anhang III.6 gegeben.

4.8 Reisezeitprognosen mit neuronalen Netzwerken

In diesem Abschnitt wird eine Methode beschrieben, die mittels neuronaler Netzwerke eine direkte Prognose von Reisezeiten erlaubt. Die Methode wird anhand eines Testfalls mit anderen Verfahren verglichen.

Künstliche neuronale Netzwerke (ANN) sind neben Zeitreihenmodellen eine andere Klasse von Modellen, die in der Literatur häufig für Verkehrsprognosen vorgeschlagen werden (siehe Kapitel 2.2). Zu finden ist auch eine Anzahl Studien, die ANN und Zeitreihenmodelle (insb. AR(I)MA) hinsichtlich der Prognose von univariaten Verkehrszeitreihen (Verkehrsfluss, Verkehrsdichte, Geschwindigkeit, aber nicht Reisezeit) vergleichen. Die Resultate legen nahe, dass die Performanceunterschiede (etwa gemessen mittels MAPE) der Modellklassen relativ klein sind. Einige Studien stellten eine leicht schlechtere Performance von ANN im Vergleich mit ARMA/GARCH-Modellen fest [Khashei, 2011].

Hier soll deshalb auf eine weitere Vergleichsstudie verzichtet werden. Die hier vorgestellte Methode unterscheidet sich dadurch von den klassischen ANN-Methoden, dass sie direkt die Reisezeit prognostiziert. Im Vergleich zu den meisten Zeitreihenmodellen erlaubt sie zudem den einfachen Einbezug mehrerer Detektoren und externer Faktoren und basiert nicht auf der Annahme der Stationarität der Zeitreihen.

Testfall

Zur Prüfung und dem Vergleich der Methode wurde ein Abschnitt mit mehreren Detektoren im Gebiet Zofingen/Oftringen ausgewählt (siehe Abbildung 28). Für die Analyse wurde der Verkehr auf einem etwa 15.5 km langen Abschnitt vom Detektor Reiden (CH239) nach Gunzgen (CH060) via CH142 (Zofingen) and CH290 (Rothrist) ausgewertet. Die Daten stammen von der Zeit vom 9. Januar bis 15. April 2012 (14 Wochen). Die Aufbereitung der Daten bei den Detektoren wurde gemäss dem im Kapitel III.1 skizzierten Verfahren durchgeführt (harmonisches Geschwindigkeitsmittel).

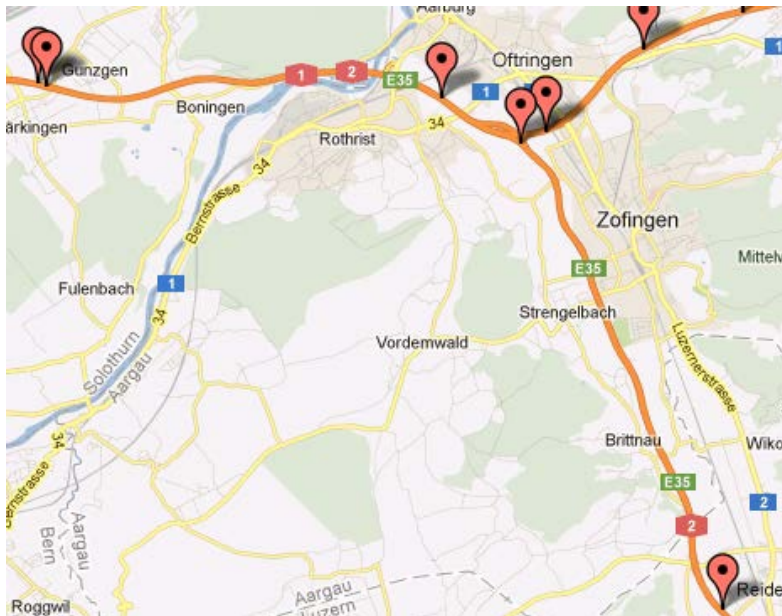


Abbildung 28 Ausgewählte Strecke für den Testfall. Die Markers zeigen die Standorte der Detektoren.

Als ANN wurde ein Feedforward-Netzwerk gewählt. Als Input dienen die Geschwindigkeitsdaten von den Detektoren. Die Netzwerkarchitektur ist schematisch in Abbildung 29 dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung der Methodik und der unten besprochenen Resultate findet sich in Anhang III.7.

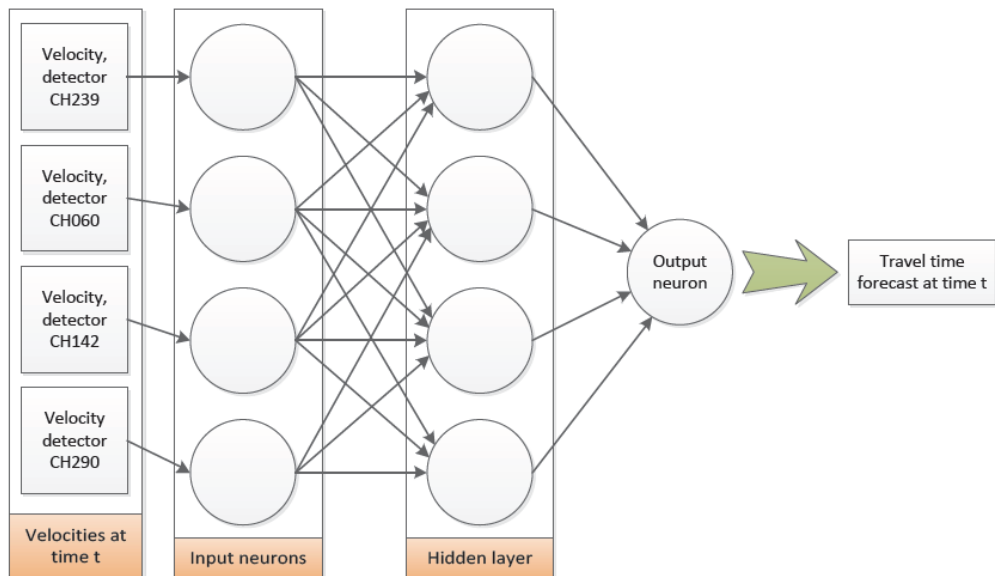


Abbildung 29 Schematische Darstellung der Netzwerkarchitektur

Resultate

Abbildung 30 zeigt ein typisches Beispiel einer Reisezeitprognose für 8 Stunden. Die schwarze Kurve zeigt die tatsächliche Reisezeit eines virtuellen Testfahrzeuges, die erst nach Passieren des Segments (re)konstruiert werden kann. Die Prognose des ANN entspricht der blauen Linie. Im Allgemeinen kann sie den Verlauf der schwarzen Referenzkurve relativ gut erfassen. Die Qualität der Vorhersage muss insbesondere im Vergleich mit einer "naiven" Vorhersage gesehen werden (orange Kurve). Die naive Prognose geht davon aus, dass sich die gemessenen Geschwindigkeiten entlang der Strecke nicht verändern werden². Es wird also von einem homogenen stationären Verkehrsfluss ausgegangen. Dies ist eine Annahme, die bei vielen bestehenden Prognosesystemen fälschlicherweise getroffen wird. Der visuelle Eindruck bekräftigt, dass die ANN-Prognose deutlich besser als die herkömmliche Prognose ist. Insbesondere wird bei der naiven Prognose die Reisezeit bei der Entstehung von Verlangsamungen (etwa bei Stausituationen) überschätzt (siehe z.B. bei 4.5h, 6.5h or 7.5h).

² Ein Vergleich mit der noch simpleren Methode, die die aktuelle Reisezeit als Prognose nimmt, ist im Beispiel ausgeschlossen. Diese würde Stausituationen erst stark verzögert erkennen.

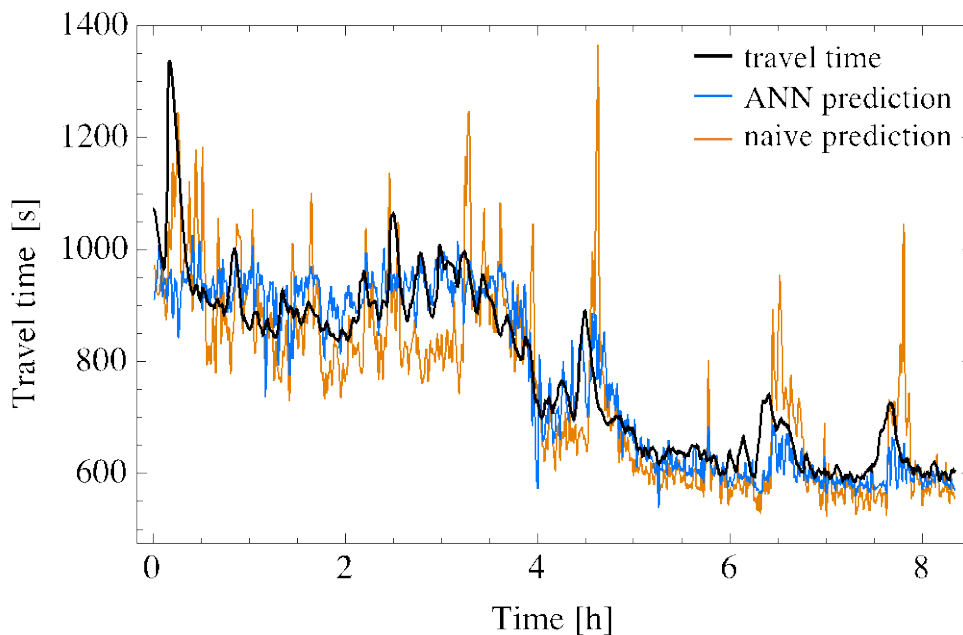


Abbildung 30 Vergleich der Reisezeitprognosen (naiv und ANN) mit tatsächlicher Reisezeit

4.9 Schlussfolgerungen für das Systemkonzept

Zusammenfassung

Ein verlässliches, möglichst universelles Verkehrsprognosesystem muss aus mehr als nur einem Algorithmus oder einer einzelnen Methode bestehen. Wissenschaftlich gesprochen ist dies durch die Strukturbrüche bzw. Nichtstationarität der Verkehrszeitreihen bedingt. Intuitiv lässt sich sagen: Der Verkehr verhält sich in verschiedenen Situationen (freie Fahrt, stockender Verkehr, Stau) unterschiedlich. Diese Unterschiede kommen in sich verändernden Eigenschaften der Zeitreihen zum Ausdruck. Deshalb muss sich ein intelligentes System den unterschiedlichen Verkehrssituationen anpassen können, z.B. durch Veränderung von Parametern eines Algorithmus oder sogar durch eine situative Wahl der Methoden.

Aus dem Vorhersagehorizont leitet sich ein weiterer Bedarf nach Anpassungsfähigkeit des Systems ab. Die Verfügbarkeit, aber auch die Relevanz von Informationen über die aktuelle Verkehrssituation nimmt ab, je weiter der Prognosehorizont in der Zukunft liegt.

Methoden für die Vorverarbeitung von Verkehrsdaten für verschiedene Szenarien

Aus den folgenden Gründen ist eine zielgerichtete Vorverarbeitung der Daten nötig:

- Verkehrsdaten sind potentiell instationär. Verschiedene räumliche und zeitliche Zustände erfordern unterschiedliche Parametereinstellungen oder sogar Algorithmen.
- Verkehrsdaten beinhalten "natürliche" Cluster (z.B. bestimmte Tagesverläufe, s. Kapitel 4.2). Zusätzlich haben externe Faktoren, wie das Wetter, einen Einfluss auf den Verkehrsfluss (s. Kapitel 4.3)
- Die Cluster beinhalten prototypische Instanzen für eine Basisprognose (Ganglinienprognose).
- Die Vorverarbeitung hilft die optimale Prognosemethode zu finden. Situationen aus der Vergangenheit in denen bestimmte Algorithmen gut funktioniert haben werden in Gruppen zusammengefasst. Neue Situationen werden mit diesen Gruppen verglichen und im Falle einer Übereinstimmung können die Parameter einer bestimmten Gruppe wieder für die Prognose verwendet werden.

Kurzzeit-Prognose

Univariate statistische Methoden haben sich als eine gute Basis für eine Kurzzeitprognose für eine einzelne Fahrspur herausgestellt (bis zu 30min). Für längere Vorhersagen müssen diese Methoden mit anderen kombiniert werden. Reisezeitvorhersagen für kurze Strecken ergeben sich aus der Vorhersage der Reisegeschwindigkeit.

Reisezeit-Vorhersagen

Neuronale Netze können Reisezeiten direkt vorhersagen. Die Methode kombiniert die Vorhersagen für verschiedene Orte und kann so die allgemeine Verkehrssituation besser berücksichtigen. Wichtig ist hierbei die Tatsache, dass die Gesamtvorhersage auf den lokalen Vorhersagen basiert, nicht nur auf den aktuellen Verkehrssituationen (heutige naive Vorhersage). Die Methode beruht auf der Reisezeit für Strassenabschnitte. Zukünftig wird die Qualität dieser Daten steigen, da sich neue Möglichkeiten der Datenerhebung auftun (z.B. FCD/FPD). Bei diesem Ansatz, im Gegensatz zur herkömmlichen Verkehrsprognose, ist die Reisezeit die Grundlage zur Vorhersage weiterer Größen wie Verkehrsvolumen etc.

Langzeit-Vorhersage mit externen Faktoren

Für welchen Vorhersagehorizont benötigt man welche Parameter an welchem Detektor zu welcher Jahreszeit? Wie können Einflüsse gemessen werden? Im Vergleich zur Vorhersage mit saisonalen Zeitreihenmodellen; wie sehr kann die Vorhersage verbessert werden, wenn externe Einflüsse berücksichtigt werden? Wie können Reisezeiten für Langzeit-Vorhersagen von Geschwindigkeit oder Verkehrsvolumen geschätzt werden? Wieviel Unsicherheit ist in derartigen Schätzungen enthalten?

Eine erste Studie (s. Kapitel 4.6) hat wenig überraschend gezeigt, dass die Vorhersagequalität mit steigendem Prognosehorizont abnimmt. Im Anhang wurde eine Methode für die Langzeit-Vorhersage von Geschwindigkeit oder Verkehrsvolumen präsentiert, die die täglichen und saisonalen Muster erfasst.

In Kapitel 6 wird genauer aufgezeigt, wie eine Langzeit-Prognose (Stunden, Wochen, Monate) aussehen kann und wie sie an den Prognosehorizont angepasst werden muss.

Kategorisierung von externen Einflüssen

Eine Vorhersage auf Basis aller möglichen Einflüsse ist nur schon rechentechnisch zu aufwändig. Darum muss man sich auf einige relevante Einflüsse beschränken um die Vorhersage zu verbessern. Die menschliche Intuition kann recht gut zur Auswahl von relevanten Einflüssen dienen. Dennoch wird sich der Effekt verschiedener Einflüsse über die Zeit und über verschiedene Detektoren ändern. Einige starke Einflüsse könnten durch zufällige Schwankungen in den Daten verdeckt sein. Daher muss ein effektives System für die Vorhersage relevante Faktoren automatisch herausfiltern können. In Kapitel 4.4 wurde eine neue, wissenschaftlich vielversprechende, Methode skizziert, die diese Filterung übernimmt. Die verschiedenen Tests auf prototypischen Beispielen sehen erfolgversprechend aus.

Stauvorhersage- und Stauwarn-System

Eher einfache univariate Zeitreihenmethoden können genutzt werden um ein Stauwarnsystem mit einem Zeithorizont von 20-30min aufzubauen. Ein solches würde auf einer One-Step-Ahead Vorhersage basieren, die zu vorstrukturierten Verkehrssituationen verglichen werden. Der Vergleich der Vorhersage mit bekannten Verkehrsmustern ermöglicht das frühzeitige Erkennen von kritischen Situationen. Ein entsprechendes Feedback-System könnte dann einen Verkehrsmanager warnen Gegenmassnahmen einzuleiten (Geschwindigkeitsbegrenzung, 3. Fahrspur öffnen, etc.), oder sogar selbst einfache Massnahmen ergreifen (Herabsetzung der Höchstgeschwindigkeit).

Die Hauptprobleme bezüglich der Verkehrssituations-Vorhersage sind:

- Die Identifikation typischer Stau-Muster – Geschwindigkeitsvorhersage allein ist nicht ausreichend; in vielen Fällen werden mehr Daten benötigt.
- Die Masse für Qualität und sich daraus ergebende Anpassung der Algorithmen: verschiedene Ansätze müssen untersucht werden.
- Vorschläge für Gegenmassnahmen (Welchen Effekt hat die Herabsetzung der Höchstgeschwindigkeit etc.)

Für einige dieser Fragen können Zeitreihenmodelle allein nicht die Antwort liefern. Vielmehr wird eine intelligente Kombination verschiedener Modelle nötig sein.

Staudynamik

Während der Beginn eines Staus durch Zeitreihenmodelle relativ gut abgebildet werden kann, kann die Dynamik eines Staus durch sie nicht wiedergegeben werden. Ein physikalisch-intuitiver Ansatz zur Modellierung von Stau-Dynamik bieten Simulationsmethoden. Der Vorteil solcher Methoden liegt auf der Hand: die aktuelle Verkehrssituation dient als Ausgangspunkt für eine realistische Modell des Fahrerverhaltens (Abstand zum nächsten Fahrzeug etc. s. Abbildung 31) und kann in der Zeit propagiert werden.

Simulationsmodelle werden typischerweise für die Langzeit-Schätzung kritischer Szenarien in der Verkehrsplanung eingesetzt (s. z.B. senozon.ch). In diesem Zusammenhang werden sehr viele demographische Daten benötigt (Quelle-Ziel bzw. OD-Matrix). Dies kann durch die Simulation nur einzelner kleiner Strassenabschnitte vermieden werden.

In Kapitel 6 wird eine genauere Analyse der Möglichkeiten, sowie der Entwicklungs- und Betriebs-Kosten, für Simulationsmodelle der Staudynamik gegeben.

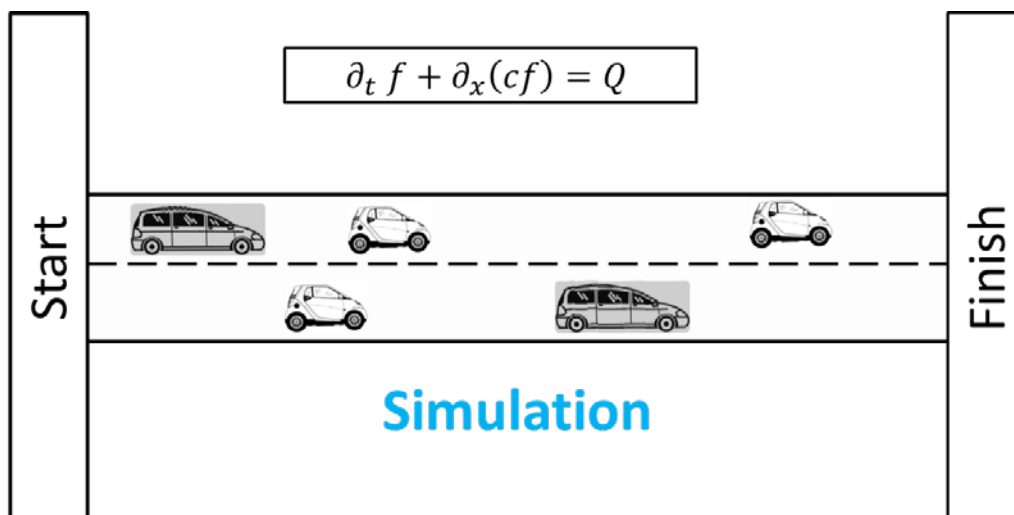


Abbildung 31 Simulation eines Staus mit klar definiertem Zu- und Abfluss auf einem Strassensegment.

5 Datenverfügbarkeit und -bereitstellung

5.1 Einleitung

5.1.1 Ziel der Abklärungen

Die heutige und künftige Verfügbarkeit von für Stauprognosen in Frage kommenden Daten spielt eine entscheidende Rolle für die Machbarkeit und Eignung von Stauprognosesystemen. Solche Daten umfassen neben Verkehrsdaten auch Umfelddaten (z.B. Wetter) oder Ereignis- und Gefahrendaten (z.B. Baustellen, Unfälle).

Ziel des Arbeitspaketes 5 „Datenverfügbarkeit und –bereitstellung“ war es, die Verfügbarkeit und Eignung von für Stauprognosesysteme grundsätzlich in Frage kommenden Daten zu untersuchen und zu beurteilen.

5.1.2 Vorgehen und Methodik

Es wurden konkret folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Strukturierung / Auswahl der Datenerfassungssysteme
- Erstellung eines Formulars für eine standardisierte Analyse und Beurteilung von Datenerfassungssystemen (Analyse- und Beurteilungsblätter, vgl. Anhang IV.1)
- Grundlagenbeschaffung zu den Datenerfassungssystemen (Forschungsberichte, ASTRA-Dokumente, Fachartikel etc.)
- Ausfüllen der Analyse- und Beurteilungsblätter
- Ausgewählte Kontakte mit potentiellen Daten-/Informationslieferanten für die Schliessung von Lücken
- Synthese zur Beurteilung der Verfügbarkeit und Eignung von Daten für ein Stauprognosesystem.

Im Rahmen des Projektes konnten keine eigenen Feldversuche durchgeführt werden; soweit vorhanden wurden aber Dokumente über durchgeführte Feldversuche einbezogen.

Im Kapitel 2.3 „State of the Art Stauprognosesysteme“ wurden die für die jeweiligen Systeme verwendeten Daten analysiert und beurteilt. Die Datenverfügbarkeit für diese Systeme ist grundsätzlich gegeben. Es ist jedoch zu beachten, dass länder- und regionenspezifische Unterschiede bei der Datenerfassung und –verfügbarkeit bestehen. Nachfolgend gehen wir insbesondere auf die Datenverfügbarkeit in der Schweiz ein.

5.1.3 Strukturierung der Datenerfassungssysteme

Gestützt auf (B+S AG, 2011) wurden die Datenerfassungssysteme in die drei Bereiche Verkehrsdaten, Umfelddaten und Ereignisse und Gefahren eingeteilt:

Tabelle 28 Strukturierung der Datenerfassungssysteme

	Kategorien	Bemerkungen
Verkehrsdaten	Verkehrszählungen Verkehrsbeobachtungen/-informationen Verkehrsnetzdaten/-informationen Verkehrsnachfragematrizen	z.B. aus Verkehrsmodellen
Umfelddaten	Wetter Strassenzustand	Inkl. Regen, Schneefall, Nebel etc. Inkl. Glätte, Aquaplanning, etc.
Ereignisse	Planbare Ereignisse	Inkl. Baustellen, Veranstaltungen, Ferien-

und Gefahren		kalender
	Spontane Ereignisse	Inkl. Unfälle, Falschfahrer, weitere Gefahren
	Polizeiliche Meldungen und Anordnungen	ren
	VM-Massnahmen	Inkl. Sperrungen, Umleitungen, etc. Inkl. Signalisationen, Geschwindigkeitsvorgaben

Der Schwerpunkt der Bearbeitung wurde in einem ersten Schritt auf die Verkehrsdaten, die Umfelddaten und bei den Ereignissen und Gefahren auf die planbaren Ereignisse gelegt. An der Begleitkommissionssitzung vom 1.11.2012 wurde der Fokus auch auf die nicht planbaren Ereignisse (inkl. Gefahren) ausgeweitet.

5.2 Untersuchte Datenerfassungssysteme

5.2.1 Datenerfassungssysteme

In der folgenden Tabelle sind die untersuchten Datenerfassungssysteme aufgelistet. Die Datenerfassungssysteme wurden in vier Hauptgruppen unterteilt: Verkehrsdaten, Umfelddaten, Ereignisse und Gefahren (planbar) und Ereignisse und Gefahren (nicht planbar). Insbesondere wurden gegenüber Kapitel 5.1.3 die Ereignisse und Gefahren in planbare und nicht planbare eingeteilt, da im Rahmen eines Stauprognosesystems eine unterschiedliche Behandlung zu erwarten ist.

Die nachfolgende Liste umfasst gestützt auf [B+S AG, 2011] die wichtigsten Datenerfassungssysteme, ist jedoch nicht abschliessend.

Tabelle 29 Untersuchte Datenerfassungssysteme

	Datenerfassungssystem
Verkehrsdaten	<ul style="list-style-type: none"> • Nachfragematrizen (Nationales Verkehrsmodell) • Strassennetzdaten (Nationales Verkehrsmodell, MISTRA) • Induktionsschlaufen (ASTRA-Zähler) • Bluetooth • Floating Car Data • Floating Phone Date • Videokameras • Automatische Nummernschilderkennung (APNR) • Infrarot • Radar/Mikrowellen • Ultraschall • Luftbilder • Flugzeuggetragene Radarsysteme SAR • Satellitengetragene Radarsysteme SAR
Umfelddaten	<ul style="list-style-type: none"> • Wetter • Strassenzustand – Truckinfo • Strassenzustand – Glatteismeldeanlagen
Ereignisse und Gefahren (planbar)	<ul style="list-style-type: none"> • Baustellen – Truckinfo • Veranstaltungen • Ferienkalender
Ereignisse und Gefahren (nicht planbar)	<ul style="list-style-type: none"> • Unfalldaten (historisch, aktuell) • Polizeiliche Meldungen/Anordnungen/Verkehrsmeldungen • VM-Massnahmen

Die ausgefüllten Datenerfassungssystembeschreibung- und -beurteilungsblätter sind in einem separaten vertraulichen Arbeitsbericht „Datenerfassungssystembeschreibung und –beurteilungsblätter“ vom 20.9.2013 dokumentiert.

Die erfassten Informationen gehen aus dem Anhang IV.1 Datenerfassungssystembeschreibung- und beurteilungsblatt. Dabei liegen aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit oder des beschränkten Zugangs nicht immer alle gewünschten Informationen vor.

5.2.2 Verkehrsdaten

Nachfolgend sind die untersuchten Verkehrsdatenerfassungssysteme kurz beschrieben inkl. des Outputs für eine mögliche Verwendung in einem Stauprognosesystem. Streng genommen handelt es sich nicht immer um ein Datenerfassungssystem sondern auch um Modelle und Informationssysteme, in welchen Daten abgelegt oder aufbereitet sind (z.B. Verkehrsnachfragematrizen, Netzmodelle).

Tabelle 30 Untersuchte Verkehrsdatenerfassungssysteme

Datenerfassungssystem	Kurzbeschreibung	Output für mögliche Verwendung im Stauprognosesystem
A1: Verkehrsnachfragematrizen aus dem nationalen Verkehrsmodell	Im nationalen Verkehrsmodell (Personen, Güter) sind Verkehrsnachfragematrizen für den Personen- und Güterverkehr für definierte Zeitzustände enthalten.	Nachfragematrizen und Netzbelastungen für verschiedene Verkehrszustände für die gesamte Schweiz (Ausgangsbasis für modell- oder simulationsgestützte Stauprognosen)
A2: Strassennetzdaten	Im Nationalen Verkehrsmodell wird das Schweizer Strassennetz abgebildet. Je Streckenabschnitt sind Attribute wie Lage, Länge, Kapazität und Geschwindigkeit hinterlegt.	Strassennetz mit Strecken und Knoten (Stand 2005 bzw. 2010), Kapazitäten und Geschwindigkeiten bei freiem Verkehrsfluss je Abschnitt (Ausgangsbasis für modell- oder simulationsgestützte Stauprognosen)
A3: Induktionsschlaufen	Rund 400 Verkehrszähler des Bundes (ASTRA) erfassen Fahrzeuge auf dem Schweizer Nationalstrassennetz. Diese Erfassung erfolgt permanent je Fahrstreifen und Richtung sowie teilweise auch die Fahrzeugtypen. Weitere Verkehrszähler befinden sich auf Hauptverkehrsstrassen.	Anzahl Fahrzeuge im Beobachtungsintervall, Verkehrsstärke je Fahrzeugklasse, lokale Geschwindigkeit, Verkehrsdichte, Belegungsgrad, Schwerverkehrsanteil (historische und aktuelle Verkehrsdaten)
A4: Bluetooth	Mit Bluetooth-Erkennung werden aktive und sichtbare Bluetooth-Geräte (Freisprecheinrichtung, Navigationssystem, Mobiltelefon etc.) an zwei lokalen Beobachtungspunkten aufgrund ihrer Bluetooth-ID erfasst.	Geschwindigkeit zwischen zwei Beobachtungspunkten (historische und aktuelle Verkehrsdaten)
A5: Floating Car Data	Mittels Floating Car Data wird die Fahrzeugposition zu einem bestimmten Zeitpunkt im Fahrzeug per GPS erfasst. Bei Extended FCD werden zusätzl.h Fahrzeugdaten aus den im Fahrzeug verbauten Systemen (ABS, ESP, ASR etc.) erfasst, um Umfelddaten (z.B. Aquaplaning, Glätte, Sichtweiten) zu bestimmen.	Mittlere Reisezeit auf einem Streckenabschnitt und damit Geschwindigkeit, Strassenzustand (Extended FCD) (historische und aktuelle Verkehrsdaten)
A6: Floating Phone Data	Mittels Floating Phone Data werden die Position von Mobiltelefonen zu einem bestimmten Zeitpunkt (kontinuierliche Messung bzw. Übertragung) strassenseitig erfasst. Dabei muss eine Zuordnung, ob sich das mobile Gerät in einem Fahrzeug des fliessenden MIV befindet, stattfinden.	Mittlere Reisezeit auf einem Streckenabschnitt und damit Geschwindigkeit (historische und aktuelle Verkehrsdaten)
A7: Videokameras	Videokameras mit digitaler Bildauswertung erfassen an bestimmten Stellen des Strassennetzes das Verkehrsgeschehen. Dabei werden die Verkehrsstärke und die lokale Geschwindigkeit gemessen. Weiter können Ereignisse detektiert werden.	Anzahl Fahrzeuge im Beobachtungsintervall, Verkehrsdichte und Belegungsgrad, Ereignisse (historische und aktuelle Verkehrsdaten)
A8: Automatische Nummernschilderkennung	Mit der automatischen Nummernschilderkennung werden Fahrzeuge an zwei lokalen Beobachtungspunkten erfasst. Dabei wird die Reisezeit und die Anzahl Fahrzeuge erfasst.	Abschnittsbezogene Reisegeschwindigkeit (historische und aktuelle Verkehrsdaten)
A9: Infrarot	Meist im Rahmen von verkehrsabhängigen Lichtsignalsteuerungen werden Fahrzeuge mittels Infrarot erfasst. Dabei wird die Fahrzeugkategorie aufgrund der Fahrzeuglänge bestimmt.	Anzahl der Fahrzeuge im Beobachtungsintervall, Fahrzeugkategorie, Verkehrsdichte, Belegungsgrad, lokale Geschwindigkeit (historische und aktuelle Verkehrsdaten)
A10: Radar/Mikrowellen	Meist bei mobilen Verkehrszählungen und Geschwindigkeitskontrollen werden die Fahrzeuge mit Radar/Mikrowelle erfasst. Dabei	Anzahl Fahrzeuge im Beobachtungsintervall, Verkehrsdichte, Belegungsgrad, lokale Geschwin-

	werden die Verkehrsstärke und die lokale Geschwindigkeit erfasst. Auch Fahrzeugklassen PW/LW können erfasst werden	digkeit (historische und aktuelle Verkehrsdaten)
A11: Ultraschall	Meist bei mobilen Verkehrszählungen und Geschwindigkeitskontrollen werden die Fahrzeuge mit Ultraschall erfasst. Dabei werden die Verkehrsstärke und die lokale Geschwindigkeit erfasst. Fahrzeugklassen PW/LW können erfasst werden	Anzahl Fahrzeuge im Beobachtungsintervall, Verkehrsdichte, Belegungsgrad, lokale Geschwindigkeit (historische und aktuelle Verkehrsdaten)
A12: Luftbilder	Erfassung der flächendeckenden Verkehrslage auf dem übergeordneten Strassennetz mittels Luftbildern. Durch digitale Bildauswertung kann die Verkehrsdichte ermittelt werden.	Verkehrslage und Verkehrsdichte für einen bestimmten Zeitpunkt (historische Verkehrsdaten)
A13: Flugzeuggetragene Radarsystem SAR	Erfassung der flächendeckenden Verkehrslage auf dem übergeordneten Strassennetz mittels Flugzeuggetragener Radarsysteme. Durch digitale Bildauswertung kann die Verkehrsdichte und Geschwindigkeit ermittelt werden.	Verkehrslage, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit für einen bestimmten Zeitpunkt (historische Verkehrsdaten)
A14: Satellitenge-tragene Radar-systeme SAR	Erfassung der flächendeckenden Verkehrslage auf dem übergeordneten Strassennetz mittels Satellitenge-tragener Radarsysteme. Durch digitale Bildauswertung kann die Verkehrsdichte und Geschwindigkeit ermittelt werden.	Verkehrslage, Verkehrsdichte und Geschwindigkeit für einen bestimmten Zeitpunkt (historische Verkehrsdaten)

Bei den Verkehrsdaten wurden die Datenerfassungssysteme Luftbilder, Flugzeuggetragene Radarsysteme SAR und Satellitenge-tragene Radarsysteme nicht weiter vertieft, da sie nach heutigem Stand kurz- und mittelfristig kaum für Stauprognosesysteme zur Verfügung stehen und genutzt werden können.

5.2.3 Umfelddaten

Nachfolgend sind die untersuchten Umfelddatenerfassungssysteme kurz beschrieben inkl. des Outputs für eine mögliche Verwendung in einem Stauprognosesystem.

Tabelle 31 Untersuchte Umfelddatenerfassungssysteme

Datenerfassungssystem	Kurzbeschreibung	Output für mögliche Verwendung im Stauprognosesystem
B1: Wetter	Über Agroscope und SMA können Wetterdaten wie Lufttemperatur, Niederschlag etc. als Ist-Zustand, Prognose oder historische Daten bezogen werden.	Wetterlage historisch, aktuell und prognostiziert
B2: Strassenzustand (Truckinfo)	Unter www.truckinfo.ch kann der Strassenzustand grafisch abgefragt werden. Dabei werden die Behinderungen des Verkehrs je Streckenabschnitt angezeigt.	Art der Behinderung (z.B. Schnee), Strasse, Richtung, Anfangs- und Endpunkt des betroffenen Abschnittes, Dauer der Behinderung (soweit bekannt)
B3: Strassenzustand (Glatteismeldeanlagen)	Glatteismeldeanlagen messen konstant die Zustandsdaten (Temperatur, Feuchtigkeit, Niederschlag etc.) der Fahrbahn. Aufgrund der Messdaten wird berechnet, ob eine Gefahr durch Schnee-/Eisglätte vorhanden ist.	Angaben zur Gefahr von Schnee-/Eisglätte

5.2.4 Ereignisse und Gefahren (planbar)

Nachfolgend sind die untersuchten Ereignis- und Gefahrendatenerfassungssysteme (planbar) kurz beschrieben inkl. des Outputs für eine mögliche Verwendung in einem Stauprognosesystem.

Tabelle 32 Untersuchte Ereignis- und Gefahrendatenerfassungssysteme

Datenerfassungssystem	Kurzbeschreibung	Output für mögliche Verwendung im Stauprognosesystem
C1 Baustellen - Truckinfo	Unter www.truckinfo.ch kann der Strassenzustand grafisch abgefragt werden. Dabei wer-	Art der Behinderung und getroffene Massnahme,

	den die Behinderungen des Verkehrs infolge von Baustellen je Streckenabschnitt angezeigt.	Strasse, Richtung, Anfangs- und Endpunkt des betroffenen Abschnittes, Dauer der Behinderung (soweit bekannt)
C2: Veranstaltungen	Unter www.eventkalender.ch können Angaben zu Veranstaltungen in verschiedenen Kategorien nach Veranstaltungsort abgerufen werden.	Anzahl Events pro Datum, evtl. Anzahl Besucher
C3: Ferienkalender	Unter www.feiertagskalender.ch können die Feiertage und Schulferien in Europa abgefragt werden.	Daten von Feiertagen und Schulferien bis 2035. Räumliche Auflösung Schweiz bis auf Stufe Gemeinde; im Ausland nach Regionen (z.B. Deutschland, Frankreich, Italien, Österreich)

5.2.5 Ereignisse und Gefahren (nicht planbar)

Nachfolgend sind die untersuchten Ereignis- und Gefahrendatenerfassungssysteme (nicht planbar) kurz beschrieben inkl. des Outputs für eine mögliche Verwendung in einem Stauprognosesystem.

Tabelle 33 Untersuchte Ereignis- und Gefahrendatenerfassungssysteme

Datenerfassungssystem	Kurzbeschreibung	Output für mögliche Verwendung im Stauprognosesystem
D1 Unfalldaten (historisch, aktuell)	In der Unfalldatenbank des ASTRA (MISTRA Fachapplikation VU) sind alle von der Polizei aufgenommen Unfälle auf öffentlichen Strassen enthalten. Die Erfassung erfolgt jedoch nicht direkt während der Unfallaufnahme, somit sind aktuelle Daten nicht verfügbar, sondern nur historische.	Unfallort, Unfalltyp, beteiligte Fahrzeuge, Verkehrssituation zum Zeit des Unfalls
D2: Polizeiliche Meldungen/Verkehrsmeldungen (kein eigentliches Datenerfassungssystem)	Polizeiliche Meldungen umfassen Sperrungen von Tunnels, Strassenabschnitten sowie von Ein- und Ausfahrten, Ableitungen und lokale Umleitungen, Kettenobligatorium und weitere polizeiliche Anordnungen. Verkehrsmeldungen umfassen Informationen über Sperrungen, Behinderungen sowie Stau (Zeitverluste, Staulängen etc.) und Gefahrensituationen (Falschfahrer, Gegenstände oder Tiere auf der Fahrbahn etc.) auf dem übergeordneten Strassennetz. (B+S AG, 2011)	Angaben zum Netzzustand und –verfügbarkeit sowie Gefahrensituationen, Verkehrsmeldungen über Sperrungen, Behinderungen und Stau
D3: VM-Massnahmen (kein eigentliches Datenerfassungssystem)	Aufgrund der Erfassung von querschnittsbezogenen und streckenbezogenen Verkehrsdaten (Verkehrsmengen, mittlere Geschwindigkeit, Verkehrsdichte etc.) und Beobachtungen mittels Verkehrsfernsehen werden Aktionen des Verkehrsmanagements wie Informieren, Leiten, Lenken und Steuern ausgelöst.	Angaben zu Netzzustand und –verfügbarkeit, Schaltzustände von VM-Anlagen

5.3 Verkehrsdaten für das Verkehrsmonitoring, die Verkehrsinformation und das Verkehrsmanagement

5.3.1 Einleitung

Verkehrsdaten werden in der Schweiz für verschiedene Anwendungen erfasst. Die wichtigsten sind das Verkehrsmonitoring, die Verkehrsinformation und das Verkehrsmanagement. Dabei werden Daten verwendet und aufbereitet, welche grundsätzlich auch von einem Stauprognosesystem genutzt werden können. Nachfolgend ist für die drei Anwen-

dungen der heutige Stand dargestellt.

Die nachfolgende Darstellung gibt einen Überblick über die Nutzung und den Verwendungszweck von Verkehrsdaten [ASTRA 2013].

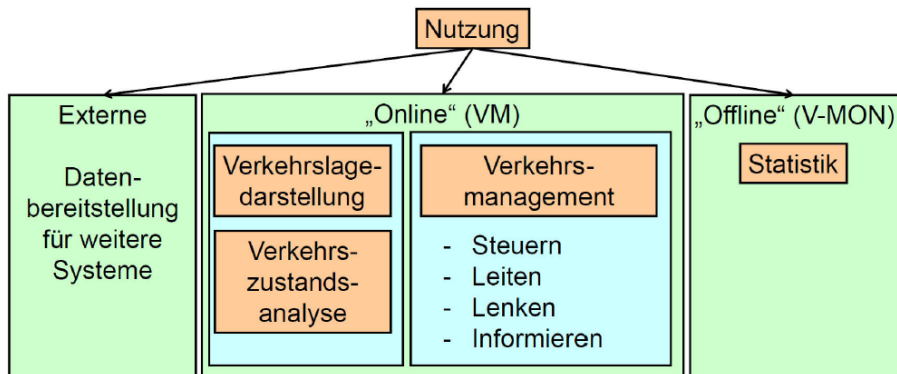


Abbildung 32 Überblick über Nutzung und Verwendungszweck von Verkehrsdaten [ASTRA, 2013]

Eine Online Nutzung besteht für das Verkehrsmanagement (VM, inkl. Verkehrsinformation), eine Offline Nutzung besteht für das Verkehrsmonitoring (V-MON). Eine externe Nutzung (offline oder online) durch private Dienstleister (Viasuisse, TCS etc.) ist möglich.

5.3.2 Verkehrsdaten für das Verkehrsmonitoring

Im Rahmen der statistischen Erhebungen des Bundes führt das Bundesamt für Strassen (ASTRA) seit Jahrzehnten automatische Dauerzählungen/Messungen und periodisch manuelle Strassenverkehrszählungen durch. Innerhalb der Abteilung Strassennetze betreut der Fachbereich Verkehrsmonitoring diese Erhebungen. Dieses Aufgabengebiet umfasst im Einzelnen

- den Betrieb und Weiterausbau eines Netzes von Zählstellen und Messstationen auf den wichtigsten Strassenverbindungen der Schweiz
- die zentrale Erfassung, Aufbereitung und Auswertung der Strassenverkehrsdaten
- die Datenverbreitung und statistische Publikationen
- die nationale und internationale Koordination der Strassenverkehrsstatistik
- die Mitwirkung bei Verkehrserhebungen der Kantone und anderer Bundesämter.

Die für das Verkehrsmonitoring massgebenden Erhebungen sind die Schweizerische automatische Strassenverkehrszählung (SASVZ), die Schweizerische Strassenverkehrszählung (SSVZ) und die Gewichtserfassung.

Das Bundesamt für Strassen unterhält seit 1961 auf den wichtigsten Strassenverbindungen ein Netz von permanenten automatischen Verkehrszählstationen. Bis Ende Mai 2013 ist deren Anzahl auf rund 460 angestiegen (www.astra.admin.ch). Eine dynamische Karte mit dem Messstellennetz befindet sich auf der Homepage des ASTRA (www.astra.admin.ch).

Das Ziel ist eine lückenlose Erfassung des Verkehrs nach Richtung und Zeit (Stunden). Ausgewertet werden u.a. die beiden Kennwerte DTV und DWV (www.astra.admin.ch). Beim durchschnittlichen Tagesverkehr (DTV) wird der Mittelwert des 24-Stundenverkehrs aus allen Tagen des Jahres gebildet. Für Strassen mit Wintersperre wird diese Erfassung für die Oeffnungsperiode berechnet. Beim durchschnittlichen Werktagsverkehr (DWV) wird der Mittelwert des 24-Stundenverkehrs aus allen Werktagen (Montag - Freitag) mit Ausnahme von Feiertagen gebildet. Für Strassen mit Wintersperre gilt die gleiche Berechnungsart wie beim DTV. Die Datenerfassung erfolgt mit in die Fahrbahn integrierten Induktionsschleifen und mit damit verbundenen Erfassungsgeräten werden die Fahrzeuge detektiert. Bei SWISS 10 Messstellen können auch die Fahrzeugkategorien erhoben werden.

Die Datenübertragung erfolgt täglich durch ein automatisches Abfragesystem. Die Vali-

dierung der Daten erfolgt in drei Schritten: Tages-, Monats- und Jahresverarbeitung. Aus diesen Daten werden weitere Werte ermittelt: Periodenergebnisse, Ganglinien (Tag, Woche, Jahr), Mittelwerte (täglich, monatlich, jährlich, periodisch), Spitzenwerte.

Die Monats- und Jahresergebnisse können als Excel-Files von der Homepage des ASTRA heruntergeladen werden (offline).

Die bis im Jahr 2005 fünfjährlich durchgeführte Schweizerische Strassenverkehrszählung (SSVZ) wurde durch die Dauerzählungen des ASTRA (SASVZ) vollständig abgelöst (www.astra.admin.ch). Das Netz von permanenten automatischen Messstellen wird kontinuierlich ausgebaut und modernisiert. Bis im Jahr 2015 soll eine vergleichbare Messstellendichte wie bei der SSVZ 2005 zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse dieser Dauererhebung sind im Vergleich zu der früheren Stichproben-Methodik von deutlich verbesserter Qualität und Aktualität.

Das ASTRA betreibt auf dem Nationalstrassennetz in Zusammenarbeit mit den Kantonen zurzeit acht Anlagen für die Erfassung der Fahrzeugachslasten während der Fahrt (WIM - Weigh In Motion, www.astra.admin.ch). Mit WIM-Anlagen können für jedes einzelne Fahrzeug Gesamtgewicht, Achslasten, Achsabstände, Fahrzeugkategorie, Geschwindigkeit, Fahrzeuglänge und Zeitlücken aufgezeichnet und statistisch ausgewertet werden. Die Ergebnisse dienen der Dimensionierung der Strassen und Kunstbauten, der Unterhaltsplanung, Sicherheit, Ökonomie, Transportstudien, Forschung (z.B. Kunstbauten) und weiteren verkehrsbezogenen Zwecken. Zudem werden die Anlagen auch von der Polizei für die Vorselektion bei Schwerverkehrskontrollen eingesetzt.

Die Fachapplikation Verkehrsmonitoring (VMON) ist eine Fachapplikation des Managementinformationssystems des ASTRA (MISTRA). Sie dient der Erfassung und Aufbereitung von Verkehrszählungen und der Verwaltung des Messstellennetzes. Zusätzlich verfügt die Fachapplikation über zahlreiche Import-, Export- und Reportingfunktionen [ASTRA, 2012]. Die aufbereiteten Verkehrsdaten werden dem MISTRA Basissystem zur Verfügung gestellt. Die Architektur von VMON geht aus der folgenden Abbildung hervor:

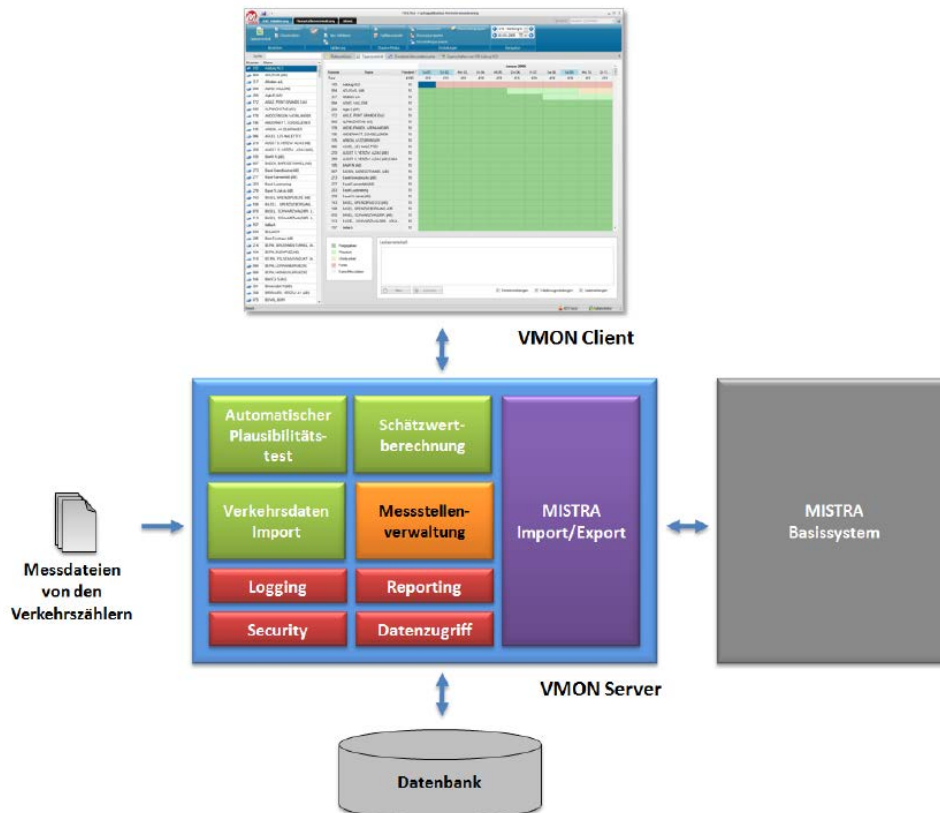


Abbildung 33 Architekturübersicht Fachapplikation VMON [ASTRA, 2012]

Im Anwendungshandbuch Verkehrsmonitoring [ASTRA 2012] sind neben der System-

übersicht die Grundfunktionen sowie die Fachmodule AVZ Validierung und Messstellenverwaltung und die Prozessautomation im Detail beschrieben.

Offline Verkehrsdaten werden heute für folgende Zwecke verwendet [ASTRA 2013]:

- Verkehrsstatistik: Verkehrsbelastungen, Ganglinien, Spitzenwerte, Verkehrsverteilung, Verkehrsfluss, Staubericht usw.
- Planungs- und Entscheidungsgrundlagen für Infrastrukturplanung, Erhaltungsplanung, Verkehrsmanagement, Verkehrsprognosen
- Verkehrsmodell, Simulationen
- Umwelt-Auswertungen (Luftqualität, Lärm)

Es können folgende Folgerungen für ein Stauprognosesystem abgeleitet werden:

- Aus dem Verkehrsmonitoring sind aufbereitete und aggregierte Verkehrsdaten verfügbar. Es werden verschiedene Kenngrößen (DTV, DWV) und Ganglinien bereitgestellt.
- Das Stauprognosesystem erfordert für kurzfristige Prognosen eine online Nutzung der Verkehrsdaten aus dem Messstellennetz. Eine direkte Verwendung von aufbereiteten Verkehrsmesswerten für ein Stauprognosesystem ist für mittel- und längerfristige Prognosen sinnvoll (und ev. für eine tägliche Basisprognose).

5.3.3 Verkehrsdaten für die Verkehrsinformation (ViaSuisse)

ViaSuisse ist die nationale Verkehrsinformationszentrale der Schweiz. Aus einer Vielzahl von Quellen (Polizei, ASTRA, Kantone, Städte, SBB, Postauto Schweiz, Meteo, Stau-melder, Parkings, Webcams, Sensoren, FCD, GPS) werden die gelieferten Daten bzw. Meldungen aufbereitet und im vom Kunden gewünschten Format abgegeben (www.viasuisse.ch).



Abbildung 34 Workflow ViaSuisse (www.viasuisse.ch)

Bei der Datenerfassung strebt ViaSuisse – wo möglich und sinnvoll – eine Automatisierung an (www.viasuisse.ch). So kann sich die Fachredaktion auf das Kerngeschäft der kundenspezifischen Aufbereitung der Daten und die sorgfältige Überwachung der Meldungsqualität konzentrieren.

ViaSuisse kann für alle Kanäle Verkehrsinformationen in einem geeigneten Format zur Verfügung stellen: Audio, Video, Grafik, Text, Daten (XML, HTML etc.) und Karten. Zudem entwickelt ViaSuisse eigene Formate, die den Vorgaben und Wünschen von Business-to-Business-Kunden aus dem Kreis der Aktionäre und von Dritten entsprechen.

ViaSuisse arbeitet mit neuen Technologien zur Beschaffung von Verkehrsflussdaten (Flow-Daten). Zur Erhebung von Flow-Daten werden anonymisierte GPS-Positions- und Geschwindigkeitsdaten aus verschiedenen Fahrzeugen erfasst und verarbeitet. Ausserdem hat die Redaktion Zugriff auf fix installierte Verkehrsüberwachungskameras und

Sensoren.

Die ViaSuisse bietet folgende Produkte an:

- Radiomeldungen: entsprechend den Bedürfnissen der Radiosender werden die Verkehrsmeldungen aufbereitet und geliefert.
- Online: Der TCS betreibt unter www.strasseninfo.ch eine Karte für die TCS-Verkehrsinfos, die ihre Daten von ViaSuisse bezieht.
- Mobile: Vom Schweizer Radio und Fernsehen (SRF) gibt es die gratis iPhone-App für die Routenplanung unterwegs.
- Klassisch: Klassische Kanäle für ViaSuisse-Verkehrsinformationen sind RDS-TMC-Meldungen und Navigationsgeräte, Teletext, Telefondienst 163 inkl. SMS-Services oder Printmedien.

Im Auftrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA hat ViaSuisse das Mandat für die „Verkehrsinformationszentrale Schweiz“ im Rahmen des ASTRA-Projektes „Verkehrsmanagement Schweiz“ übernommen.

Folgerungen für ein Stauprognosesystem:

- ViaSuisse bereitet aus verschiedenen Quellen Verkehrsinformationen für den Strassennutzer und –betreiber auf, wobei verschiedene Kanäle der Informationsverbreitung genutzt werden.
- Denkbar wäre eine Nutzung der erfassten Floating Car Daten, wenn diese den Qualitätsansprüchen für die Erfassung von streckenbezogenen Kennwerten (Geschwindigkeiten, Reisezeiten) genügen.
- Staumelderinformationen und Web-Cams könnten zur Validierung der Stauererkennung eingesetzt werden.

ViaSuisse selbst wäre ein möglicher Nutzer des Output eines Stauprognosesystems.

5.3.4 Verkehrsdaten für das Verkehrsmanagement

Mit der Neuordnung des Finanzausgleichs und der Aufgabenteilung zwischen Bund und Kantonen (NFA) hat das schweizerische Bundesparlament nicht nur das Eigentum der Nationalstrassen von den Kantonen auf den Bund übertragen, sondern auch das Verkehrsmanagement (VM). Seit dem 1. Januar 2008 sind nicht mehr die Kantone auf den Autobahnen für das VM zuständig, sondern der Bund (www.astra.admin.ch).

Unter VM sind alle Massnahmen zusammengefasst, die den herrschenden Verkehr möglichst gleichmässig, ruhig, störungsfrei, emissionsarm und sicher fliessen lassen. Die vier Funktionen des VM sind Verkehrslenkung, Verkehrsleitung, Verkehrssteuerung und Verkehrsinformation.

Die Verkehrsmanagementzentrale (VMZ-CH) in Emmen ist zuständig für das operative Verkehrsmanagement auf den Nationalstrassen [ASTRA, 2008b]. Die VMZ-CH erfasst und analysiert laufend die aktuelle Verkehrssituation und ordnet vorausschauend oder zur Bewältigung aktueller Vorkommnisse die notwendigen Verkehrsmanagement-Massnahmen an. Zu den Aufgaben der VMZ gehören unter anderem auch das Erheben und Erfassen von Verkehrszuständen und Ereignissen, das Beurteilen der Verkehrslagen und Erkennen von allfälligem Handlungsbedarf auf Basis von vorgängig definierten Schwellenwerten, das Anordnen von Massnahmen zur Optimierung des Verkehrsflusses in enger Zusammenarbeit mit den betroffenen Stellen bei Bund und Kantonen und die Vorbereitung des Verkehrsmanagements bei planbaren Ereignissen wie Baustellen oder Grossveranstaltungen.

Wichtigste Voraussetzung für den Betrieb eines wirksamen und ausgereiften VM ist die Kenntnis der heutigen (und künftigen) Verkehrslage. Zur Beschaffung der Daten zur aktuellen Verkehrslage dienen heute die automatische Verkehrszählung an ausgewählten Standorten und die systematische Beobachtung des Verkehrs mittels Videokameras.

Das ASTRA betreibt heute ein Zählstellennetz mit ca. 490 Zählstellen, deren Verkehrsdaten für das Verkehrsmanagement (VM) und die Verkehrsstatistik bzw. das Verkehrsmonitoring (V-Mon) verwendet werden [ASTRA, 2013]. In der Regel liegen die Messstellen auf

der durchgehenden Fahrbahn, d. h. zwischen zwei Anschlüssen. Weiter bestehen VM-Anlagen wie Verkehrsleitsysteme (VLS), Tunnel-Verkehrssteuerungsanlagen und Lichtsignalanlagen (LSA) mit direkt eingebundenen Verkehrszählern. Die nachfolgende Abbildung gibt eine Übersicht über die Verkehrserfassung auf den Nationalstrassen.

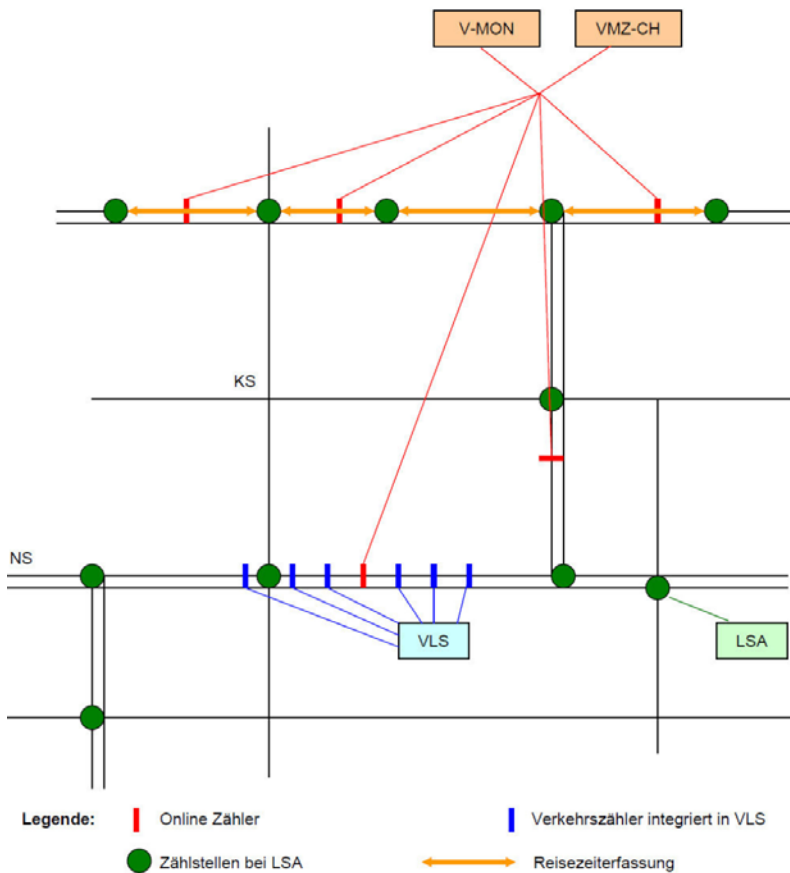


Abbildung 35 Verkehrserfassung Nationalstrassen [ASTRA, 2013]

Die heutige Verkehrsdatenerfassung ist auf Querschnitte und nicht auf Strecken ausgerichtet. Es ist dem ASTRA jedoch bewusst, dass die Erfassung von streckenbezogenen Kennwerten (Reisezeiten, Reisegeschwindigkeiten) die Qualität der Verkehrslagebeurteilung, d. h. der lokalen Verkehrszustände und der globalen Verkehrslage stark verbessern könnte [ASTRA, 2013]. Eine qualitativ hochstehende Online-Verkehrslage ist eine entscheidende Voraussetzung für das Auslösen von Verkehrsmanagement-Massnahmen (Lenken, Leiten, Steuern, Informieren). Das ASTRA hat für alle Gebietseinheiten die globalen Verkehrsmanagement-Konzepte erstellt. Daraus ergeben sich zusätzliche Bedürfnisse bezüglich Verkehrsdatenerfassung.

Das ASTRA ist deshalb zur Zeit daran, ein Konzept Verkehrsdatenerfassung für das Verkehrsmanagement Schweiz (VM-CH) zu erarbeiten, welches querschnitts- und streckenbezogene Verkehrsdaten einschliesst [ASTRA, 2013]. Bearbeitungsbereich ist primär die Nationalstrasse inkl. Netzergänzungen gemäss Netzbeschluss.

Heute verwendet das ASTRA die Verkehrsdaten für das Verkehrsmanagement online und für die Verkehrsstatistik offline. Zukünftig sollen alle Verkehrszähler grundsätzlich als Online-Zählstellen verwendet werden [ASTRA, 2013]. Alle erfassten Verkehrsdaten sollen für die Ermittlung der globalen Verkehrslage, das übergeordnete und das lokale Verkehrsmanagement bereit gestellt werden. Damit steigt der Bedarf an Online Verkehrsdaten und die Bereitstellung der Daten sollte beschleunigt werden.

Bezüglich querschnittsbezogener Daten (Schwerpunkt der heutigen Verkehrsdatenerfassung) sind folgende veränderten Anforderungen zu beachten [ASTRA, 2013]:

- Querschnittsdaten sind punktuell erhobene Verkehrsdaten die an einem Querschnitt erhoben werden (Verkehrsmenge, Einzelfahrzeug-Geschwindigkeit, Fahrzeugklassen etc.)
- Das künftige Verkehrsmanagement erfordert eine online Nutzung sämtlicher Verkehrszähler und eine Verdichtung des Messstellennetzes. Dies insbesondere in vom Verkehrszustand her kritischen Abschnitten. Die nachfolgende Abbildung zeigt den angestrebten Ausrüstungsgrad.

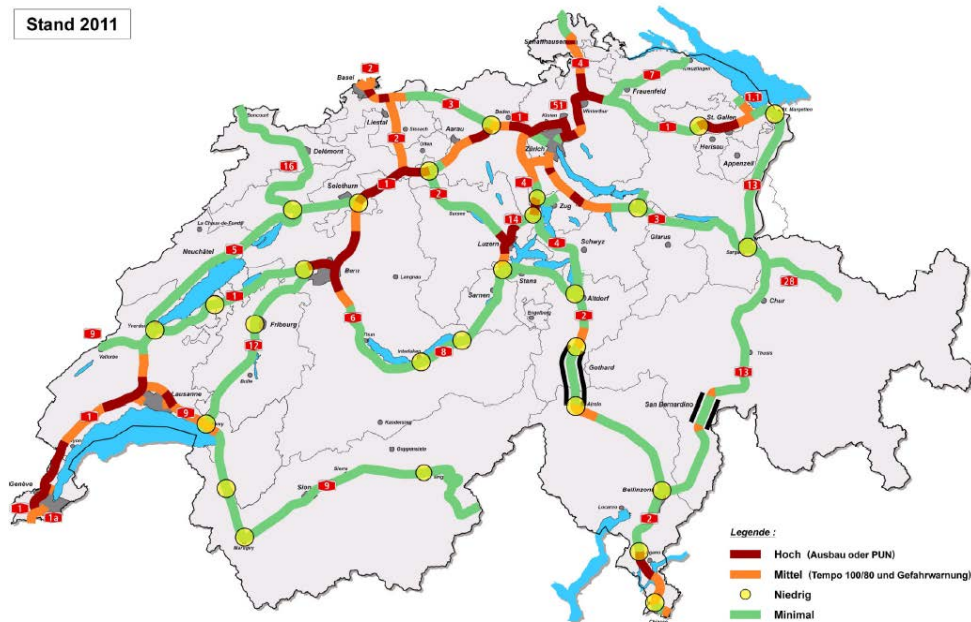


Abbildung 36 Angestrebte Ausrüstungsgrade auf den Nationalstrassen (ASTRA)

- Im Rahmen des MISTRA-Teilprojektes VMON können in Zukunft auch die kantonalen Verkehrszähler auf dem Schweizerischen Strassennetz besser berücksichtigt werden (Verkehrsstatistik).
- Für das Verkehrsmanagement wären einfachere Zähler denkbar, die nur noch zwei Fahrzeugklassen unterscheiden können müssen (PW, LW). Damit könnte es in Richtung Beschaffung von Low Cost Zählern gehen mit einer entsprechend höheren Installationsdichte.
- Für das Verkehrsmanagement sind kürzere Zeitintervalle wichtig. Für die Online-Zähler beträgt das aktuelle Zeitintervall 3 Minuten. Die VM-Anlagen verwenden unterschiedliche Zeitintervalle, von 30 Sekunden bis 5 Minuten. Eine Vereinheitlichung der Zeitintervalle für die Datenverdichtung für die Online Verkehrszähler wird erforderlich.
- Die heute fest installierten Zählgeräte decken nicht alle Bedürfnisse ab (z.B. korrekte Zählungen in Bereichen von Baustellen). Für Baustellenbereiche sollen mobile, fahstreifenunabhängige Verkehrszählgeräte zum Einsatz kommen.
- Für die Beschaffung von Verkehrszählgeräten sollen auch neue Technologien berücksichtigt werden, weshalb vermehrt funktionale Ausschreibungen erfolgen sollen. Mittels einer Standardisierung soll der Output der Verkehrsdatenerfassung vereinheitlicht werden.

Bezüglich streckenbezogenen Daten (heute noch kein Schwerpunkt der Verkehrsdatenerfassung) sind folgende veränderten Anforderungen zu beachten [ASTRA, 2013]:

- Streckendaten sind streckenbezogene Verkehrsdaten wie Reisezeiten oder Reisegeschwindigkeiten in einem definierten Abschnitt (z.B. zwischen zwei Autobahnanschlüssen).
- Für das zukünftige Verkehrsmanagement ist die Verfügbarkeit von streckenbezogenen Verkehrsdaten unerlässlich. Dabei werden flächendeckende Online-Reisezeiten bzw. Reisegeschwindigkeiten benötigt. Eine entsprechende Beschaffung ist im

Gänge (Swisscom Fingerprinting Methode). Im Minimum sollen für hochbelastete Abschnitte und Anschlüsse entsprechende Kenngrößen zur Verfügung stehen.

Heute existieren unterschiedliche Quellen für Verkehrsdaten, welche hauptsächlich nur für einen bestimmten Zweck genutzt werden. Künftig ist die Systemarchitektur so vorzusehen, dass die Verkehrsdaten aus den unterschiedlichen Erfassungssystemen zusammengeführt werden. Dies geht aus der nachfolgenden Darstellung hervor:

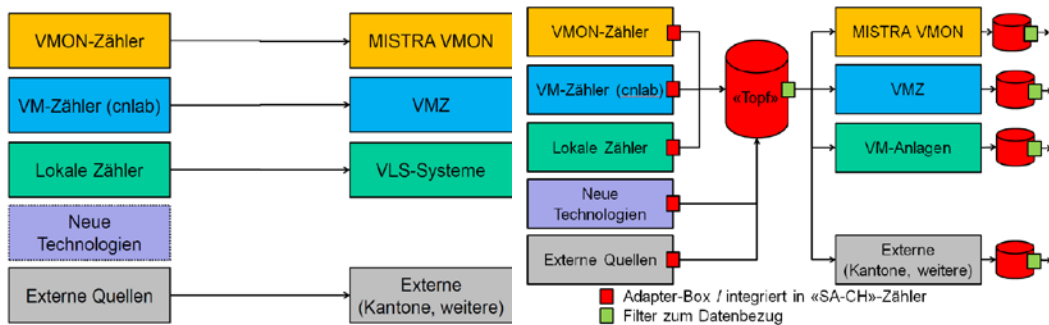


Abbildung 37 Ist- und Soll-Zustand für die Vernetzung und den Austausch von Verkehrsdaten [ASTRA, 2013]

Daraus lassen sich Folgerungen für die Konzeption eines Stauprognosesystems ableiten:

- Die Umstellung von Offline zu Online Zählern und die räumliche Verdichtung verbessert auch die Qualität der Verkehrsdatenerfassung als Input für ein Stauprognosesystem. Die Verfügbarkeit von online-Daten ist eine absolute Voraussetzung für das Prognosesystem.
- Der Einbezug der kantonalen Verkehrszähler verbessert die Erfassung der Verkehrslage in Anschlussbereichen und auf Hauptverkehrsstrassen.
- Der vermehrte Einsatz von mobilen Zählgeräten im Bereich von Baustellen ermöglicht und verbessert die Verkehrserfassung bei Baustellen.
- Die angestrebte Harmonisierung der Funktionalitäten und des Outputs führt direkt auch zu einem einheitlicheren Input für ein Stauprognosesystem.
- Die bessere Verfügbarkeit von streckenbezogenen Verkehrsdaten (Abschnittsgeschwindigkeiten, Reisezeiten) ermöglicht eine Verkehrslageerfassung von höherer Qualität.
- Die angestrebte Entwicklung führt zu einer verbesserten Verkehrsdatenerfassung und damit auch zu Qualitätssteigerungen für ein Stauprognosesystem.
- Vereinfachte Zähler sind für eine Prognose in der Regel ausreichend. Wichtig ist, dass die Daten (über Zeitstempel o. ä.) mit anderen Daten kombiniert werden können (Basis für die Prognose).
- Die Verkehrsmanagementzentrale ist ein möglicher Nutzer von Stauprognosesystemen.

5.4 Beurteilung der Datenerfassungssysteme

5.4.1 Beurteilungskriterien und –skala

Für die Beurteilung der Eignung der Datenerfassungssysteme bzw. der Daten für die Verwendung in einem Stauprognosesystem wurden die drei Hauptkriterien Erhebungsqualität, Datenverfügbarkeit und der Datenzugang beurteilt. Diese werden nachfolgend näher erläutert.

Erhebungsqualität:

Es wurden die Genauigkeit der Messgrößen, die Betriebszuverlässigkeit und die Vollständigkeit der Daten beurteilt.

- Genauigkeit der Messgrößen: Abweichung des Messwertes zum effektiven Wert
- Betriebszuverlässigkeit: gemessene Stunden/Total Stunden je Einsatzzeitraum
- Vollständigkeit: Anzahl verwendbare Messungen/Total an Messungen pro Jahr

Datenverfügbarkeit:

Es wurde beurteilt, ob die Daten in der Schweiz überhaupt verfügbar sind (werden die Daten überhaupt erhoben) und die gewünschten Daten liefern. Ebenfalls wurde das Übermittlungsintervall bei Online-Daten bzw. der vorhandene Zeitraum bei historischen Daten beurteilt.

- Abdeckung Strassennetz: Streckenlänge mit gültigen Messwerten/Total der Streckenlänge
- Erfassungszeitraum: gemessene Stunden/Total Stunden pro Jahr

Datenzugang:

Es wurde beurteilt, inwiefern ein Datenzugang vorhanden ist. Dieser umfasst die Möglichkeit des Datenzugriffs aus der Sicht des Strassenbetreibers.

Für die Beurteilung wurde eine dreistufige Skala verwendet (gut, mittel, schlecht).

Tabelle 34 Verwendete Beurteilungsskala

Hauptkriterium	Unterkriterien	Skala	
Erhebungsqualität	Genauigkeit der Messgrößen	< +- 5% < +- 10% > +- 10%	gut mittel schlecht
	Betriebszuverlässigkeit	> 95% > 90% < 90%	gut mittel schlecht
	Vollständigkeit	> 95% > 90% < 90%	gut mittel schlecht
Datenverfügbarkeit	Aktualität: Übermittlungsintervall Online-Daten	< 1 Min. < 3 Min. > 3 Min.	gut mittel schlecht
	Zeitraum für historische Daten	> 5 Jahre 2 – 5 Jahre < 2 Jahre	gut mittel schlecht
	Abdeckung Strassennetz ³	> 75% > 50% < 50%	gut mittel schlecht
	Erfassungszeitraum	> 95% > 75% < 75%	gut mittel schlecht
Datenzugang	Datenzugriff	Datenzugriff uneingeschränkt möglich: Eingeschränkter Datenzugriff: kein Datenzugriff:	gut mittel schlecht

Da nur ausnahmsweise quantitative Grundlagen aus Testanwendungen oder Feldversuchen zur Verfügung standen, erfolgte die Beurteilung vorwiegend qualitativ.

5.4.2 Beurteilung der Eignung der Datenerfassungssysteme für Stauprognosesysteme

Die Beurteilung der Eignung der Datenerfassungssysteme für Stauprognosesysteme geht aus dem vertraulichen Arbeitsbericht „Datenerfassungssystembeschreibung und –beurteilungsblätter“ vom 20.9.2013 (unveröffentlicht) hervor. Diese ist nachfolgend tabel-

³ Hier des übergeordneten Strassennetzes (National- und Kantonsstrassen).

larisch zusammengefasst. Nicht für alle Datenerfassungssysteme sind alle Kriterien relevant (bezeichnet mit -).

Die Beurteilung erfolgte für die heutige Situation und zur Berücksichtigung der erwarteten weiteren technischen Entwicklung einen künftigen mittelfristigen Zustand in 5 bis 10 Jahren. Es handelt sich um eine grobe Einschätzung der Erhebungsqualität, Datenverfügbarkeit und des Datenzugangs.

Heutiger Zustand

Die folgende Tabelle zeigt die Beurteilung für den heutigen Zustand.

Tabelle 35 Eignung der Datenerfassungssysteme für die Stauprognose heute

	Erhebungsqualität					Datenverfügbarkeit				Datenzugang
	Genauigkeit	Messarössen	Betriebszuverlässigkeit	Vollständigkeit	Aktualität	Abdeckung	Strassennetz	Erfassungszeitraum	Datenzugriff	
Verkehrsdaten										
A1 Nachfragematrizen	schlecht	gut	mittel		mittel	gut	-		gut	
A2 Strassennetzdaten (Nationales Verkehrsmodell)	-	-	gut		gut	gut	-		gut	
A3 Induktionsschlaufen	gut	gut	gut		gut	schlecht	gut		gut	
A4 Bluetooth	mittel	gut	gut		gut	schlecht	gut		gut	
A5 Floating Car Data	mittel	gut	gut		gut	mittel	gut		mittel	
A6 Floating Phone Data	mittel	gut	gut		gut	gut	gut		mittel	
A7 Videokameras	mittel	gut	gut		mittel	schlecht	gut		schlecht	
A8 Automatische Nummernschilderkennung (ANPR)	mittel	gut	gut		gut	schlecht	gut		mittel	
A9 Infrarot	mittel	gut	gut		schlecht	schlecht	gut		schlecht	
A10 Radar/Mikrowellen	mittel	gut	gut		gut	schlecht	mittel		schlecht	
A11 Ultraschall	mittel	gut	gut		gut	schlecht	mittel		schlecht	
Umfelddaten										
B1 Wetter										
historisch	gut	gut	gut		gut	gut	gut		gut	
aktuell	gut	gut	gut		schlecht	gut	gut		gut	
B2 Strassenzustand – Truckinfo	gut	gut	gut		mittel	mittel	gut		gut	
B3 Strassenzustand - Glatteismeldeanlagen	mittel	gut	gut		gut	schlecht	gut		schlecht	
Ereignisse und Gefahren (planbar)										
C1 Baustellen – Truckinfo	gut	gut	gut		mittel	mittel	gut		gut	
C2 Veranstaltungen	gut	gut	mittel		mittel	gut	gut		mittel	
C3 Ferienkalender	gut	gut	gut		gut	gut	gut		gut*	
Ereignisse und Gefahren (nicht planbar)										
D1 Unfalldaten										
historisch	gut	mittel	gut		mittel	gut	gut		gut	
aktuell	gut	mittel	gut		schlecht	gut	gut		schlecht	
D2 Polizeiliche Meldungen/ Anordnungen/ Verkehrsmeldungen	mittel	mittel	mittel		mittel	mittel	mittel		mittel	
D3 VM-Massnahmen	gut	gut	mittel		mittel	schlecht	-		mittel	

Verkehrsdaten

Die Beurteilung der Datenerfassungssysteme hat gezeigt, dass die meisten Systeme der Erfassung von Verkehrsdaten eine mittlere bis gute Erhebungsqualität erreichen, d.h. wenn Daten erfasst werden, ist die Genauigkeit genügend gross, um für ein Stauprognose-

sesystem verwendet werden zu können. Bei der Datenverfügbarkeit zeigt sich hingegen ein inhomogeneres Bild. Die Abdeckung des Strassennetzes ist dabei der kritische Beurteilungspunkt. Nur wenige Systeme decken das Strassennetz umfassend ab. Die Hälfte der Systeme weist eine geringe Abdeckung auf und ist somit nur sehr bedingt für ein Stauprognosesystem geeignet. Es ist aber auch zu bemerken, dass der Ausrüstungsgrad auf kritischen Netzteilen höher ist, was auch für ein Stauprognosesystem positiv ist.

Für die Verwendung der Datenerfassungssysteme für ein Stauprognosesystem ist ein guter Datenzugriff notwendig. Für die Hälfte der Systeme trifft dies nicht zu.

Grundsätzlich für Stauprognosesysteme verwendbare Datenerfassungssysteme sind (auch in Abhängigkeit der Prognosemethoden):

- A1 Nachfragematrizen
- A2 Strassennetzdaten
- A3 Induktionsschlaufen (ASTRA-Zähler)
- A4 Bluetooth
- A5 Floating Car Data
- A6 Floating Phone Data

Die Induktionsschlaufen weisen eine gute Erhebungsqualität bezüglich Anzahl Fahrzeugen und gefahrenen Geschwindigkeiten und einen guten Datenzugang aus. Einzig die Abdeckung des Strassennetzes ist zurzeit noch eher schlecht.

Bluetooth-Daten (aus dem ASTRA-Versuch Wiggertal) weisen bezüglich gemessener Reisezeiten bzw. Reisegeschwindigkeiten eine gute Erhebungsqualität auf. Der Zugang zu den Daten ist ebenfalls vorhanden, jedoch ist die Abdeckung der Erfassung heute noch sehr beschränkt (Region Verzweigung Wiggertal).

Der Zugang zu Floating Phone Data (Swisscom Daten) wird beim ASTRA vorhanden sein (ab 2014). Die Genauigkeit der Messgrößen liegt bei $\pm 10\%$ (mittel), die Datenverfügbarkeit ist gut.

Umfelddaten

Die Eignung der Erfassungssysteme von Umfelddaten ist als gut zu beurteilen, einzig bei den Glatteismeldeanlagen sind die Abdeckung des Strassennetzes und insbesondere der Datenzugang kritisch.

Verwendbare Datenerfassungssysteme sind:

- B1 Wetterdaten
- B2 Strassenzustand - Truckinfo

Die Wetterdaten bilden sowohl bei den historischen wie auch bei den aktuellen bzw. prognostizierten Daten das gesamte Strassennetz ab. Die Aktualität ist ausreichend (historisch) und der Datenzugang ist gut. Für aktuelle Wetterdaten ist Datenverfügbarkeit eher schlecht aufgrund der langen Aktualisierungsintervalle.

Der Strassenzustand aus der Applikation Truckinfo deckt die Nationalstrassen ab und ist aktuell. Obwohl die Applikation in naher Zukunft durch eine neue ersetzt wird, wird die Funktionalität erhalten bleiben.

Glatteismeldeanlagen sind zwar über das ganze Netz vorhanden, jedoch ist die Abdeckung nicht genügend und der Zugang zu den Daten ist schwierig, da diese Anlagen von den Kantonen und nicht zentral betrieben werden.

Ereignisse und Gefahren

Für planbare Ereignisse sind die Qualität, die Aktualität und die Abdeckung des Strassennetzes gut. Bei nicht planbaren Ereignissen sind zwar die Qualität der Daten und die Abdeckung des Strassennetzes gut, jedoch die Aktualität ist teilweise beschränkt.

Verwendbare Datenerfassungssysteme sind:

- C1 Baustellen - Truckinfo

- C2 Veranstaltungen
- C3 Ferienkalender
- D1 Unfalldaten – historisch
- D2 Polizeiliche Meldungen/Anordnungen/Verkehrsmeldungen
- D3 VM-Massnahmen

Die Baustelleninformationen aus der Applikation Truckinfo decken die Nationalstrassen ab und sind aktuell. Obwohl die Applikation in naher Zukunft durch eine neue ersetzt wird, wird die Funktionalität erhalten bleiben.

Die Veranstaltungskalender decken die grossen Veranstaltungen, die für das Strassennetz massgebend sind ab. Es ist jedoch nicht möglich, sämtliche Veranstaltungen zu berücksichtigen. Die Aktualität ist gut.

Der Ferienkalender deckt alle für das Strassennetz massgebenden Ferientermine in der Schweiz und im Ausland ab. Die Aktualität ist gegeben.

Die Unfalldaten decken alle von der Polizei erfassten Unfälle auf dem ganzen Strassennetz ab. Die Erhebungsqualität ist gut wie auch der Datenzugang; dies gilt insbesondere für die historischen Daten. Die Aktualität der Unfalldaten ist schlecht, da die Unfälle nicht sofort in der Datenbank erfasst werden. Teilweise werden Unfälle, die zu Behinderungen auf dem Strassennetz führen, als Polizei- bzw. Verkehrsmeldungen erfasst.

Räumliche Abdeckung Strassennetz

Es ist zu beachten, dass für die Hochleistungsstrassen die Datenverfügbarkeit und der Datenzugang besser sind als für die Kantonsstrassen.

Künftiger Zustand

Die folgende Tabelle zeigt die Beurteilung für den künftigen Zustand (Zeithorizont 5 bis 10 Jahre, Änderungen gegenüber heute fett).

Tabelle 36 Eignung der Datenerfassungssysteme für die Stauprognose künftig

	Erhebungsqualität				Datenverfügbarkeit			Datenzugang
	Genauigkeit	Messgrössen	Betriebs-zu-verlässlichkeit	Vollständigkeit	Aktualität	Abdeckung Strassennetz	Erfassungszeit-raum	Datenzugriff
Verkehrsdaten								
A1 Nachfragematrizen	schlecht	gut	mittel		mittel	gut	-	gut
A2 Strassennetzdaten (Nationales Verkehrsmodell, MISTRA)	-	-	gut		gut*	gut	-	gut
A3 Induktionsschlaufen (ASTRA-Zähler)	gut	gut	gut		gut	mittel	gut	gut
A4 Bluetooth	mittel	gut	mittel		gut	mittel	gut	gut
A5 Floating Car Data	gut	gut	gut		gut	gut	gut	gut
A6 Floating Phone Data	gut	gut	gut		gut	gut	gut	mittel
A7 Videokameras	gut	gut	gut		mittel	mittel	gut	schlecht
A8 Automatische Nummernschilderkennung (ANPR)	mittel	gut	gut		gut	schlecht	gut	mittel
A9 Infrarot	mittel	gut	gut		schlecht	schlecht	gut	schlecht
A10 Radar/Mikrowellen	mittel	gut	gut		gut	schlecht	mittel	schlecht

A11 Ultraschall	mittel	gut	gut	gut	schlecht	mittel	schlecht
Umfelddaten							
B1 Wetter							
historisch	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut
aktuell	gut	gut	gut	mittel	gut	gut	gut
B2 Strassenzustand – Truckinfo	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut
B3 Strassenzustand - Glatteismeldealagen	mittel	gut	gut	gut	mittel	gut	mittel
Ereignisse und Gefahren (planbar)							
C1 Baustellen – Truckinfo	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut
C2 Veranstaltungen	gut	gut	gut	gut	gut	gut	mittel
C3 Ferienkalender	gut	gut	gut	gut	gut	gut	gut
Ereignisse und Gefahren (nicht planbar)							
D1 Unfalldaten							
historisch	gut	mittel	gut	mittel	gut	gut	gut
aktuell	gut	mittel	gut	mittel	gut	gut	schlecht
D2 Polizeiliche Meldungen/ Anordnungen/ Verkehrsmeldungen	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
D3 VM-Massnahmen	gut	gut	mittel	gut	mittel	-	mittel

Verkehrsdaten

Die Abdeckung des Strassennetzes mit Induktionsschlaufen (ASTRA-Zählstellen) wird kontinuierlich verbessert. Jedes Jahr werden weitere Zählstellen neu in Betrieb genommen bzw. von den Kantonen übernommen. Insbesondere wenn sich Low-Cost-Zähler durchsetzen, ist ein deutlich dichteres Zählstellennetz zu erwarten.

Erweist sich der Bluetooth-Versuch im Raum Wiggertal als Erfolg, ist damit zu rechnen, dass weitere Bluetooth-Messungen hinzukommen werden. Die Abdeckung des Strassennetzes kann damit verbessert werden.

Bei FCD und auch FPD ist mit einer verbesserten Genauigkeit der Messgrössen und einer besseren Abdeckung des Strassennetzes zu rechnen. Dies insbesondere auch durch den höheren Verbreitungsgrad. Bei FCD ist mit einem verbesserten Datenzugang zu rechnen aufgrund von Car2X-Anwendungen (Standardisierung Datenzugriff für Strassenbetreiber).

Für die kritischen Strassenabschnitte ist mit einem zunehmenden Ausrüstungsgrad von Videoanlagen zu rechnen.

Umfelddaten

Die Prognosemethoden für Wetterdaten werden laufend weiter entwickelt, die Datenqualität wird somit weiter zunehmen. Die hohe Netzabdeckung wird weiter bestehen bleiben. Die Aktualität bei den Wetterdaten dürfte sich künftig weiter verbessern (Verkürzung der Prognoseaktualisierungsintervalle).

Die Applikation Truckinfo wird durch eine neue Applikation ersetzt, die Funktionalität wird jedoch erhalten bleiben. Die Datenverfügbarkeit und der Datenzugang zum Strassenzustand wird sich verbessern (Ausbau Netz der Glatteismeldealagen, online Anbindung).

Ereignisse und Gefahren

Die Applikation Truckinfo wird durch eine neue Applikation ersetzt, die Funktionalität wird jedoch erhalten bleiben. Es ist zu erwarten, dass Baustelleinformationen zuverlässiger werden und auch kleinere Baustellen erfasst werden (Verbesserung Baustellenmanagement ab 2014).

Es ist denkbar, dass die Unfalldatenerfassung in Zukunft mittels mobiler Geräte (z.B. i-Pad) durchgeführt wird. Mittels mobiler Datenübertragung kann die Aktualität der Unfalldaten gesteigert werden.

Die Verfügbarkeit von Daten aus VM-Massnahmen dürfte sich mit der Erhöhung des Ausstattungsgrades verbessern. Dies gilt insbesondere für stark belastete Streckenabschnitte.

Räumliche Abdeckung Strassennetz

Es ist zu beachten, dass für die Hochleistungsstrassen die Datenverfügbarkeit und der Datenzugang besser sind als für die Kantonsstrassen. Mit der zunehmenden Standardisierung und Harmonisierung der Verkehrsdatenerfassung und der Zentralisierung der Datenaufbereitung werden sich die Datenverfügbarkeit und der Datenzugang künftig auch für die Kantonsstrassen verbessern.

5.4.3 Risiken

Die Qualität eines Stauprognoseverfahrens, das auf historischen und aktuellen Verkehrs- und Umfelddaten sowie Ereignisdaten basiert, ist direkt abhängig von der Qualität und dem Vorhandensein der entsprechenden Daten. Die Verwendung dieser Daten ist damit mit Risiken von falschen Prognosen verbunden.

Bei der Datenqualität können folgende Risikofaktoren unterschieden werden:

- Ungenügende Datenqualität erkannt
- Ungenügende Datenqualität unerkannt
- Falsche Daten erkannt
- Falsche Daten unerkannt

Bei der Datenlieferung können folgende Risikofaktoren unterschieden werden:

- Keine Datenlieferung erkannt
- Keine Datenlieferung unerkannt
- Verspätete Datenlieferung

Nachfolgend werden diese Risiken für die grundsätzlich in Frage kommenden Datenerfassungssysteme kurz aufgezeigt und grob beurteilt. Dabei handelt es sich um eine erste grobe Einschätzung der Wahrscheinlichkeit und des Schadensausmasses. Das Schadensausmass bezieht sich auf die Auswirkungen auf die Prognosequalität.

Tabelle 37 Risiken und ihre Beurteilung

Datenerfassungssystem	Risiken	Wahrscheinlichkeit	Ausmass	Beurteilung Risiko
A1 Nachfragematrizen	Abweichung Modell- und effektive Struktur der Nachfrage (nur Datenqualitätsrisiken)	mittel	gering	gering, da keine dynamische Nutzung und vorgängige Modellvalidierung
A 2 Strassennetzdaten	Nicht korrekte Netzdaten (Kapazitäten, Netzattribute) (nur Datenqualitätsrisiken)	gering	gering	gering, da keine dynamische Nutzung und vorgängige Modellvalidierung
A3 Induktionsschleifen	Ungenügende Datenqualität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung	mittel	mittel	mittel, automatische Plausibilisierung benötigt mit Massnahmen bei ungenügender Qualität und Verfügbarkeit (Ausschluss Zähler oder Verwendung Nachbarzähler), in der Regel nur eine beschränkte Anzahl Zähler betroffen
A4 Bluetooth A5 Floating Car Data A6 Floating Phone Data	Ungenügende Datenqualität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung	mittel	mittel	mittel, da eine hohe Zahl von verwendeten Signalen (wenn Verbreitungsgrad ausreichend), auch hier wäre ein automatisierte Verifizierung erforderlich
B1 Wetterdaten	Ungenügende Datenqua-	gering	gross	mittel; Wetter hat einen erhebli-

	lität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung			chen Einfluss auf den Verkehrsablauf
B2 Strassenzustand	Ungenügende Datenqualität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung	mittel	mittel	mittel; Strassenzustand hat einen erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf
C1 Baustellen C2 Veranstaltungen C3 Ferienkalender	Ungenügende Datenqualität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung	gering	gering	gering, da keine dynamische Nutzung und vorgängige Prüfung
D1 Unfalldaten	Ungenügende Datenqualität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung	gering	gering	gering, da keine dynamische Nutzung und vorgängige Prüfung; erst in einer späteren Phase stellt sich die Frage nach einer späteren dynamischen Nutzung
D2 Polizeiliche Meldungen/Verkehrsmeldungen	Ungenügende Datenqualität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung	mittel	gross	gross, da dynamische Verifizierung schwierig
D3 VM-Massnahmen	Ungenügende Datenqualität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung	mittel	gross	gross, da dynamische Verifizierung schwierig

Für alle weiter betrachteten Datenerfassungssysteme bestehen Risiken in der Verwendung der Daten für ein Stauprognosesystem, welche die Qualität des Outputs des Stauprognosesystems beeinflussen. Bei den statischen Inputdaten sind die Risiken generell geringer als bei den dynamischen Inputdaten.

Insbesondere bei den Verkehrsmeldungen und bei den VM-Massnahmen sind grössere Risiken zu erwarten. Ein Stauprognosesystem muss diesen Risiken Rechnung tragen. Datenerfassungssysteme mit einem höheren Risiko sollten erst in einem zweiten Schritt berücksichtigt werden. Dabei sind aber auch noch andere Faktoren (Relevanz für das Verkehrsgeschehen etc.) zu berücksichtigen.

5.5 Folgerungen für das Systemkonzept

Aus der Analyse und Beurteilung verschiedener Datenerfassungssysteme für die Verwendung in einem Stauprognosesystem können folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Aus dem Verkehrsmonitoring lassen sich nur historische Verkehrsdaten für die Entwicklung und Validierung eines Stauprognosesystems sowie für langfristige Prognosen nutzen. Für ein gutes Prognosesystem bilden sie eine wichtige Grundlage in Kombination mit anderen historischen Daten.
- Der Abdeckungsgrad durch Verkehrszähler (mit Induktionsschleifen) wird sich in Zukunft weiter verbessern; dies auch im Bereich von Baustellen. Das Stauprognosesystem sollte deshalb flexibel bezüglich Anzahl Zählstellen ausgestaltet sein und auch mobile Erfassungsgeräte im Bereich von Baustellen berücksichtigen können. Ein hoher Abdeckungsgrad von kritischen Netzabschnitten dient auch einem Stauprognosesystem. Ein gewisser Abdeckungsgrad ist jedoch auch auf dem übrigen Netz notwendig (Ereignisse und Gefahren).
- Die Verbreitung von FCD und FPD wird sich weiter verbessern und damit auch die Abdeckung von weniger stark belasteten Strassenabschnitten. Die Qualität der erfassten Verkehrsdaten dürfte weiter steigen.
- Die zu erwartende weitere Standardisierung führt zu einer Vereinheitlichung der Qualität der Outputkenngrössen.

- Durch die vermehrte streckenbezogene Verkehrsdatenerfassung (Reisezeiten, Reisegeschwindigkeiten etc.) verbessern sich die Inputdaten für ein Stauprognosesystem.
- Verkehrsdaten: In einem ersten Schritt steht die Nutzung von Verkehrsdaten aus Verkehrszählern im Vordergrund. In einem zweiten Schritt sollten FCD bzw. FPD-Daten oder Bluetooth-Daten genutzt werden.
- Umfelddaten: Wetterdaten sollten soweit als möglich auch schon in einer frühen Phase genutzt werden. Der Einbezug des Strassenzustandes erscheint erst zu einem späteren Zeitpunkt sinnvoll.
- Ereignisse und Gefahren (planbar): Informationen zu Ferienkalender, Veranstaltungen und Baustellen können im Stauprognosesystem berücksichtigt werden.
- Ereignisse und Gefahren (nicht planbar): Auf den Einbezug von Unfalldaten, polizeilichen Meldungen und Betriebszuständen von VM-Massnahmen sollte in einem ersten Schritt aufgrund der Komplexität eher verzichtet werden. Die Option für einen späteren Einbezug sollte offengehalten werden. Hier ist auch zu beachten, dass die Wirkung von Ereignissen auf das Verkehrsgeschehen auch wieder unmittelbar über die Verkehrserfassung detektiert wird.
- Bei der Verwendung von Inputdaten für ein Stauprognosesystem sind zahlreiche Risiken zu beachten (Ungenügende Datenqualität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung etc.) welche die Qualität der Outputkenngrößen reduzieren. Durch Kontrollroutinen sollten diese Risiken möglichst minimiert werden.

Eine genaue Quantifizierung der Eignung der einzelnen Datenquellen und der Risiken hinsichtlich der Prognosequalität muss in einem Testbetrieb erfolgen.

6 Systemkonzept für ein Verkehrs- und Stauprognosesystem

6.1 Einleitung

Kapitel 6 befasst sich mit der Konzeptionierung eines Stauprognosesystems für das übergeordnete Strassennetz der Schweiz. Es fasst die Ergebnisse aus Arbeitspaket 6 zusammen. Dabei basieren wesentliche Teile auf den Ergebnissen, die in den vorangehenden Kapiteln vorgestellt wurden.

6.1.1 Ziele

Nachdem in den vorangehenden Arbeitspaketen Analysen zum State of the Art, zu den Bedürfnissen, zur Datenverfügbarkeit und zu Prognosealgorithmen durchgeführt wurden, bestand das Ziel des Arbeitspaketes 6 darin, eine Synthese der vorangehenden Arbeiten zu bilden und daraus ein Stauprognose-Systemkonzept für den operativen Einsatz abzuleiten.

Die hier verfolgten Ziele des Arbeitspakets 6 lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Systemkonzept ausarbeiten unter Aufzeigung verschiedener Varianten hinsichtlich:
 - Systemarchitektur (Elemente, Funktionalitäten, Schnittstellen, Komplexitätsgrad etc.)
 - Systemanwendungen
 - Schnittstellen zu anderen Applikationen VM CH

Bei der Ausarbeitung des Systemkonzepts stand insbesondere ein modularer Aufbau im Vordergrund, um die spätere funktionelle Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit des Systems zu ermöglichen. Im vorliegenden Fall stellt ein modularer, entkoppelter Aufbau hohe Anforderungen an die Systemarchitektur, da aufgrund des funktionellen Ablaufs der Prognoseverfahren ein sehr enges Zusammenspiel diverser System-Komponenten nötig ist. Die Ausarbeitung eines optimalen Konzepts, welches die Anforderungen vereint, und dabei skalierbar bleibt, war daher zentraler Bestandteil der Arbeiten.

Zusätzlich zur Konzeption einer generellen, erweiterbaren Systemarchitektur sind Systemanwendungen mit Etappierungs- und Umsetzungsplan ausgearbeitet worden. Als Grundlage für die Systemanwendungen und ihre Etappierung dienten die in vorherigen Kapiteln beschriebenen Erkenntnisse hinsichtlich Prognosemethodik, Bedürfnisse und Datenverfügbarkeit. Ziel war dabei, einen Etappierungs- und Umsetzungsplan zu entwerfen, der sich primär auf die direkt realisierbaren Systemanwendungen konzentriert, während schwieriger zu realisierende Anwendungen oder solche, die noch Forschungsbedarf oder heute noch nicht erhobene Daten benötigen, auf spätere Etappen verschoben werden. Ziel der Etappierung war somit nicht primär eine Priorisierung der Bedürfnisse, sondern eine Priorisierung der Möglichkeiten (hinsichtlich Datenlage, Methodenqualität und Komplexitätsgrad).

Für die Konzeptionierung der abgeleiteten Systemanwendungen war es nötig, das genaue Zusammenspiel der involvierten Komponenten (Daten, Aufbereitung, Prognosealgorithmen, Output/Aufbereitung) zu untersuchen. Das Ziel in dieser Hinsicht bestand in der Erstellung von detaillierten Programmabläufen, welche die Interaktion einzelner Komponenten aufzeigten. Es wurden dabei nur Abläufe berücksichtigt, die für die vorgeschlagenen Systemanwendungen benötigt werden. Aufgrund der modularen Systemarchitektur ist eine Erweiterung aber durchaus möglich und wurde exemplarisch untersucht.

Ebenfalls soll die Einbettung des Systems in die Applikationen des VM CH über bestehende und neue Schnittstellen garantiert werden. Das Konzept geht daher auch auf diesen Punkt ein. Die Frage der Testanwendung wird dagegen erst in Kapitel 7 behandelt.

Für die Ausarbeitung des Systemkonzeptes wurde zwischen drei verschiedenen Konzeptteilen unterschieden (Abbildung 38). Sie sprechen unterschiedliche Aspekte des Konzeptes an und die Aufgliederung dient daher einer strukturierten Vorgehensweise bei

der Konzeptausarbeitung. Die Teile sind aber wechselseitig abhängig voneinander und wurden daher parallel bearbeitet und in einem iterativen Prozess verfeinert.

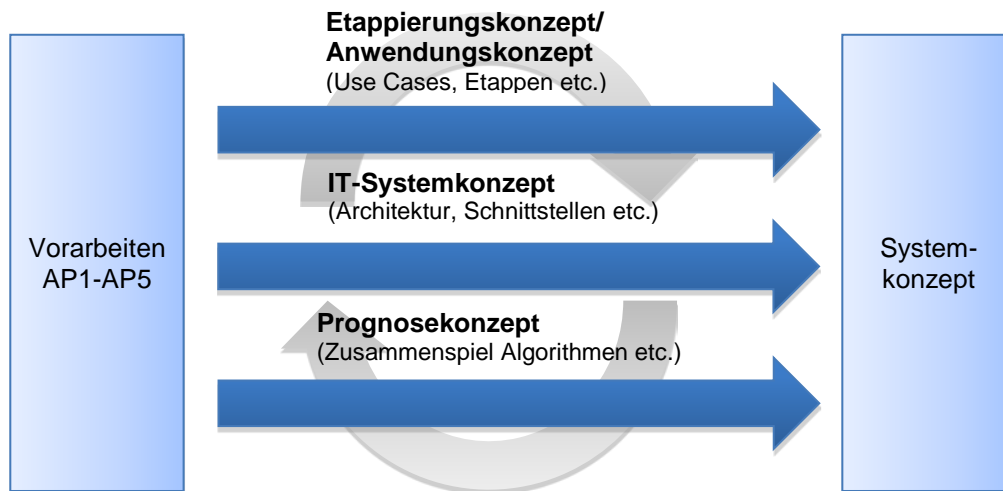


Abbildung 38 Konzeptteile und Vorgehensweise bei der Erstellung des Systemkonzeptes

1. Im **Etappierungskonzept bzw. Anwendungskonzept** werden die möglichen Systemanwendungen aus Sicht der angebotenen Dienste (z.B. Verkehrsmengen-Prognose, Reisezeitprognose etc.) eruiert und etappiert. Grundlage dafür ist eine Gegenüberstellung der Bedürfnisse (Kapitel 3), der beschriebenen und untersuchten Methoden (Kapitel 4), und der Datenverfügbarkeit (Kapitel 5). Aus dieser Gegenüberstellung lässt sich herauslesen, welche Bedürfnisse sich sowohl im Hinblick auf die benötigten Daten als auch im Hinblick auf die Prognosequalität am besten abdecken lassen.

Wichtig bei dieser Gegenüberstellung ist, dass die in Kapitel 2 untersuchten Anforderungen nicht prioritär für die Etappierung berücksichtigt wurden. Bei einem System mit Prognosecharakter (und damit einhergehender Unsicherheiten) ist ohne eine umfassende Testanwendung im Voraus nicht klar, welchen Anforderungen es tatsächlich befriedigend genügen kann. Bei der Etappierung wurde daher Priorität darauf gelegt, wie gut sich die Bedürfnisse im Hinblick auf die Datenlage und die Verfügbarkeit zuverlässiger Prognosemethoden adressieren lassen. Bedürfnisse, die sich mit den bestehenden Daten und Prognoseverfahren sehr gut abdecken lassen, werden daher in den ersten Etappen abgedeckt, während die Abdeckung von Bedürfnissen, die schwieriger zu befriedigen sind (schwierigere Realisierbarkeit), auf spätere Etappen verschoben wird. Aus der Abschätzung der Realisierbarkeit leitet sich dann der Etappenvorschlag ab (s. Abbildung 39). Im letzten Schritt werden die abdeckbaren Bedürfnisse zu anwendungsbezogenen Teildiensten zusammengefasst und im Detail ausgearbeitet.

2. Im **IT-Konzept** werden parallel zum Anwendungskonzept schrittweise die modulare Systemarchitektur, die Systembestandteile, Interfaces und Datenmodelle ausgearbeitet. Da ein modulares Konzept angestrebt wird, welches sich gemäss den Etappierungskonzeptes erweitern lässt, ist die grobe Systemarchitektur grösstenteils unabhängig von den Systemanwendungen und orientiert sich mehr an der technischen Umsetzung der Algorithmen und Prognosefunktionen.
3. Das **Prognosekonzept** untersucht die Verknüpfung der verschiedenen Prognosealgorithmen. Hauptsächlich wird hier das Zusammenspiel von Algorithmen untersucht, die für das Anwendungskonzept und dessen Etappen notwendig sind.

Die drei Konzeptteile wurden gleichzeitig angegangen und iterativ verfeinert. Sie werden nachfolgend in getrennten Kapiteln vorgestellt, sind aber als zusammengehöriges Ganzes zu betrachten.

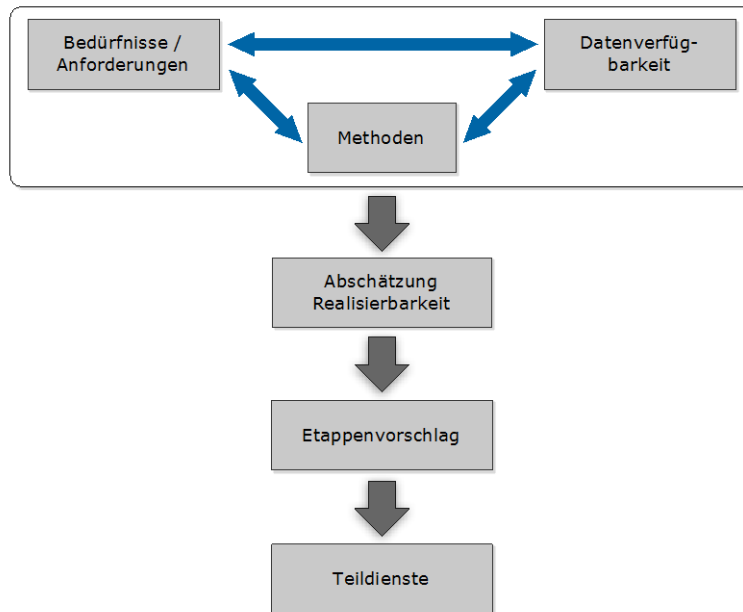


Abbildung 39 Ableitung von Etappen und Teildiensten aus der Gegenüberstellung der Erkenntnisse aus vorherigen APs. Der Begriff „Teildienst“ wird in Kapitel 3 näher erklärt.

6.2 Analyse vorheriger Arbeiten

Aus der Synthese der Arbeiten, die in den vorangehenden Kapiteln beschrieben wurden, lassen sich realistische Systemdienste ableiten, die den erhobenen Bedürfnissen (Kapitel 3) soweit als möglich gerecht werden.

Diese Dienste entsprechen verschiedenen partikulären Prognoseeinheiten und werden daher im Folgenden *Teildienste* genannt, um sie begrifflich von den Fachdiensten der Applikationslandschaft der ASTRA abzugrenzen. Eine detailliertere Erklärung der Teildienste erfolgt in Kapitel 6.3.1

Dabei wurde in folgenden vier Schritten vorgegangen:

1. **Methodenseitige Abdeckung der Bedürfnisse:** In einem ersten Schritt wurden die wichtigsten Bedürfnisse (basierend auf der Priorisierung aus Kapitel 3.4 den methodenseitigen Möglichkeiten gegenübergestellt).
2. **Dateneignung für Methoden:** Es wurde in einem zweiten Schritt untersucht, wie die pro Methode benötigte Datenlage (Kapitel 5) einzuschätzen ist.
3. **Abdeckbare Bedürfnisse und Etappierung:** Im nächsten Schritt wurden die abdeckbaren Bedürfnisse gemäss Umsetzbarkeit gewichtet und etappiert.
4. **Teildienste:** Zuletzt wurden die abgedeckten Bedürfnisse in *Teildienste* zusammengefasst und deren Systemgrenzen festgelegt.

Bemerkung: Der präsentierte Etappenvorschlag basiert auf Umsetzbarkeitsüberlegungen bei der Bedürfnisabdeckung (vgl. Kapitel 6.2.2). Das bedeutet insbesondere, dass Teildienste schon relativ früh in reduzierter Funktionalität bereit stehen können, aber erst in späteren Etappen das volle Potential des Systems ausschöpfen. Alternativ wäre eine Etappierung nach Teildiensten denkbar gewesen (ein Teildienst wird nach dem anderen realisiert), dies birgt aber grössere Risiken, (z.B. unrealistischer Anforderungskatalog für Teildienste, die methodenseitig noch nicht erfüllbar sind). Gerade bei einem System, welches stark auf aktuellen Forschungserkenntnissen aufbaut, wären diese Risiken relativ schwer abschätzbar.

6.2.1 Methodenseitige Abdeckung der Bedürfnisse aus AP2

Eine qualitative Gegenüberstellung von Bedürfnissen und den dafür geeigneten Methoden ist in Tabelle 38 dargestellt. Die ausgewählten Methoden entsprechen den in den Kapiteln 2 und 4 prioritär vorgestellten Methoden.

Tabelle 38 Gegenüberstellung Bedürfnisse und Abdeckungsqualität durch einzelne Prognosemethoden. Legende: ++: sehr gut, +: gut, +/-: mittelmässig, -: schlecht, --: sehr schlecht, ?: zuverlässige Beurteilung aufgrund der bisherigen Forschungsergebnisse nicht möglich

Bedürfnisse	Methoden					
	Univariate Zeitreihen	Multivariate Zeitreihen	Neuronale Netze	Classifizier/ Clustering	Inference ⁴	Simulation
<i>Anwendungszwecke</i>						
Verkehrsinformation	+	++	-	++	+	-
Reise- und Routenplanung	-	+/-	++	?	--	+
Verkehrsmanagement	+/-	+	+	++	+/-	+
<i>Prognostizierte Kenngrössen</i>						
Reisezeiten	--	+/-	+	?	?	+
Reisezeitverluste	--	+/-	+	?	?	+
Staulängen	--	--	--	--	+/-	++
Verkehrslage/-zustand/-belastung	+	++	-	++	-	-
Staudauer	--	+/-	+	+/-	+/-	+
<i>Prognosehorizonte</i>						
Kurzfristprognosen (Min - Std)	+	++	++	+/-	+	++
Mittelfristprognosen (Std - Tage)	--	-	--	++	+	--
<i>Räumliche Abdeckung</i>						
Schweiz	++ (tw. abschnittsweise Einschränkungen)					
Nahes Ausland						
<i>Strassenklassen</i>						
Autobahnen	++					
Hauptverkehrsstrassen	+ (abhängig von Datenlage / Netzstruktur)					
<i>Fahrzeugklassen</i>						
PW / LKW	++					
<i>Zeitintervall Aktualisierung</i>						
1-5 Minuten für Kurzfristprognose	++	+	+	++	?	+/-
Längere Zeiträume für Mittelfristprognose	++	++	++	++	?	+/-

⁴ Unter *Inference* werden insbesondere Verfahren verstanden, die auf einer Verkehrsmodellierung mittels Bayesian Nets basieren (vgl. Kapitel 2). Die Methoden wurden im Projekt aber noch nicht abschliessend untersucht. Die Beurteilungen in dieser Spalte sind daher noch nicht als abschliessend zu betrachten.

Bemerkungen zur Gegenüberstellung:

- Wie zu erwarten, sind grundsätzlich alle betrachteten Algorithmen sowohl auf die Schweiz als auch auf das nahe Ausland anwendbar. Unterschiede ergeben sich jedoch aufgrund der unterschiedlichen Datenlage (vgl. später).
- Die Mehrheit der Verfahren beschäftigen sich mit der Prognose der klassischen Verkehrsgrößen *Dichte*, *Fluss* und *Geschwindigkeit* zum Zwecke der Verkehrsinformation und/oder des Verkehrsmanagements. Deutlich weniger untersuchte Verfahren eignen sich direkt für Reisezeitvorhersagen oder die Prognose von Stauentwicklungen. Dazu zählen v.a. neuere bzw. aufwendigere Methoden wie z.B. die Simulation der betroffenen Strassenabschnitte. Zwar lassen sich Reisezeiten und z.T. Stauentwicklungen auch aus den klassischen Verkehrsgrößen ableiten, dies ist aber mit erhöhten Unsicherheiten verbunden. Tatsächlich lässt sich die Staulänge präzise wohl nur über eine Simulation ermitteln.
- Grundsätzlich besteht auf der Seite der Methoden wenig Unterschied zwischen Autobahnen und Autostrassen. Eine wichtige Ausnahme, die aus der Tabelle nicht ersichtlich ist, bildet die Reisezeitprognose. Auf Autobahnen wirkt sich die Möglichkeit, regelmässig zu überholen, negativ auf die Qualität der Reisezeitprognose aus: Die Varianz der effektiven Reisezeiten ist entsprechend viel grösser als bei Autostrassen (abhängig davon, wie sehr ein Autofahrer welche Spur benützt). Folglich ist auch die Vorhersage einer Reisezeit mit grossen Varianzen behaftet (sofern man das Fahrverhalten des einzelnen nicht kennt). Dieser Sachverhalt ist auf Autostrassen i.a. einfacher, da nicht oder eher selten überholt wird.
- Grosse Unterschiede zeigen sich bei der Eignung der Algorithmen für die Prognosehorizonte. Die meisten Zeitreihenanalyse-Methoden können nur kurzfristige Prognosen (wenige Min.) liefern. Dieser Kurzfrist-Zeithorizont kann mittels multivariater Erweiterung etwas vergrössert werden, obwohl hier sowohl Literaturangaben als auch Arbeiten in den vorhergehenden Kapiteln zu unterschiedlichen Resultaten gekommen sind. Fest steht, dass bei multivariaten Methoden ein sorgfältiges und v.a. aufwendiges Tuning nötig ist, um einen Prognosehorizont bis max. 1 Stunde zu ermöglichen.
- Demgegenüber stehen die Klassifikationsverfahren, welche die Zeitreihen nicht in erster Linie als Entwicklung einer Grösse im Laufe der Zeit betrachten, sondern nur als unterschiedliche Zustände im Zustandsraum eines „Systems“. Sie stellen dann Prognosen an, indem sie in der aktuellen Zeitreihe nach Mustern suchen, die bereits in historischen Daten vorgekommen sind. Diese Mustererkennung lässt sich mittels externer Faktoren dahingehend kombinieren, dass eine Mittelfristprognose (mehrere Wochen/Monate) möglich ist. Aufgrund ihrer Funktionsweise sind diese Klassifizierungsalgorithmen aber fehleranfällig bei kurzzeitigen Musteränderungen (z.B. Stauauftritt). Daher sind sie für Kurzzeitprognosen nicht geeignet.
- Im Kapitel 6.5 wird auf die Kombination und das Zusammenspiel von Kurz- und Mittelfristprognose-Algorithmen eingegangen. Durch eine Kombination lassen sich die Stärken der Methoden optimal ausnutzen.
- Die untersuchten Methoden sind alle in der Lage, kurze Aktualisierungsintervalle im Bereich der verlangten Bedürfnisse zu garantieren. Dabei ist zu bemerken, dass als Berechnungsgrundlage davon ausgegangen wird, dass eine entsprechend ausreichende parallel arbeitende Rechnerstruktur verfügbar ist.

Grundsätzlich wären Simulationen für alle Kurzfristprognosen geeignet. Ihre Bewertung im Bereich der Verkehrsinformation und Verkehrszustandsprognose fiel deshalb mittelmässig bis schlecht aus, da sowohl ein sehr grosser Berechnungsaufwand nötig ist und andererseits die Kalibrierung an die aktuelle Verkehrssituation schwierig ist. Des Weiteren wurden Simulationsmethoden nicht gezielt in vorherigen Kapiteln untersucht, weshalb die für eine Verwendung nötigen Erfahrungen im Moment zum Teil noch fehlen.

6.2.2 Dateneignung für Prognoseverfahren

Die nachfolgende Tabelle 39 zeigt eine Gegenüberstellung der Datenlage gemäss Kapitel 5, und eine Eignung der Daten für die untersuchten Methoden. Die Spalten *Erhebungsqualität*, *Datenverfügbarkeit* und *Datenzugang* entsprechen den Angaben in Tabelle 34, Tabelle 35 und Tabelle 36 im Kapitel 5. Sie sind dort kommentiert. Mehrere Un-

terkategorien wurden zum Teil zusammen genommen und gemittelt bewertet.

Tabelle 39 Gegenüberstellung Dateneignung und Prognoseverfahren. Legende: +: gut, +/-: mittelmässig, -: schlecht,?: eine zuverlässige Beurteilung aufgrund der bisherigen Forschungsergebnisse ist nicht möglich

Daten	Erhebungsqualität ⁵	Verfügbarkeit ⁶	Datenzugang	Eignung für Methoden					
				Univariate Zeitreihen	Multivar. Zeitreihen	Neur. Netze	Classifier	Inference	Simulation
<i>Verkehrsnachfragedaten</i>									
Nachfragematrizen	+/-	+/-	+	-	-	-	-	-	+
Induktionsschlaufen (AS-TRA-Zähler)	+	+/-	+	+	+	+	+	+	+
Bluetooth	+/-	-	+	+	+	+	?	?	-
Floating Car Data (FC)	+	+/-	+/-	+	+	+	+	+(?)	+
Floating Phone Data (FP)	+	+	+	+/-	+/-	+	+	+/-	+/-
Videokameras	+/-	-	-	+	+	+	+	?	+
Automatische Nummernschilderkennung	?	-	?	+	+	+	+	?	-
Infrarot	+/-	-	-	+	+	+	+	+	+
Radar/Mikrowellen	+/-	-	-	+	+	+	+	+	+
Ultraschall	+/-	-	-	+	+	+	+	+	+
<i>Umfelddaten</i>									
Wetter	+	+	+	--	+/-	+	+	+/- (?)	?
Strassenzustand – Truckinfo	+	+/-	+	-	-	-	+	+/- (?)	?
Strassenzustand - Glatteismeldeanlagen	+/-	+/-	-	-	-	-	+	+/- (?)	?
<i>Ereignisse und Gefahren - planbar</i>									
Baustellen – Truckinfo	+	+/-	+	+/-	-	-	+/-	+/- (?)	+
Grossanlässe	+	+	?	-	-	-	+	+	+/-
Ferienkalender	+	+	+	-	-	-	+	?	?
<i>Ereignisse und Gefahren - nicht planbar</i>									
Unfalldaten (historisch)	+	+	+	-	-	-	+	?	?
Polizeiliche Meldungen	?	?		?	?	?	?	?	?
VM-Massnahmen	+	+/-	+	?	?	?	?	?	?

⁵ Die Erhebungsqualität beinhaltet die Genauigkeit der Messgrössen, die Betriebszuverlässigkeit und die Vollständigkeit.

⁶ Die Verfügbarkeit beinhaltet die Aktualität, die Abdeckung des Strassennetzes und den Erfassungszeitraum.

Schlussfolgerungen:

- **Nachfragematrizen** sind ausser für simulationsbasierte Methoden nicht direkt verwendbar, da die meisten Methoden querschnittsbasierend sind und somit die Quell-Ziel-Beziehungen nicht direkt verwenden.
- Detektordaten (**Induktionsschlaufen**) stellen im Moment die einzige sofort verfügbare und qualitativ hochwertige Datenquelle dar, die sich direkt methodenseitig verwenden lässt. Die Schwäche dieser Datenquelle liegt bei der räumlichen Abdeckung. Die Verfügbarkeit von Detektor-Rohdaten via cnlab/VM-CH wird mit **95%** angegeben, wobei täglich Unterbrüche von 3-15 Minuten vorkommen. Diese Einschränkung in der Verfügbarkeit hat Konsequenzen auf die Prognosequalität im Online-Betrieb und muss vom System im Sinne einer Fehlerbehandlung abgefangen werden.
- Erstaunlicherweise gibt es bisher nur wenige Algorithmen, die direkt mit **FC-Daten** bzw. **FP-Daten** umgehen können (insbesondere die direkte Reisezeitprognose mittels neuronalen Netzen könnte unmittelbar profitieren). Die Bewertung wurde trotzdem generell mit „gut“ vorgenommen, da FC-Daten als Querschnittsdaten mit geringerer Qualität aufgefasst werden können. Dadurch lassen sie sich direkt mit den auf Detektoren ausgelegten Methoden weiterverarbeiten. Die Qualität und Verwertbarkeit dieser Daten steigt mit der Abdeckungsdichte. Diese Fragen standen allerdings nicht im Fokus dieses Projektes.
- Die Einbindung der meisten anderen Verkehrsnachfragedaten (wie **Infrarot, Ultraschall, Bluetooth, Radar**) ist methodisch über das Prinzip der virtuellen Zähler gut realisierbar. Aufgrund der unzureichenden Datenmenge und räumlichen Abdeckung sind viele dieser Datenquellen aber im Moment i.d.R. noch nicht geeignet für die Anwendung in einem Prognosesystem.
- Die Auswertung der **Videokameras** im Sinne von virtuellen Zählern wäre denkbar und könnte die Datenverfügbarkeit sinnvoll ergänzen. Dazu wäre in erster Linie eine Software nötig, welche aus den Videoaufnahmen die Fahrzeugdichte und Geschwindigkeit extrahiert. Eine Erkennung von Einzelfahrzeugen würde zwar die Messung von Reisezeiten erlauben, ist aber nicht zwingend notwendig. Videokameras könnten insbesondere auch zur Detektion von Staus (Entstehung, örtlicher Anfang und Stauende) eine Rolle spielen.
- **Wetter** und andere **prognostizierbare/planbare Grössen** lassen sich momentan praktisch nur über Ganglinien-Klassifizierungen einbinden. Das bedeutet, dass Wettereinflüsse sich v.a. für Mittelfristprognosen verwenden lassen. In einer späteren Ausbauphase des Systems wäre anzustreben, dass planbare bzw. prognostizierbare Grössen auch für Kurzfristprognosen berücksichtigt werden können. Die Grössen wirken sich insbesondere auf die Strassenkapazität aus, die wiederum die Stauwahrscheinlichkeit und –entwicklungen beeinflusst.

Die Etappierung in Kapitel 6.4 erfolgt anhand dieser Bewertung. Nur Bedürfnisse, die sowohl methodenseitig als auch datenseitig gut abgedeckt sind, werden in der ersten Etappe des Systems realisiert.

6.3 Allgemeine Aspekte des Systems

In diesem Abschnitt erfolgt nun eine Auslegeordnung und Skizze des Systems bzw. des Systemkonzeptes. Dabei wird zunächst eine Aussensicht eingenommen und es werden verschiedene Dienste definiert, die das System gegen aussen anbietet bzw. anbieten könnte. Zur Ermöglichung dieser „Dienste gegen aussen“ müssen vom System selbst intern Dienstleistungen technischer Art erbracht werden (Basissystem). Es werden daher im Weiteren die Anforderungen an dieses Basissystem besprochen und darauf aufbauend eine allgemeine Systemarchitektur abgeleitet.

6.3.1 Teildienste und Basissystem

Aus den vorherigen Analysen lassen sich drei unterschiedliche Prognoseeinheiten aus Anwendersicht ableiten, welche vom System angeboten werden.

Durch diese Einheiten werden (z.T. die gleichen) Ergebnisdaten für unterschiedliche Zwecke aufbereitet und zur Verfügung gestellt. Es handelt sich also um eine Unterscheidung aus Sicht der erbrachten Dienstleistung, deswegen werden die Einheiten im Fol-

genden Teildienste genannt, da sie zusammen den Fachdienst „Stauprognosesystem“ definieren. Diese Teildienste sind (vgl. Abbildung 40):

1. **Teildienst Verkehrsinformationsprognose (TVIP):** Berechnung des zukünftigen Verkehrszustandes (inkl. Stau) für Strassenbenutzer.
2. **Teildienst Reise- und Routenplanung (TRRP):** Unterstützung des Anwenders bei der pre-trip und on-trip Reiseplanung
3. **Teildienst Verkehrsmanagementprognose (TVMP):** Spezielle Export- und Analysedaten sowie Feedbackmöglichkeiten für das Verkehrsmanagement.

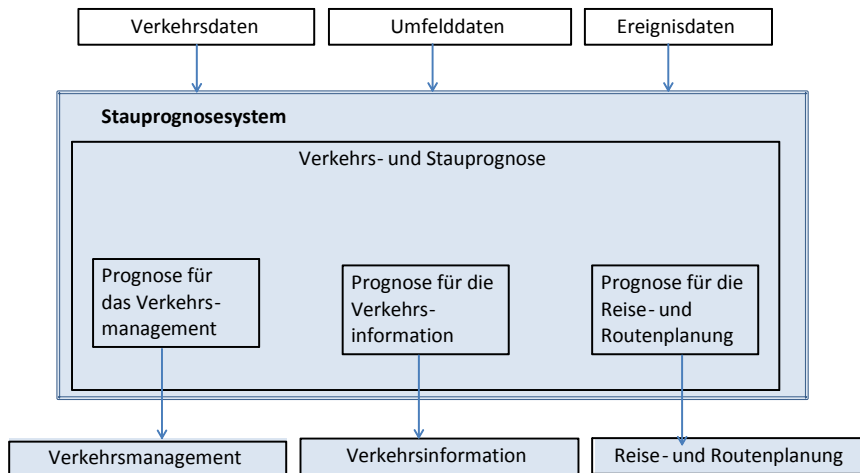


Abbildung 40 Die Teildienste des Stauprognosesystems

Zusätzlich zu diesen Teildiensten ist ein sog. Basissystem mit Basisdiensten erforderlich. Diese fassen sämtliche systemtechnischen Anforderungen (Aufbau Software-Framework, Datenbank, Interfaces und Anbindung an andere Applikationen, s. Kapitel 6.6) zusammen, die unabhängig von den anwendungsbezogenen Teildiensten realisiert werden müssen. Sie bilden die technische Grundlage des Stauprognosesystems (Abbildung 41).

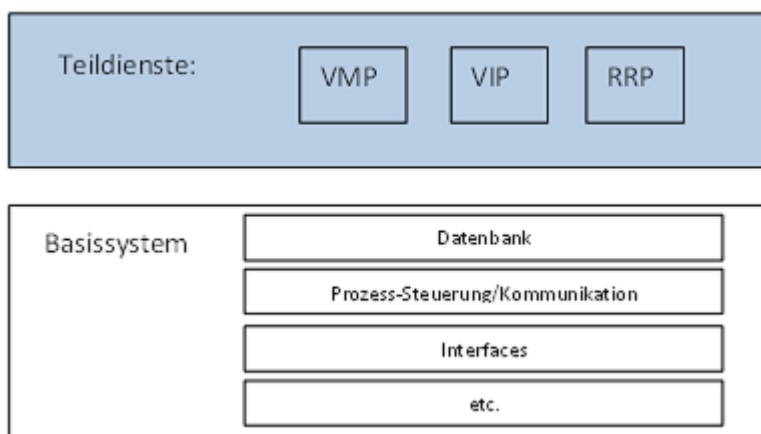


Abbildung 41 Systemaufbau mit Basissystem und Teildiensten

Teildienst Verkehrsinformationsprognose TVIP

Der Teildienst Verkehrsinformationsprognose richtet sich an Strassenbenutzer und gibt eine Prognose des zu erwartenden Verkehrsaufkommens inkl. Überlastungswarnung an. Aus Nutzersicht handelt es sich um ein ähnliches System wie die heute bekannten Verkehrsinformationssysteme (Kartendarstellung mit farblicher Codierung der Strassen-segmente gemäss Verkehrszustand, wie zum Beispiel bei Zuerittraffic, Abbildung 42).

Die wichtigsten Eigenschaften dieses Teildienstes sind:

- Anwender: Strassenbenützer gemäss Definition in Kapitel 3.
- Prognostizierte Grössen: Segment-basierte Prognose des Verkehrszustandes in vier Kategorien (frei fliessend, dichter Verkehr, stockend, Stau/Überlastung)
- Prognostizierte Reisezeiten und Reisezeitverluste pro Segment können daraus abgeleitet werden. Die individualisierte prognosebasierte Routen- und Tourenplanung ist aber nicht Teil des Dienstes (vgl. unten).
- Abgedeckte Strassentypen: Nationalstrassen CH und z.T. kantonale Strassen (HLS/HVS)
- Räumliche Abdeckung und Auflösung: segmentbasiert, wobei die Segmentlänge maximal als Strecke zwischen zwei Detektormessstellen definiert ist. Sie ist daher variabel im Bereich zwischen einigen hundert Metern und mehreren Kilometern.
- Prognosehorizont: 15 Minuten – max. 14 Tage
- Zeitliche Auflösung Prognose: 15 Minuten
- Prognoseaktualisierung: 3 Minuten (d.h. Prognosen mit 15-Minuten Auflösung werden alle 3 Minuten aktualisiert, um ggf. schnell auf Änderungen reagieren zu können)
- Mögliche Darstellung: Farbliche Codierung überlagert auf Strassennetzkarte CH (ähnlich Google Maps); Liste der überlasteten Strassensegmente
- Mögliche Benutzerinterfaces: Webinterface/Webserver/Mobile App zur Darstellung des Verkehrszustandes; Zoom-/Verschiebefunktion zur Navigation wie bei Google Maps; Angabe des zu prognostizierenden Datums/ZeitRelease-Management: keine Release-Zyklen, kontinuierliche Verbesserung der verwendeten Methoden
- Qualitätsmanagement: internes Qualitätsmanagement (kein Benutzer-Feedback, sondern internes Monitoring der Prognosequalität)

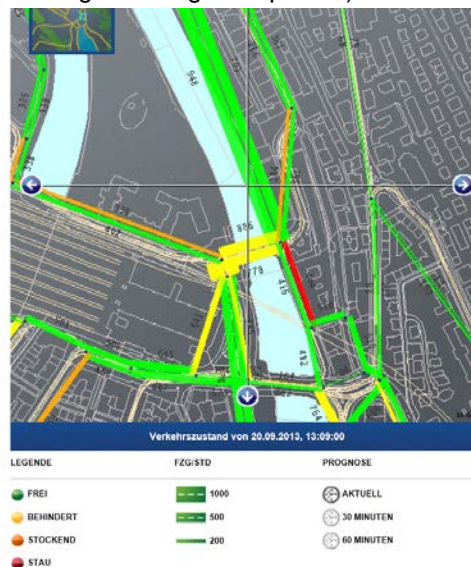


Abbildung 42 Beispiel einer Kartendarstellung der Verkehrslage mit rudimentärer Prognosefunktionalität (Zuerittraffic: www.stadt-zuerich.ch)

Als Erweiterungsmöglichkeit dieses Teildienstes kann eine diskrete Wahrscheinlichkeitsangabe (z.B. sehr sicher, wahrscheinlich, unsicher) des prognostizierten Verkehrszustandes und der abgeleiteten Reisezeiten angegeben werden. Voraussetzung dafür ist ein ausreichend langer Testbetrieb des Systems, um über ausreichend historische Daten zu verfügen.

Ebenso bietet es sich an, dem Benutzer die Möglichkeit zu geben, historische Werte, d.h. die Verkehrssituation aktuell und in der Vergangenheit darstellen zu lassen. Dies erlaubt erfahrenen Strassenbenützern gegebenenfalls ihre „eigenen“ qualitativen Prognosen zu erstellen oder zu „verbessern“.

Der Teildienst ist mit bestehenden Methoden und basierend auf ersten Tests relativ leicht

realisierbar. Die Prognosequalität ist gemäss ersten Tests für den Teildienst ausreichend, insbesondere da die prognostizierte Grösse des Verkehrszustandes relativ grob diskretisiert wird.

Nutzen für Anwender des Dienstes TVIP

Der Teildienst Verkehrsinformationsprognose unterstützt den Anwender bei der Fahrtenplanung auf einfache aber bekannte Art und Weise. Da der Prognosehorizont ausreichend gross ist, kann der Teildienst zur pre-trip Reiseplanung verwendet werden. Die wichtigsten Szenarien sind:

- **Optimierung Reisedatum:** Aufgrund des grossen Prognosehorizontes von mehreren Tagen mit 15-Minuten Auflösung wird der Benutzer bei der optimalen Wahl eines Reisedatums unterstützt. Diese Unterstützung ist qualitativer Natur, da in diesem Teildienst keine Reisezeit- und Routenoptimierung angeboten wird. Die Entscheidung zur Wahl des Reisedatums liegt beim Anwender. Damit sinkt das Risiko, dass das System für falsche Prognosen verurteilt wird, was v.a. zu Beginn des operativen Betriebs von Wichtigkeit ist. Die Möglichkeit, historische Verkehrszustände anzuzeigen, dürfte die Benutzerakzeptanz zusätzlich steigern, da die Anwender damit die Möglichkeit erhalten, ihre eigenen „Prognosen“ zu erstellen. Dies dürfte wiederum v.a. zu Beginn des operativen Betriebes von Vorteil sein.
- **Routenplanung (grob):** Die geographische Auflösung des Teildienstes ist ausreichend, damit Anwender bei prognostizierten Überlastungen die betroffenen Gebiete grossräumig umfahren können. Es hilft damit v.a. Anwendern aus dem Pendler-Verkehr, die nicht im Reisezeitpunkt, sondern nur in der Wahl der Reiseroute flexibel sind. Wie bei der Optimierung des Reisedatums leistet das Prognosesystem hier nur qualitative Unterstützung, da es keine individualisierte Routenplanung anbietet. Auch hier erwarten wir eine gesteigerte Benutzerakzeptanz, da das System die Entscheidung zur Routenwahl dem Anwender überlässt.
- **Verbesserte Information:** Der Teildienst ermöglicht auch die automatische Angabe der relevanten Gründe für eine prognostizierte Überlastung (via zugehörige Einflussfaktor-Identifikation, s. Kapitel 6.5: Prognosekonzept). Während diese Informationen zwar nicht unmittelbar für die Reise- und Routenplanung nützlich sind, dürften sie v.a. zur Benutzerakzeptanz beitragen. Ebenso schaffen die Angaben Transparenz, sodass gerade erfahrene Strassenbenützer selber entscheiden können, wie sehr sie einer bestimmten Prognose vertrauen wollen.

Teildienst Reise- und Routenplanung TRRP

Der Teildienst Reise- und Routenplanung ist ein technisch anspruchsvollerer Dienst. Sein Ziel ist es, dem Benutzer für einen gegebenen Zeitpunkt in der Zukunft und einen Start- und Zielort die optimale Reiseroute anzugeben, zusammen mit einer Reisezeitangabe und gegebenenfalls Alternativrouten-Vorschlägen. Im Gegensatz zum Teildienst Verkehrszustandsprognose handelt es sich somit um einen interaktiven Dienst, dessen Rückgabewert (Route, Reisezeitangabe) für jeden Benutzer individuell erstellt wird. Da eine echte prognosebasierte Reise- und Routenplanung ziemlich daten- und rechenintensiv ist und die dynamische Routenführung unter Berücksichtigung der sich ändernden Verkehrssituation eine enge Kopplung von Prognose- und Routingalgorithmen benötigt (s. Kapitel 6.5 und 6.6), kann es Sinn machen, den Dienst als integralen Bestandteil des Stauprognosesystems anzubieten. Mit entsprechenden Schnittstellen ist aber auch eine Auslagerung des Dienstes in externe Applikationen denkbar.

Die wichtigsten Eigenschaften des Teildienstes sind:

- Anwender: Strassenbenützer (gemäss Definitionen in Kapitel 3) und Verkehrsmanagement (z.B. um Alternativrouten für Umfahrung von überlasteten Strassenabschnitten anzugeben)
- Prognostizierte Grössen: Quelle-Ziel-basierte Prognose der Reisezeit und optimalen Route zu einem Datum in der Zukunft, unter Berücksichtigung der dynamisch ändernden Verkehrssituation während der Fahrt. Als zusätzliche Information kann der Reisezeitverlust gegenüber der schnellsten Route bei freier Fahrt angegeben werden.
- Abgedeckte Strassentypen: Nationalstrassen CH und z.T. kantonale HLS/HVS

- Räumliche Abdeckung und Auflösung: Grundsätzlich ist eine Abdeckung auf Ebene der „Zubringerstrassen“ möglich, allerdings auf solchen Abschnitten ohne messdatengestützte Reisezeitprognosen. Insbesondere bei städtischem Gebiet sind Reisezeitprognosen für Nebenstrassen aber nötig, da deren Verkehrssituation grossen Einfluss auf die Reisezeit haben kann (Überlastung/Signalisation etc.). In einer ersten Phase soll der Teildienst eine Routenwahl und Reisezeitprognose auf Ebene National- und Hauptstrassen anbieten (Segmente des untergeordneten Strassennetzes der Route werden berücksichtigt aber nur idealisiert prognostiziert).
- Prognosehorizont: 5 Minuten – max. einige Tage (Tests mit genügend Daten noch ausstehend)
- Zeitliche Auflösung Prognose: 5 Minuten
- Prognoseaktualisierung: max. 3 Minuten (d.h. Prognosen mit 5-Minuten Auflösung werden mindestens alle 3 Minuten aktualisiert, um ggf. schnell auf Änderungen reagieren zu können)
- Mögliche Darstellung: Farbliche Darstellung der Route und Alternativrouten überlagert auf Strassennetzkarte CH (ähnlich Google Maps); Angabe der Reisezeit und Reisezeitverluste
- Mögliche Benutzerinterfaces: Webinterface/Webserver/Mobile App mit Formularfeldern zur Eingabe Quelle, Ziel und Fahrtdatum/-zeit. Webinterface zur Darstellung der Route auf Karte sowie Reisezeit; Zoom-/Verschiebefunktion zur Navigation wie bei Google Maps; keine weitere Feedbackfunktion. Webservice-Interface: Schnittstelle, über welche auch andere Fremdapplikationen die Routenplanung (insb. Reisezeitangabe) abfragen können.
- Release-Management: keine Release-Zyklen, kontinuierliche Verbesserung der verwendeten Methoden
- Qualitätsmanagement: internes Qualitätsmanagement (kein Benutzer-Feedback, sondern internes Monitoring der Prognosequalität durch Vergleich mit gemessenen historischen Werten)

Der Teildienst Reise- und Routenplanung nimmt dem Anwender die Routenplanung ab. Die Annahme dabei ist, dass das System in der Lage ist, eine Route vorzuschlagen, die entweder besser oder gleichwertig zur Route ist, die der Anwender ohne Systemunterstützung gewählt hätte. Der Nutzen des Systems ist daher sehr gross, da es präzise quantitative Angaben zurückgibt. Gleichzeitig sind aber auch die Anforderungen des Teildienstes sehr gross, da bei ungenügender Qualität das Risiko besteht, dass Anwender den Dienst nicht verwenden. Dieser Teildienst erfordert daher umfassende Tests bevor an einen operativen Betrieb zu denken ist. Zusätzlich besteht die Gefahr von Rückkopplungseffekten. Ändert sich aufgrund der Routenplanung das Benutzerverhalten in genügend grossem Ausmass, so verändert dies auch die zukünftige Verkehrslage - die Prognosen falsifizieren sich quasi selber.

Nutzen für Anwender des Dienstes TRRP

Der Teildienst unterstützt Anwender im Strassenverkehr bei ihrer Reiseplanung:

- **Optimierung Reisedatum/-zeit:** Dank des grossen angestrebten Prognosehorizontes kann der Dienst zur pre-trip Planung eingesetzt werden, um beispielsweise die optimale Zeit für eine Fahrt zu bestimmen. Während der Teildienst zwar primär die Reisezeit der optimalen Route für einen gewünschten Start-Zeitpunkt angibt, lässt sich die Anwendung einfach erweitern, sodass z.B. der optimale Reisezeitpunkt (im Sinne der kürzesten Reisezeit) bestimmt wird oder die Ankunftszeit als Eingabe spezifiziert werden kann, während sich aus der benötigten Reisezeit dann die Startzeit ergibt.
- **Routenplanung:** Eine Erweiterung der Start-Ziel-Routenplanung auf eine Routenplanung mit Zwischenzielen ist - wenn der Teildienst erfolgreich läuft – relativ leicht realisierbar mit bestehenden Methoden, da dieser Anwendungszweck eine Erweiterung der Routingfunktionalität, nicht aber des zugrundeliegenden Prognosesystems benötigt.
- **Einbindung in Drittapplikationen:** Durch die Möglichkeit, mittels standardisierter Schnittstelle (Webservices) auf den Dienst zuzugreifen, kann der Dienst auch in Fremdanwendungen verwendet werden, wodurch der Nutzen des Dienstes mitwächst.

In zukünftigen Ausbauszenarien kann auch damit gerechnet werden, dass durch geeignete Drittanwendungen ein Feedback der Anwender im System berücksichtigt werden kann (z.B. Stau- und Unfallmeldungen durch Benutzer).

Teildienst Verkehrsmanagementprognose TVMP

Der Teildienst Verkehrsmanagement besteht aus einer spezifischen Anpassung der beiden anderen Teildienste für die Strassenbetreiber bzw. das Verkehrsmanagement. Wichtigster Unterschied zu den anderen Teildiensten ist, dass dieser Teildienst deutlich weitergehende Analysemöglichkeiten (z.B. Fehleranalyse) erlaubt und daher über spezifische Schnittstellen für die Datenübernahme verfügt. Zudem können in diesem Dienst die Prognosen durch manuelles Eingreifen direkt manipuliert und gegebenenfalls durch Übersteuern verbessert werden.

Zusammengefasst verfügt dieser Teildienst zusätzlich zu den anderen beiden Teildiensten über die folgenden Eigenschaften:

- **Nutzer:** Strassenbetreiber (Verkehrsmanagement, Verkehrsmanagementzentrale, Verkehrsmonitoring).
- **Direkter Datenzugang:** Über Export/Import-Schnittstellen oder DB-Interface (abhängig von Integrationsvariante, s. Kapitel 6.6) bietet der Teildienst ein direktes Dateninterface zu den Prognosedaten des Systems.
- **Zeitnahes Update-Intervall:** Aktuelle Prognosedaten stehen bei Bedarf zeitnah zur Verfügung (streckenabhängig, min. 30 Sekunden Update-Intervall)
- **Rohdaten-Prognose:** Der Teildienst Verkehrsmanagementprognose bietet Rohdaten-Prognosen an, z.B. von Verkehrsaufkommen im Sinne von Ganglinienprognosen mit dem im Kapitel 6.5 vorgestellten hybriden Prognoseverfahren. Die Rohdaten-Prognose erlaubt eine viel genauere Analyse der prognostizierten Verkehrssituation und unterstützt somit ein allenfalls nötiges Eingreifen des VM (Geschwindigkeitsvorgaben, Pannestreifenutzung, Zufahrtsdosierungen, Routenempfehlungen etc.).
- **Wählbare Aggregations-Intervalle:** Für segment- und querschnittsbasierte Prognosen stehen mehrere, wählbare Aggregationsintervalle zur Verfügung
- **Abschnittsbasierte on-trip Reisezeitprognosen:** Die Schnittstelle erlaubt eine on-trip Reisezeitprognose für vordefinierte Strassenabschnitte. Diese Prognosen werden zeitnah zur Verfügung gestellt (min. 30 Sekunden – 1 Minute), um auf Wechseltextanzeigen dargestellt zu werden. Das Interface zu den Wechseltextanzeigen wird dabei vom VM-CH resp. der zuständigen FA bereitgestellt.
- **Fehleranalyse/Monitoring:** Sämtliche Prognosen werden archiviert und in diesem Teildienst zusammen mit den tatsächlich gemessenen Werten zugänglich gemacht. Dadurch lässt sich die Prognosequalität analysieren und ggf. auch verbessern (siehe Feedbackfunktion)
- **Zuverlässigkeit/Ausfallsicherheit:** Durch den direkten Datenbankzugriff auf das Prognosesystem ist dieser Teildienst ausfallsicherer und damit zuverlässiger als die anderen Teildienste. Durch die redundante, parallele Systemarchitektur (s. Kapitel 6.6) ist mit einer hohen Ausfallsicherheit des Systems zu rechnen.
- **Feedbackfunktion & Qualitätsmanagement:** Durch Zugang zum Prognosesystem ist es möglich, Systemeinstellungen zu ändern (z.B. Modellparameter), um die Prognosequalität zu verbessern. Ebenso sollen durch dieses Nutzer-Feedback die automatisch schwer zu erfassenden Einflussfaktoren wie z.B. Unfälle, Spursperrung, Baustellen nach und nach ins System eingepflegt werden.

Releasemanagement: Durch die starke Integration des Teildienstes in die ASTRA-Systemlandschaft ist ein (mit dem VM) abgestimmtes Releasemanagement notwendig, um Rückwärtskompatibilität zu bestehenden Anwendungen zu garantieren. Bei grösseren Systemänderungen ist ein gut geplantes Releasemanagement insb. auch für Anwenderschulungen notwendig.

Technische Anforderungen an Basissystem

Aus der vorherigen Beschreibung der Teildienste lässt sich ein technischer Anforder-

rungskatalog für das Basissystem ableiten. Das Basissystem muss so konzipiert sein, dass es allen Teildiensten genügen kann. Die Anforderungen werden daher unabhängig von den Teildiensten formuliert. Der Einfachheit halber sind im Folgenden nur die für die technische Umsetzung relevanten Anforderungen in Tabelle 40 zusammengefasst. Man beachte, dass nicht alle Anforderungen, die technisch erfüllt werden können, heute auch auf der Daten- bzw. Methodenseite schon erfüllbar sind.

Tabelle 40 Technischer Anforderungskatalog für Basissystem

Anforderung	Beschreibung	Lösungsansätze
Performance	Das System muss in der Lage sein, sämtliche anfallenden Berechnungen zeitnah zu erledigen. Das System muss insb. auf die Datenrequests (z.B. Reisezeitabfrage) innerhalb tolerierbarer Latenzzeit (max. im Sekundenbereich) reagieren können.	<ul style="list-style-type: none"> Verteilte Rechenarchitektur mit paralleler Datenverarbeitung
Abdeckung nach Strassentypen	Das komplette National- und Hauptstrassennetz muss im System abgebildet werden können und die (meisten) Prognosen sollen flächendeckend, d.h. für das gesamte erfasste Netz verfügbar sein	<ul style="list-style-type: none"> Parallele Prognoseberechnung mit Synchronisations-Mechanismus Erweiterbare Systemarchitektur, um zukünftige verfügbare Daten einbinden zu können (bessere Detektorabdeckung, Reisezeitmessungen usw.)
Zeitliche Auflösung	Prognosen müssen mit einer zeitlichen Auflösung von 30 Sek. bis 15 Minuten berechnet werden (abhängig vom Teildienst). Dies bedeutet eine Mehrschritt-Modellvorhersage, in welcher mehr als nur der nächste Zeitpunkt in die Zukunft prognostiziert wird.	<ul style="list-style-type: none"> Hybride Prognoseberechnung mit Kurz- und Mittelfrist-Prognose-Kombination Parallele Prognoseerstellung für unterschiedliche Zeitaufösungen Effiziente Datenablage
Ausfallsicherheit	Das System besteht aus mehreren komplexen Modulen, die für den Betrieb korrekt zusammenspielen müssen. Fehler in einem Modul, Input-Daten oder Hardwareausfälle (in beschränktem Masse) sollen nicht den Betrieb des Systems beeinträchtigen	<ul style="list-style-type: none"> Modularer Aufbau mit loser Kopplung der einzelnen Module Intelligente Fehlerbehandlung GRID-basierte Hardware-Lösung
Flexible Datennutzung und Datenzugriffsoptionen	Output-Daten des Systems werden in unterschiedlicher Form von verschiedenen Teildiensten benötigt. Output-Daten müssen daher in wiederverwertbarer Form vorliegen. Externe Fachapplikationen des ASTRA (insb. VM-CH) müssen Zugriff auf Output-Daten mit Feedback-Funktion haben.	<ul style="list-style-type: none"> Modularer Systemaufbau mit effizienter Wiederverwertung von Outputdaten Zugriffsmöglichkeiten via Datenbank-Interface oder systemspezifische Schnittstellen
Erweiterbarkeit	Das System muss methodenseitig und datenseitig erweiterbar sein. Die Erweiterbarkeit soll mit geringem Aufwand realisierbar sein.	<ul style="list-style-type: none"> Modularer Systemaufbau Lose Kopplung der Module (d.h. Erweiterungen sind i.A. möglich, ohne dass weitreichende Systemanpassungen nötig sind.

		<ul style="list-style-type: none"> • Automatische Modellkombination zur Selektion des optimalen „Methoden-Mixes“ mit kleinstem Prognosefehler
Einfache, kostensparende und etappierbare Systemimplementation	<p>Die Systemimplementation ist sehr herausfordernd: Einerseits muss eine möglichst hohe Prognosequalität erreicht werden, andererseits ist die technische Implementation (parallele Verarbeitung, DB-Anbindung etc.) relativ komplex. Es sollen daher auf technischer Seite möglichst existierende Lösungen verwendet werden, um den Aufwand zu verringern.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Standardisierte, best-practice Systemarchitektur • Verwendung moderner, standardisierter Technologien für parallele Datenverarbeitung (Message-Queue/GRID-Frameworks) und System-Monitoring (SQL-Reporting-Tools) • Modularer Systemaufbau

Die technische Umsetzung dieser Anforderungen wird im Detail in den Kapiteln IT-Konzept (Kapitel 6.6) und Prognosekonzept (Kapitel 6.5) beschrieben. Im Folgenden soll noch auf den allgemeinen Aufbau des Systems eingegangen werden (Kapitel 6.3.2). Dabei werden die Prozesse sichtbar, die im Basissystem abgebildet werden müssen.

6.3.2 Allgemeiner Aufbau der Systemarchitektur

In diesem Abschnitt wird der allgemeine Aufbau des Prognosesystems aus Prozesssicht erläutert. Die beschriebenen Pakete/Module stellen jeweils eine konzeptionelle Einheit dar, die nicht zwingend in einer EDV-technischen Einheit (ausführbares Programm, dynamische Programmbibliothek, Service usw.) isoliert werden muss. Mit der vorgeschlagenen Architektur soll den zuvor beschriebenen Diensten Rechnung getragen werden und die Erkenntnisse aus den bisherigen APs integriert werden. Es werden konkret die folgenden Ziele angestrebt:

- **Modularer, erweiterbarer Systemaufbau:** Das System ist auf einen modularen Aufbau ausgelegt, der sich stark an den Prinzipien der serviceorientierten Architektur (SOA) orientiert. Dies ermöglicht sowohl eine Erweiterbarkeit des Systems bei neuen Verfahren oder neuen Anwendungsgebieten, als auch den Austausch oder die Erweiterung einzelner Komponenten ohne Konsequenzen für andere Komponenten.
- **Skalierbarkeit:** Ziel der vorgestellten Architektur ist es, ein Rahmenwerk zu geben, welches in Bezug auf zukünftige Entwicklungen optimal skalierbar ist, sowohl was Rechenzeit- als auch Speicherbedarf anbelangt.
- **Sicherstellung einer hohen Systemverfügbarkeit:** Das zu entwickelnde System muss in der Lage sein, aus sämtlichen verwendeten Inputdaten zeitnah Prognosen anzustellen. Es darf nicht aufgrund von Fehlern in Teilbereichen zu einem Ausfall des Gesamtsystems kommen.
- **Sicherstellen einer konsistenten, modularen Datenhaltung:** Sämtliche Informationen unterstehen einem jeweils zuständigen Modul, das über die uneingeschränkte jeweilige Datenhoheit verfügt. Ein Datenzugriff erfolgt immer über das jeweilige Modul. Damit wird beispielsweise sichergestellt, dass ein Strassenabschnitt immer auf die gleiche Art interpretiert wird.
- **Zentrale, konsistente und robuste Koordination der Module:** Die Koordination der Module erfolgt stets über ein zentrales, gemeinsames Interface. Dies erlaubt eine konsistente und robuste Programmierung von Modulen gegen einheitliche Schnittstellen. So kann beispielsweise ein Prognose-Modul mittels minimalen und konsistenten Interface-Informationen auf die Methoden und damit Daten eines Import-Moduls zugreifen.
- **Aufbau eines methodisch und begrifflich einheitlichen Rahmenwerks:** Die Architektur als Ganzes legt den Abbildungsumfang fest; sie präsentiert gegenüber den Systemnutzern eine einheitliche Begrifflichkeit. Zum Beispiel gehorcht der Prognosebegriff einer einheitlichen Systematik: Begriffe werden konsistent verwendet.

Allgemeine Systemgrenzen

Die folgende Systemarchitektur basiert, unabhängig von ihrem Ausbau, auf den folgenden Systemgrenzen:

- **Datenerfassung:** Daten werden grundsätzlich nicht vom System an den Quellen erfasst, sondern müssen in einer maschinell importierbaren Form vorliegen.
- **Datenqualität:** Die Aufgabe des Systems ist die Weiterverarbeitung von Daten, wobei eine hohe Datenqualität vorausgesetzt wird. Das System übernimmt höchstens eine rudimentärere Plausibilitätskontrolle der zugelieferten Daten (Input-Daten). Es ist Aufgabe der Zuliefersysteme, eine hohe Datenqualität und Verfügbarkeit zu gewährleisten.
- **Basisdaten:** Die Verfügbarkeit sowie der zeitnahe Zugriff (d.h. die Zugriffszeit ist um Größenordnungen kleiner als das Prognose-Aktualisierungsintervall) werden bei allen einzubindenden Datenquellen (Input-Daten) vorausgesetzt.
- **Online-Betrieb:** Das System ist für den Online-Betrieb ausgelegt. Es muss sich dafür laufend an die abzubildende Situation (Strassennetz, Geschwindigkeitslimiten, kurzfristige VM-Massnahmen wie zusätzliche Pannestreifenspur, Ereignisse etc.) anzupassen. Diese Anpassungen sind von aussen einzuspeisen über entsprechende Schnittstellen.
- **Verkehrsmanagement:** Das System dient als operatives Informationssystem, welches mittels Prognosen die Verkehrssituation vorhersagt. Es kann in der vorgeschlagenen Konzeptionierung nicht zur Durchspielung von Verkehrsmanagement-Szenarien verwendet werden. Es liefert jedoch Input für die Ausführung von Verkehrsmanagement Massnahmen. Eine Erweiterung des Tools als Szenarieninstrument ist denkbar, war aber nicht Teil der Betrachtung.
- **Intervall-basierte Prognosen:** Das System errechnet die Prognose i.A. in periodischen Zeitabständen (Aktualisierungsintervalle) komplett für das ganze Netz neu und hält die Daten solange als aktuelle Prognose vor, bis das nächste Aktualisierungsintervall durchlaufen ist. Die alten Prognosen werden archiviert. Das vorgeschlagene System bietet grundsätzlich vordefinierte Prognoseintervalle an. Aufgrund des Datenbedarfes und der zeitnahen Prognoseberechnung im operativen Betrieb ist eine Anfrage-basierte Prognose-Berechnung nicht möglich (Ausnahme: Teildienst Reise- und Routenplanung TRRP). Die Nutzer des Systems können durch ihre Anfragen die Prognose abrufen, es erfolgt aber keine individualisierte Rechnung der Prognose.
- **Prognosehorizont:** Das System bietet Kurzzeitprognosen (wenige Minuten bis Stunden) und Mittelfristprognosen (mehrere Tage) an. Die Prognosequalität nimmt i.d.R. mit zunehmendem Zeithorizont ab.
- **Prognosequalität:** Die Prognosequalität kann aufgrund der Unsicherheit von prognostizierten Werten und dem noch ausstehenden Testbetrieb *a priori* nicht zuverlässig vorgegeben werden. Eine Erhebung und Ausweisung der Prognosequalität ist aber im Ausbau des Systems geplant.

Prozesssichtweise

Aus Sicht der involvierten Prozesse lässt sich ein Verkehrs- und Stauprognosesystem grundsätzlich in drei separate, seriell auszuführende Prozessschritte unterteilen:

1. **Preprocessing:** Die Natur eines Prognosesystems besteht in der Abbildung der Realität im bestmöglichen Masse. Dazu sind bestehende Daten als Input für ein solches System unerlässlich – sei es zur Modellkalibrierung, Verifikation oder Optimierung. Sämtliche Prognoseschritte und abgeleitete Daten basieren auf entsprechend aufbereiteten Input-Daten. Die adäquate Datenaufbereitung stellt daher den ersten Schritt des Prozessablaufes dar. Hier werden die Rohdaten (z.B. Detektordaten, strukturelle Daten des Strassennetzes, Witterung, Feriensaisons und Grossevents) eingelesen und aufbereitet. Im Rahmen der Qualitätssicherung wird die Güte der Information (darunter die Häufigkeit der Aktualisierung, Genauigkeit u.a.) festgehalten, ebenso findet eine rudimentäre Filterung nach fehlerhaften Daten statt. Die Hauptfunktion dieses Teilbereichs innerhalb des Gesamtsystems ist die Aggregation der Daten aus der Umgebung und deren Aufbereitung für die Prognosen. Da die benötigte Daten-

aggregation wesentlich von den verwendeten Prognosemethoden abhängt, stellt die Datenaufbereitung im Preprocessing-Schritt ein integraler Bestandteil des Systems dar und kann sehr wahrscheinlich nicht oder höchstens in kleinem Umfang auf andere Systeme (VM-CH etc.) ausgelagert werden.

2. **Prognose:** Nach der benötigten Datenaufbereitung werden Prognoseprozesse durchlaufen, die aus den Inputdaten Prognosewerte erzeugen. Ebenso werden in diesem Schritt die verwendeten Algorithmen kalibriert und optimiert. Die generierten Prognosegrößen sind querschnitt- oder segmentbezogene Daten, die sich direkt noch nicht für die oben genannten Anwendungen eignen.
3. **Postprocessing:** In diesem Prozessschritt werden die Prognosen für den Export aus dem Prognosesystem heraus formatiert oder auch aggregiert. Es ist die Aufgabe dieses Teilbereichs, die Prognose-Informationen je nach Anwendungsbereich entsprechend aufzubereiten. Er hat somit mit der Prognoseerstellung nichts mehr zu tun, sondern kümmert sich spezifisch um die entsprechenden Export-Formate und die Schnittstellen im Sinne der definierten Teildienste. Beispiele für diesen Postprocessing-Prozess sind die Aufbereitung der Daten zur Darstellung der Prognosen auf geografischen Karten mit streckenbezogener Verkehrsstatus-Angabe und deren graphische Präsentation, oder die Berechnung und Darstellung einer Reisezeit zwischen zwei Punkten aufgrund des schnellsten Wegs.

Die entsprechenden Prozessschritte sind in Abbildung 43 schematisch dargestellt. An der Prognosesystem-Grenze sieht man den Import von Rohdaten aus der Umgebung und den Export der erstellten Prognosedaten. Speziell daran ist, dass die Umgebung das Quellsystem von Rohdaten einerseits und Zielsystem von Prognose-Export andererseits ist. Die Umgebung beeinflusst das Prognosesystem und das Prognosesystem die Umgebung. Man kann hier von einem „geschlossenen Kreislauf“ sprechen.

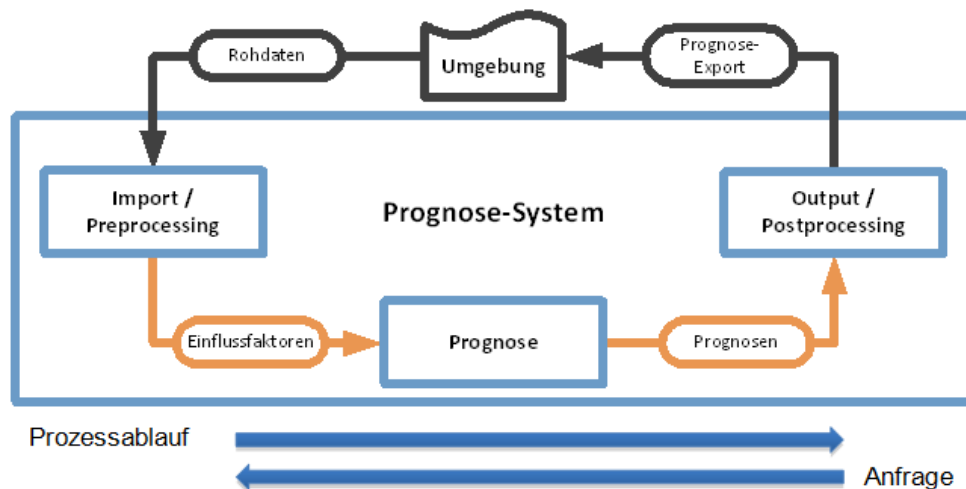


Abbildung 43 Prozessablauf Prognosesystem mit den drei Teilprozessen Preprocessing, Prognose und Postprocessing

Während die Datenverarbeitung im Grunde immer dem oben genannten Ablauf folgt, präsentiert sich die Prozessabfolge aus Anwendersicht genau in umgekehrter Abfolge, dargestellt durch den gegenläufigen Pfeil in Abbildung 43: Der Benutzer interagiert mit einem System im allgemeinen über Anfragen (Requests). Beispiel eines solchen Requests ist die Darstellung der Verkehrssituation am Gubristunnel am Samstagabend an Ostern um 19:00 bei gutem Wetter, oder die Reisedauer zwischen Bern und Zürich. Um solche Anfragen beantworten zu können, muss das System im Prinzip zuerst eruieren, welche Prognose Schritte für die Antwort nötig sind (z.B. werden für die Reisedauer Bern → Zürich Reisezeitprognosen aller Segmente auf den üblichen Verkehrsstrecken zwischen Bern und Zürich zum gewünschten Abfahrtszeitpunkt benötigt). Nachdem die relevanten Prognoseinformationen bestimmt sind, müssen nun die dafür nötigen Inputdaten ausfindig gemacht werden. Erst dann ist die Prozesskette zwischen Input, Prognose und Out-

put bekannt und kann berechnet werden. Dieser umgekehrte Abfrage-Ablauf stellt ein zentrales Performance-Problem dar, welches in Kapitel 6.4 im Detail analysiert wird.

Glücklicherweise kann ein Grossteil der anstehenden Berechnungen unabhängig von individuellen Requests durchgeführt werden, indem der Prozessablauf zu wohldefinierten, systemweit synchronisierten Zeitintervallen durchlaufen wird mit einer Ablage sämtlicher prognostizierter Grössen in einer Datenbank. Eine Benutzerabfrage reduziert sich dann in den meisten Fällen (Ausnahme: Reisezeitenberechnung) auf eine einfache Datenbankabfrage. Diese Aktualisierungsintervalle können (müssen aber nicht) den algorithmischen Prognosezeitschritten entsprechen.

Systemaufbau und Modularisierung

Die im vorherigen Kapitel aufgezeigten abstrakten Prozessschritte *Preprocessing*, *Prognose* und *Postprocessing* stellen die Grundpfeiler der Modularisierung der Systemarchitektur dar. Das System ist somit aus den folgenden Systemteilen aufgebaut (siehe auch Abbildung 44):

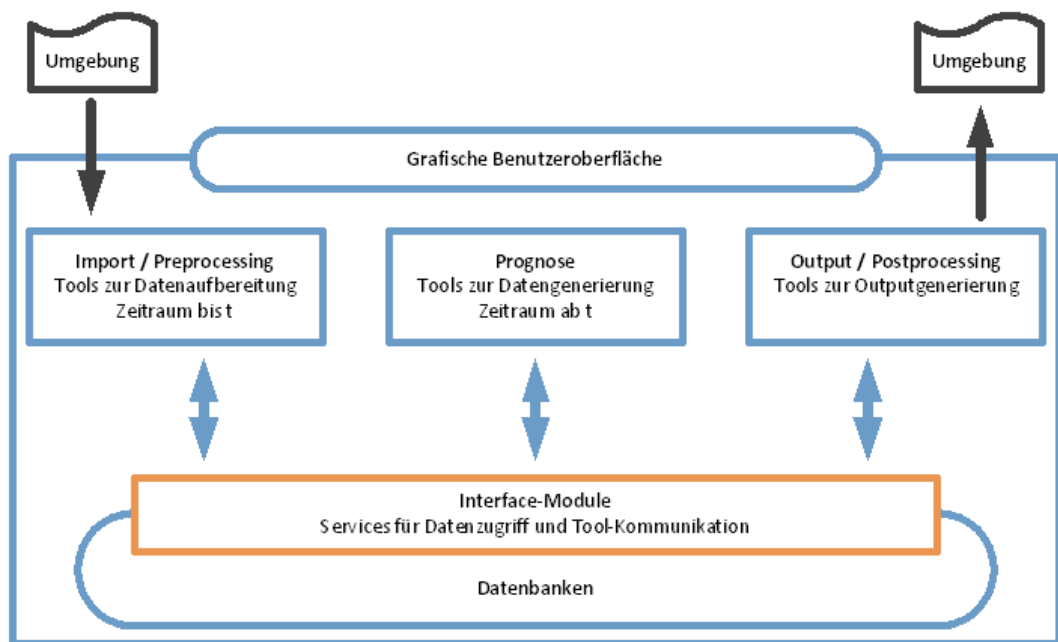


Abbildung 44 Modularisierter Systemaufbau

- **Graphische Benutzeroberfläche:** Der Anwender kommuniziert mit dem Prognosesystem mit Hilfe der Benutzeroberfläche. Die genaue Koordination der Module sowie die Architektur der Datenablage sind für den Anwender nicht ersichtlich. Die Benutzeroberfläche „versteckt“ diese Abhängigkeiten intern und bietet eine einheitliche Schnittstelle für das Verwalten von Modulen an. Der Anwender ist so von technischen Details des Gesamtsystems weitgehend isoliert.
- **Preprocessing-Module:** Preprocessing-Module übernehmen die Funktion des Imports von Datenquellen (Verkehrsdaten, externe Einflussfaktoren, Wetterdaten), deren Filterung und Aufbereitung (Aggregation) sowie Ablage in der Systemdatenbank. Grundsätzlich ist es die Aufgabe dieser Module, sämtliche zur Systemzeit t verfügbaren Daten aufbereitet zur Verfügung zu stellen. Insbesondere kann es sich bei diesen Daten auch um in der Zukunft liegende Werte handeln (z.B. Wetterprognosen von MeteoSchweiz oder geplante Ereignisse wie Baustellen). Da die Inputdaten sehr heterogener Natur sind, wird pro Inputdatenquelle ein zuständiges Modul entworfen. Dies hat den Vorteil, dass unterschiedliche Inputmodule unabhängig voneinander entwickelt und verwendet werden können, wodurch die Erweiterbarkeit des Systems seitens Inputdaten ermöglicht wird.
- **Prognose-Module:** Prognose-Module haben die Aufgabe, aus den aufbereiteten Inputdaten der Preprocessing-Module entsprechende Prognosen anzustellen. Sie grenzen sich also durch den inhärenten Prognosecharakter von anderen Modulen ab.

Da die Algorithmik je nach Prognosegrösse unterschiedlich ist, sind für jede zu prognostizierende Grösse ein (oder mehrere) Prognosemodule nötig. Da Prognosealgorithmen teilweise auf prognostizierten Grössen beruhen können (z.B. Reisezeit auf prognostizierten Geschwindigkeiten), ist eine prozedurale Verknüpfung und Verschachtelung von Prognosemodulen möglich bzw. teilweise unumgänglich. Die prognostizierten Werte aller Module werden der internen Datenbank zur Verfügung gestellt.

- **Postprocessing-Module:** Postprocessing-Module bereiten die Daten für den Export aus dem Prognosesystem oder für die anwendungsbezogene Darstellung auf. Sie können dabei auf sämtliche Module des ganzen Systems zugreifen und so Daten aus verschiedenen Quellen und verschiedenen Prognosemodulen zwecks Steigerung der Prognosegüte vergleichen. Diese Outputmodule unterscheiden sich in ihrer anwendungsbezogenen Funktion. So ist z.B. ein Outputmodul für die Hochrechnung und Darstellung des Verkehrsaufkommens auf Strassenabschnitten zuständig, während ein anderes Modul eine Reisezeitabfrage implementiert. Sie richten sich insbesondere – im Gegensatz zu Preprocessing und Prognosemodulen - nicht nach Datentyp, sondern nach Funktion (siehe Teildienste). Um ähnliche Funktionen nicht mehrmals implementieren zu müssen, können Outputmodule aber wie Prognosemodule verknüpft werden. Beispielsweise kann die Hochrechnung von Verkehrsgrössen auf Segmente nachträglich von weiteren Postprocessingmodulen entweder für den Rohdaten-Export per Exportschnittstelle oder für die graphische Darstellung per Website verwendet werden.
- **Interface:** Über ein systemeigenes Interface kommunizieren die einzelnen Module miteinander und mit der Datenbank. Insbesondere findet die Prozesssteuerung über dieses Interface statt.
- **Datenbank:** Sämtliche persistenten Daten (Modul-Daten, Modelldaten, Konfigurationseinstellungen etc.) werden in einer Datenbank gespeichert. Ein Grossteil der Daten erlaubt eine Abspeicherung als key → value Paar und lässt sich daher in einer relationalen Datenbank (RDBMS, relational database management system) realisieren.

6.4 Etappierungs- bzw. Anwendungskonzept

6.4.1 Realisierbarkeit und Etappierungsvorschlag

Aufgrund der Abdeckungsanalyse zwischen Bedürfnissen, Methoden und Datenlage in Kapitel 6.2 lässt sich ein Etappierungsplan ableiten. Dafür wurden die Ergebnisse der beiden Analysen in Tabelle 38 und Tabelle 39 im Sinne eines Ampelsystems veranschaulicht. Die Farbcodierung bedeutet dabei:

- **Grün:** Die nötigen Voraussetzungen sind bereits jetzt erfüllt. Ein Testbetrieb ist direkt machbar und sinnvoll.
- **Orange:** Die Voraussetzungen sind grundsätzlich erfüllbar, es besteht aber noch grösserer Abklärungsbedarf. Ein Testbetrieb ist bereits planbar, kann aber noch nicht implementiert werden.
- **Rot:** Die Voraussetzungen sind nicht erfüllt und die zukünftige Situation ist momentan ungewiss.

In Tabelle 41 sind die Einschätzungen mit zusätzlichen Kommentaren zusammengefasst.

Vorbemerkungen:

- Abschnittbasierte Prognosen für die klassischen Verkehrsgrössen (Dichte, Fluss und Geschwindigkeit) sind auf Strassen mit Induktionsschleifen bereits mit den erprobten Methoden realisierbar.
- Daraus lassen sich Prognosen für Reisezeiten und Reisezeitverluste ableiten, d.h. aufgrund der vorhandenen Informationen schätzen. Solche abgeleiteten Prognosen sind aber mit einer verminderten Prognosequalität verbunden. Es wäre daher ein Vorteil, die Reisezeiten direkt zu bestimmen, etwa mittels neuronalen Netzen (siehe

Kapitel 4), Simulationen oder allenfalls über geeignete direkte Reisezeitklassifikationen.

- Bei der Datenlage für direkte Reisezeitprognosen ist folgendes zu bedenken: Gemessene Reisezeiten (etwa mit der Mustererkennungsmethode, siehe Kapitel 4 oder mittels Bluetooth, FCP,...) sind ankunftsbezogen, d.h. es ist bekannt, wie gross die Reisezeit eines Fahrzeuges war, nachdem es angekommen ist. Diese Informationen sind immer retrospektiv: Braucht ein Fahrzeug für einen Streckenabschnitt bei freier Fahrt 5 Minuten, so weiss man dies erst mit 5 Minuten Verzögerung. Entsteht während der Fahrt ein Stau und das Fahrzeug braucht 20 Minuten zur Durchfahrt, so treffen diese Informationen zur „aktuellen“ Reisezeit erst 20 Minuten verspätet ein - sie sind daher nicht direkt geeignet für eine *abfahrtsbezogene* Reisezeitprognose: Es könnte sein, dass sich bei Ankunft des Fahrzeuges nach 20 Minuten der Stau bereits wieder aufgelöst hat. Die ankunftsbezogene Reisezeit beträgt dann 20 Minuten für alle Fahrzeuge, die sich im Stau befanden. Die abfahrtsbezogene Reisezeit würde aber bereits wieder 5 Minuten betragen, da sich der Stau aufgelöst hat. Je länger der Stau, die Verzögerung oder der Strassenabschnitt ist, desto grösser wird die Diskrepanz zwischen ankunfts- und abfahrtsbezogener Reisezeit. Es ist eine noch zum Teil offene Frage, wie man aus den ankunftsbezogenen Daten abfahrtsbezogene Informationen ableiten kann. Tatsächlich scheinen die meisten aktuellen Systeme gänzlich auf eine Behandlung dieser zentralen Problematik zu verzichten und stellen daher gerade bei Verkehrsregime-Änderungen schlechte Prognosen an – genau in dieser Situation wäre eine gute Prognose aber wichtig.

Tabelle 41 Methoden- und Datenlage für die unterschiedlichen Kenngrössen

Bedürfnisse	Methoden	Daten (Eignung)
Prognostizierte Kenngrössen		
Reisezeiten / Reisezeitverluste	Reisezeiten können mit verminderter Genauigkeit aus den klassischen Verkehrsgrössen Dichte, Fluss und Geschwindigkeit abgeleitet werden. Genauer ist eine direkte Prognose der Reisezeiten z.B. mittels neur. Netzen oder durch genaue Simulationen.	Aktuelle abfahrtsbezogene Reisezeiten stehen immer nur verzögert zur Verfügung und sind unter Umständen für die Methodenkalibrierung bereits veraltet, wenn sie eintreffen. Inwiefern sich aus ankunftsbezogenen Daten zuverlässig abfahrtsbezogene Informationen ableiten lassen, ist zum Teil noch eine offene Forschungsfrage (siehe Bemerkung oben).
Staulängen	Exaktere Staulängen können wohl zuverlässig nur über Simulationen bestimmt werden. Die entsprechenden Methoden wurden in diesem Projekt nicht systematisch erprobt.	Die Kalibrierung von Simulationsmodellen ist angewiesen auf eine gute Datenlage. Die Eignung der bestehenden und geplanten Systeme ist unklar. Tests sind notwendig.
Verkehrslage/-zustand/-belastung	Die klassischen Verkehrsgrössen Dichte, Fluss und Geschwindigkeit können mit den vorhandenen Methoden gut prognostiziert werden.	Praktisch sämtliche Datenquellen unterstützen die Prognosen. Insbesondere die Induktionsschlaufendaten bieten eine gute Datengrundlage.
Staudauer	Die Staudauer kann bis zu einer gewissen Genauigkeit mittels Klassifikationsmethoden prognostiziert werden. Genauer wären wahrscheinlich Simulationen. Die entsprechenden Methoden wurden in diesem Projekt nicht systematisch erprobt.	Die Datenlage für die Klassifikationsmethoden zur Ermittlung der Staudauer sollte ausreichen. Tests dazu sind aber notwendig. Bez. Simulation stellt sich eine ähnliche Problematik wie bei den Staulängen.

<i>Prognosehorizonte</i>		
Kurzfristprognosen (Min - Std)	Methoden erprobt	Datenquellen geeignet
Mittelfristprognosen (Std - Tage)	Methoden erprobt	Datenquellen geeignet
<i>Räumliche Abdeckung</i>		
Schweiz	Methoden erprobt	Datenlage klar
Nahes Ausland	Methoden erprobt	Datenlage und Datenzugang unklar
<i>Strassenklassen</i>		
Nationalstrassen	Methoden erprobt	Datenlage klar
Kantonale HLS und HVS	Methoden erprobt	Abdeckung durch geeignete Datenquellen z.T. noch gering.
<i>Fahrzeugklassen</i>		
PW	Methoden erprobt	Datenlage klar
LW	Methoden erprobt	Datenlage klar
<i>Zeitintervall Aktualisierung</i>		
1-5 Minuten für Kurzfristprognose	Methoden erprobt	Datenlage klar
Längere Zeiträume für Mittelfristprognose	Methoden erprobt	Datenlage klar
<i>Berücksichtigte Einflussfaktoren</i>		
Momentaner Verkehr, Netzstruktur	Methoden klar	Kontinuierliche Verbesserung bei Datengrundlage zu erwarten
Wochentag	Methoden klar	Datenlage klar
Wetter, Witterung	Methoden für mittel- und langfristige Prognosen klar, Einbezug bei Kurzfristprognosen z.T. noch nicht erprobt bzw. unklar.	Beschränkung bei Prognosehorizont für Mittel- und Langfristprognosen. Beschränkung der räumlichen Genauigkeit bei Kurzfristprognosen.
Ferienkalender	Methoden klar	Daten klar für CH, allerdings ist es eine offene Frage, welche ausländischen Kalender berücksichtigt werden müssen.
Grossanlässe	Methodik bekannt, aber nicht erprobt	Ereignisse bekannt und planbar. Bei Einzelereignissen ist das statistische Datenniveau für Prognosen allerdings schwierig.
Baustellen	Methodik nicht erprobt, allenfalls sind Simulationen unerlässlich	Datenverfügbarkeit muss verbessert werden
VM-Massnahmen	Auf Methodenseite sind insbesondere die Auswirkungen von Rückkopplungseffekten durch VM-Massnahmen noch nicht sehr gut erforscht	Datenverfügbarkeit muss verbessert werden
Unfälle, andere Störungen	Methodik bekannt, aber nicht erprobt	Datenlage im Moment unzureichend

Die Etappierung erfolgt anhand dieser Bewertung. Nur Bedürfnisse, die sowohl methodenseitig als auch datenseitig gut abgedeckt sind, werden in der ersten Etappe des Systems realisiert. Die Aufteilung der weiteren Bedürfnisse auf spätere Etappen ist durch ei-

ne Einschätzung der Unsicherheiten bei der Realisierung vorgenommen worden. Insgesamt erfolgt der Ausbau in 4 Etappen (s. Tabelle 42).

Tabelle 42 Die 4 Etappen des Systemausbaus

Bedürfnisse	Methoden	Daten	Etappen			
			1. Etappe	2. Etappe	3. Etappe	4. Etappe
<i>Anwendungszwecke im Sinne der Teildienste</i>						
Verkehrsinformationsprognose	■	■	Teilweise, mit Ausbaustufen			
Reise- und Routenplanung	■	■				
Verkehrsmanagementprognose	■	■	Teilweise, mit Ausbaustufen			
<i>Kenngrössen</i>						
Reisezeiten	■	■	nur abgeleitet			
Reisezeitverluste	■	■	nur abgeleitet			
Staulängen	■	■	nur abgeleitet			
Verkehrslage/-zustand/-belastung	■	■				
Staudauer	■	■	nur abgeleitet			
<i>Prognosehorizonte</i>						
Kurzfristprognosen (Min - Std)	■	■				
Mittelfristprognosen (Std - Tage)	■	■				
<i>Räumliche Abdeckung</i>						
Schweiz	■	■				
Nahes Ausland	■	■				
<i>Strassenklassen</i>						
Nationalstrassen	■	■				
Kantonale HLS und HVS	■	■				
<i>Fahrzeugklassen</i>						
PW	■	■				
LW	■	■				
<i>Zeitintervall Aktualisierung</i>						
1-5 Minuten für Kurzfristprognose	■	■				
Längere Zeiträume für Mittelfristprognose	■	■				
<i>Berücksichtigte Einflussfaktoren</i>						
Momentaner Verkehr, Netzstruktur	■	■				
Wochentag	■	■				

Wetter, Witterung						
Ferienkalender			Nur CH			
Grossanlässe						
Baustellen						
VM-Massnahmen			ZT	ZT	ZT	
Unfälle, andere Störungen						Falls möglich

Bemerkungen:

- Die Kurz- und Mittelfrist- Prognosen der Verkehrssituation (Dichte, Geschwindigkeit etc.) können in der ersten Etappe realisiert werden. Da diese Informationen relevant sind für die Verkehrsinformationsprognose und die Verkehrsmanagementprognose wird die Abdeckung dieser Anwendungszwecke gleich ab der ersten Etappe realisiert. Gewisse Funktionalitäten dieser Teildienste werden allerdings erst in späteren Ausbauphasen zur Verfügung gestellt.
- Der Teildienst Reise- und Routenplanung wird erst ab der 2. Etappe realisiert

6.4.2 Etappierung Basissystem und Teildienste

Die Basisdienste, d.h. alle technischen Hintergrunddienste, müssen in der ersten Etappe zur Verfügung gestellt werden, da sie Voraussetzung für alle anwenderbezogenen Dienste sind. In den 4 Etappen sollen dann schrittweise die Funktionen der Teildienste realisiert werden nach folgendem Ablauf (Tabelle 43):

Tabelle 43 Ausbauetappen der Teildienste

Ausbaustufe	Funktionsumfang		
	Verkehrsinformationsprognose VIP	Reise- und Routenplanung	Verkehrsmanagementsprognose VMP
Etappe 1	<ul style="list-style-type: none"> • Segmentbezogene Prognose der Verkehrsdichte und Geschwindigkeiten (mit Unsicherheitsangaben). • Abgeleitete Prognose für Reisezeiten/ Reisezeitverluste • Abdeckung: Nationalstrassen und ausgewählte kantonale HLS • Vorhersagehorizont: fliegend 3min-24h für aktuellen Tag; Ganglinienprognose für mittelfristige Prognose • Aktualisierung: 3min für Kurzfrist, mehrmals täglich für Mittelfristprognosen • Abgeleitete Grössen: segmentbezogene Belastung, kategorisierter Zustand (frei, stockend etc.) • Darstellung als Kartenansicht, Auflistung von Segmenten mit stockendem Verkehr/Stau (Webservice) 	--	<ul style="list-style-type: none"> • Einbindung der Verkehrsinformationsprognose über Website/Webservice ohne spezielle Export/Import-Schnittstelle (in dieser Ausbaustufe unterscheidet sich die VMP nicht von der VIP) • VM-Eingriffe bei der Netzstruktur (z.B. Strassensperrungen) können manuell eingefügt werden
Etappe 2		<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Reisezeitprognosen auf selektierten Strassenabschnitten mit vorgegebenen Quelle-Ziel-Punkten (keine indi- 	<ul style="list-style-type: none"> • Angepasste Schnittstellen zur Verkehrsinformationsprognose: Analysefunktion (Fehlerhistorie), Interface zur Verwaltung von Event-

		<p>visualisierte Eingabe von Start und Ziel)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vorhersage-Horizont: On-trip • Aktualisierung: 30sek-1min • Abgeleitete Grössen: Reisezeitverlust • Darstellung: Auflistung der streckenbezogene Reisezeitinformation (Web/Webservice) 	<p>/Kalenderdaten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schnittstelle on-trip Reisezeit-Daten (Echtzeit) zur möglichen Verwendung auf Wechseltextanzeigen/Verkehrsmeldungen
Etappe 3	<ul style="list-style-type: none"> • Darstellung segmentbasierte Reisezeitverluste via bestehendem Interface (als Zusatzinformation) • Abdeckung: Nationalstrassen und kantonale HLS/HVS 	<ul style="list-style-type: none"> • Segmentbezogene Prognose der Reisezeiten. • Abdeckung: Nationalstrassen, kantonale HLS und HVS • Vorhersagehorizont: pre-trip (Stunden/wenige Tage) mittels Ganglinienprognosen • Benutzerinterface zur Eingabe von Start-Ziel-Punkten • Routing basierend auf aktuellen Geschwindigkeiten (nur rudimentäres Rerouting in Abhängigkeit der prognostizierten Geschwindigkeiten mittels Basisprognosen). • Angabe Reisezeitverlust gegenüber Situation „freier Verkehrsfluss“ 	<ul style="list-style-type: none"> • Verwendung Reisezeitprognosen gemäss Standard-Benutzerinterface ohne spezielle Schnittstellen • Schnittstelle zur Auflistung von Segmenten mit erheblichem (prognostiziertem) Reisezeitverlust • Schnittstelle pre-trip Reisezeit-Daten (Echtzeit) für vordefinierte Segmente zur möglichen Verwendung auf Wechseltextanzeigen/Verkehrsmeldungen
Etappe 4	<ul style="list-style-type: none"> • Staulängenberechnung mittels Anbindung Simulationen • Abdeckung: Segmente/Abschnitte mit prognostizierter Staugefahr • Simulations-Prognosehorizont: bis 1h, Aktualisierung alle 3 min • Darstellung Stauinformation via bestehendem Interface (als Zusatzinformation) • Verbesserung Verkehrszustandsprognosen durch Simulation bei Regime-Wechsel 	<ul style="list-style-type: none"> • Rerouting basierend auf prognostizierten Segmentreisezeiten • Verbesserte Reisezeitenberechnung durch Simulation kritischer Segmente 	<ul style="list-style-type: none"> • Schnittstelle Stauwarnung • Automatisierte Schnittstelle für VM-Massnahmen • Möglichkeit zur Simulation von Szenarien bei VM-Massnahmen prüfen

Analog zu Tabelle 43 für die Teildienste können auch die Etappen in Hinblick auf die prognostizierten Kenngrößen beschrieben werden (Tabelle 44).

Tabelle 44 Ausbautetappen bzgl. Kenngrößen

Etappe 1	Reisezeiten / Reisezeitverluste	Verkehrslage/-zustand/-belastung (Basisgrößen)	Staudauer / Staulängen
Erklärung	Reisezeiten als abgeleitete Größen	Kurz- und Mittelfristprognosen pro Segment (mit Unsicherheitsangaben).	Angabe der Staugefahr auf Abschnitten als abgeleitete Grösse
Datenquellen	Prognosen aus Verkehrslage/-zustand/-belastung	Detektordaten (Induktionsschleifen), diskrete Umfeld/Eventdaten (siehe 5.3 und Prognosekonzept)	Prognosen aus Verkehrslage/-zustand/-belastung
Algorithmen	Grösse wird aus prognostizierten Basisgrößen abgeleitet.	Kurzfrist: Zeitreihenprognosen mit Basisprognose Mittelfristig: Basisprognose über Ganglinienklassifikation (siehe Prognosekonzept)	Grösse wird aus prognostizierten Basisgrößen abgeleitet.
Genauigkeit	In Testcase zu eruiieren	Genauigkeit aus bereits gemachten Tests abschätzbar (AP 3/4)	In Testcase zu eruiieren
Bemerkung		Räumliche Auflösung und Abdeckung beschränkt	

Etappe 2	Reisezeiten / Reisezeitverluste	Verkehrslage/-zustand/-belastung	Staudauer / Staulängen
Erklärung	Direkte Reisezeitprognosen auf selektierten Strassenabschnitten mit vorgegebenen Quelle-Ziel-Punkten	Kurz- und Mittelfristprognosen pro Segment.	
Datenquellen	Detektordaten (Induktionsschleifen) und weitere verfügbare Quellen für Reisezeitbestimmung	+ Zusätzlich weitere verfügbare Datenquellen (z.B. FPD) integrieren	
Algorithmen	Neuronale Netze Klassifikationsverfahren	Verfeinerung der bestehenden	
Genauigkeit	In Testcase zu eruiieren, erste Abschätzung in AP3/4 gemacht: besser als in Etappe 1	Verbesserung in Testcase zu eruiieren	

Etappe 3	Reisezeiten / Reisezeitverluste	Verkehrslage/-zustand/-belastung	Staudauer / Staulängen
Erklärung	Zusätzlich mit Routing		Abschätzen der Staudauer und Staulänge
Datenquellen	Alle verfügbaren prüfen, Induktionszähler eher nicht ausreichend	Alle verfügbaren prüfen	Alle verfügbaren prüfen
Algorithmen	Routing-Algorithmen		Musterklassifikation
Genauigkeit	In Testcase zu eruiieren	In Testcase zu eruiieren	In Testcase zu eruiieren
Bemerkung		Verfügbarkeit weiterer Datenquellen im Moment noch nicht vollständig klar	

Etappe 4	Reisezeiten / Reisezeitverluste	Verkehrslage/-zustand/-belastung	Staudauer / Staulängen
Erklärung	Inkl. dynamisches Rerouting	Kurz- und Mittelfristprognosen pro Segment.	Simulation der Staudynamik
Datenquellen	Alle verfügbaren prüfen, Induktionszähler eher nicht ausreichend	Alle verfügbaren prüfen, Induktionszähler nicht ausreichend	Alle verfügbaren prüfen, Induktionszähler nicht ausreichend
Algorithmen	+Simulationen + dynamische Reroutingalg.	+Simulationen für kritische Stellen	+Simulationen
Genauigkeit	In Testcase zu eruiieren	In Testcase zu eruiieren	In Testcase zu eruiieren
Bemerkung	Verfügbarkeit weiterer Datenquellen im Moment noch nicht vollständig klar	Verfügbarkeit weiterer Datenquellen im Moment noch nicht vollständig klar	Verfügbarkeit weiterer Datenquellen im Moment noch nicht vollständig klar

Zusammenfassung: Wichtigste Meilensteine der Etappen:

1. Etappe:
 - Verkehrszustandsprognose als Basis (mit Unsicherheitsangaben, s. Kap. 4)
 - Beschränkung auf Detektordaten und Basisumfelddaten
 - Nationalstrassen und ausgewählte kantonale HLS
2. Etappe:
 - Direkte Reisezeitprognosen
 - Erweiterung auf FPD (oder FCD)
3. Etappe:
 - Erweiterung auf kantonale HLS/HVS
 - Routingfunktionen (mit rudimentärem Rerouting)
4. Etappe:
 - Simulation von neuralgischen Punkten
 - Volles Rerouting
 - Umfassende Umfelddaten
 - Automatisierte VM-Schnittstellen

6.4.3 Analyse Rechen- und Datenbedarf

Ein operatives Stauprognosesystem muss in der Lage sein, sämtliche nötigen Berechnungen innerhalb der vordefinierten Aktualisierungsintervalle abzuschliessen – das Preprocessing, die Prognoseberechnung und das Postprocessing – und zwar für das gesamte abgedeckte Strassennetz. Dies bedeutet ein erheblicher Rechenbedarf und benötigt die Ablage sämtlicher Outputdaten und einer grossen Datenmenge aus Zwischenschritten. In diesem Kapitel soll eine grobe Überschlagsrechnung für Daten- und Rechenbedarf angestellt werden für verschiedene Teildienste. Die Abschätzung erfolgt durch Analyse des Minimalausbaus (gemäss Teildiensten/Etappen) und des Maximalausbaus. Zu bemerken ist hierbei, dass Testanwendungen, die sich beispielsweise nur auf kleine Teilgebiete und reduzierte Funktionen beschränken, deutlich kleinere Anforderungen an Rechenzeit und Datenbedarf haben. Die vorliegende Analyse soll aber die Situation des flächendeckenden Einsatzes wiedergeben.

Minimalausbau (entsprechend Etappe 1)

Der Minimalausbau besteht aus der Prognose von segmentbezogenen Verkehrslagedaten (Dichte/Geschwindigkeit) für das Autobahnnetz der Schweiz mit Kurz- und Mittelfristzeithorizont. Diese Situation ist aus mehreren Gründen minimal in Bezug auf Daten und Rechenzeitanforderungen:

- Als Inputdaten werden nur Detektordaten (Dichte/Geschwindigkeit) sowie diskrete Eventdaten (Anlässe, Ferien- und Feiertagskalender etc., stündliche/tägliche Wetterdaten für Grossregionen) benötigt.

- Die Segmentprognosen lassen sich durch Vorstrukturierung und univariate Prognosemethoden pro Segment getrennt berechnen. Dieses Vorgehen lastet einen Grossteil der Berechnungen auf Vorstrukturierungen aus, welche nur sporadisch neu durchgeführt werden müssen. Die Berechnung der aktuellen Prognose ist daher sehr performant pro Segment.
- Die Outputdaten können effizient abgelegt und komprimiert werden, sodass sich der Speicherbedarf in Grenzen hält.

Das verwendete Verfahren ist in Kapitel 6.5 (Prognoseverfahren) beschrieben. Es benötigt die Schritte:

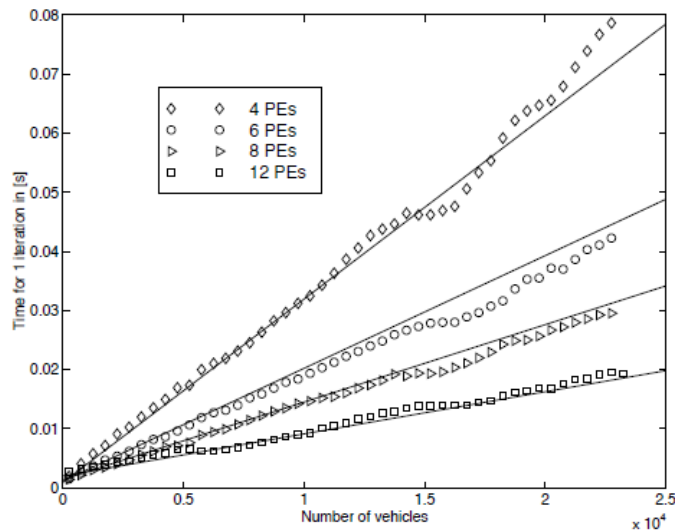
1. **Aggregation der Detektordaten:** Pro Detektor müssen 3min, 15min und 1h-Aggregationsdaten gesammelt werden. Pro Datenpunkt werden die Grössen Anzahl Fahrzeuge pro Richtung und Geschwindigkeit pro Richtung minimal benötigt, d.h. insgesamt 4 Fließkommazahlen. Dies resultiert in einem Speicherbedarf pro Detektor und Tag von knapp 10kB. Bei ca. 400 Detektoren schweizweit bedeutet dies nur ca. 4 MB Datenbedarf pro Tag. Die Event- und Kalenderdaten sind demgegenüber vernachlässigbar. Da pro 3min-Aktualisierungsintervall nur relativ wenig neue Einzelfahrzeugdaten anfallen, ist die Aggregationszeit pro Detektor im Millisekundenbereich anzusiedeln und wird wenig Einfluss auf die Gesamtperformance haben.
2. **Prognose basierend auf existierender Vorstrukturierung:** Tests mit nicht-optimierten MATLAB-Routinen haben ergeben, dass pro Detektor für eine Prognose einer Grösse in beiden Verkehrsrichtungen vom aktuellen Zeitpunkt bis Ende des Tages ca. 4 Sekunden benötigt werden. Die Prognose aller 400 Detektoren und der beiden Grössen Dichte und Geschwindigkeit braucht somit pro Aktualisierung und Prognosegrösse ca. 320 Sekunden auf einem Prozessor. Dies wäre deutlich mehr als das angestrebte Aktualisierungsintervall von 3 Minuten. Die Outputdaten pro Aktualisierungsintervall belaufen sich insgesamt auf ca. 3MB. Werden alte Prognosedaten zwecks späterer Analyse archiviert, so führt dies pro Tag insgesamt zu einem optimierten Speicherplatzbedarf von ca. 1MB (dabei werden nur Änderungen gegenüber der Basisganglinie gespeichert).
3. **Hochrechnung auf Segmente:** Die Hochrechnung benötigt eine lineare Interpolation der Einzelsegmentdaten. Der geschätzte Zeitbedarf dafür dürfte sich mittels Optimierung (Neuberechnung nur bei geänderten Prognosen) auf einige Sekunden beschränken. Der Datenbedarf ist wegen der ähnlichen Anzahl Segmente und Detektoren ähnlich gross wie bei Schritt 2.

Maximalausbau (entsprechend Etappe 4)

Der Maximalausbau besteht aus dem Minimalausbau und zusätzlich einer Reisezeitprognose mittels statistischen Verfahren, Rerouting und der Simulation von kritischen Abschnitten. Die benötigten Schritte umfassen dabei:

1. **Aggregation Reisezeiten:** Die Aggregation der segmentbasierten Reisezeiten wird entweder vom Reisezeit-Zulieferer (z.B. Swisscom) übernommen oder vom System durchgeführt. Der Rechenbedarf ist analog zur Detektoraggregation und vernachlässigbar (Voraussetzung: Trajektoriendaten bereits zur Verfügung gestellt vom Zulieferer). Der Speicherbedarf ist halb so gross pro Abschnitt wie bei der Detektoraggregation, da nur die Reisezeit pro Richtung benötigt wird. Er beläuft sich daher auf wenige MBs pro Tag (abhängig vom Auflösungsgrad seitens Zulieferer).
2. **Reisezeitprognose:** Das Prognoseverfahren pro Abschnitt ist ähnlich aufgebaut wie bei der Verkehrslageprognose mittels Detektordaten. Daher wird sich auch hier ein Rechenzeitbedarf von mehreren Minuten für alle Abschnitte ergeben. Als untere Grenze soll von 6 Minuten ausgegangen werden (entspricht vergleichbarer räumlicher Auflösung wie bei Detektorprognosen). Zusätzlich sollen abschnittsweise on-trip Prognosen angestellt werden. Diese benötigen die aktuellen Detektor-Geschwindigkeitsdaten, welche bereits vorliegen. Bei Verwendung eines bereits trainierten neuronalen Netzes ist mit einem Zeitbedarf im Millisekundenbereich für die on-trip-Prognose zu rechnen. Der Datenbedarf der Outputdaten mit Archivierung ist im Bereich von einigen kB pro Tag, da on-trip-Prognosen nur an einzelnen Strecken verwendet werden.

3. **Rerouting:** Das Rerouting (Routenführung angepasst an prognostizierte Reisezeiten unter Berücksichtigung, dass Reisezeiten während der Fahrt ändern) benötigt eine zeitintensive Optimierung, die jedoch nur selten durchgeführt werden muss und daher hier nicht berücksichtigt werden soll. Die Berechnung der besten Route ist dann im Millisekundenbereich (pro Anfrage) möglich, benötigt aber einen hohen RAM-Speicherbedarf. Es ist davon auszugehen, dass ca. 10 solche Requests pro Sekunde mit einem einzigen Webserver angeboten werden können [Delling, 2009].
4. **Simulation kritischer Stellen:** Die Simulation kritischer Abschnitte benötigt einen hohen Rechenbedarf. Ausschlaggebend dafür ist, wie viel schneller als Echtzeit die Simulation ablaufen muss. Bei einem Aktualisierungsintervall von 3min und einem Vorhersagehorizont von 15 min, müssen innerhalb von drei Minuten also 18 Minuten „Simulationszeit“ simuliert werden. Dies bedeutet eine sog. Realtime-Ratio R von 6. Gemäss [Dupuis, 2009] und Abbildung 45 sind bei einem Gesamtumfang von 15000 Fahrzeugen dafür ca. 4 Prozessoren nötig (parallele Berechnung). Der Zeitbedarf ist dann durch das Aktualisierungsintervall beschränkt, es werden also 4 Prozessoren für je 3 Minuten benötigt. Die Simulationsdaten werden im Arbeitsspeicher behalten, als Outputdaten sind nur Staulänge und bessere Reisezeitverlustschätzungen nötig. Diese Daten sind von vernachlässigbarem Umfang.



number of processors p	Ratio (R)
2	4.0
4	10.8
6	19.3
8	28.4
12	41.5
14	49.1

Abbildung 45 Oben: Zeit pro Simulationsiteration in Abhängigkeit der simulierten Fahrzeuge für 4, 6, 8 und 12 parallel verwendete Prozessoren. Unten: Gegenüberstellung der Realtime-Ratio R und der Anzahl verwendeter Prozessoren p , bei einer Simulationsgrösse von 15000 Fahrzeugen ()

Tabelle 57 und Tabelle 58 (im Anhang) liefern eine Zusammenfassung der Resultate mit zusätzlicher Skalierungsabschätzung. Es wurden dabei Prozesse, die offline ablaufen (also Prozesse, die nicht zeitkritisch sind und im Hintergrund laufen können, wie Vorstrukturierung etc.) und Online-Prozesse (zeitkritische Berechnungen) separat behandelt.

Schlussfolgerungen:

Bereits beim Minimalausbau wird pro Prognoseaktualisierung ein *Zeitbedarf* von ca. 3-5 Minuten benötigt, während bei Archivierung von Prognosedaten ein *Tagesdatenbedarf* von ca. 10MB entsteht. Zu diesem Zeitbedarf kommt ein moderater zusätzlicher Daten-

bedarf bei Maximalausbau hinzu, und ein deutlicher höherer Zeitbedarf von ca. $6+4*3=18$ min (umgerechnet auf Einzelprozessor-Rechenzeit). Während der Speicherbedarf grundsätzlich kaum eine Herausforderung darstellt, ist die Rechenzeit auf einem Prozessor schon beim Minimalausbau nicht ausreichend, um innerhalb eines einzelnen Aktualisierungsintervalls alle nötigen Daten zu prognostizieren. Es ist daher unabdingbar, die Berechnungen auf mehreren Prozessoren parallel durchzuführen. Für die Systemarchitektur bedeutet dies, dass ein verteilt rechnendes Systemkonzept nötig ist (distributed computing).

6.4.4 Kostenanalyse für die Etappierungsvarianten

Mit jeder Etappe steigen die Systemkomplexität und damit potentiell auch die Kosten für die Systementwicklung und den Systemunterhalt. Grundsätzlich dient der Etappierungsvorschlag allerdings der Kostensicherheit und der finanziellen Risikokontrolle. Die Kosten und Kostenrisiken können durch die Etappen aufgeschlüsselt und kalkulierbarer bzw. kontrollierbarer gemacht werden. Absolute Kostenschätzungen für die Systementwicklung würden eine detaillierte Planung von Arbeitspaketen voraussetzen. Kostensprünge können jedoch qualitativ gut abgeschätzt werden. Sie geschehen entlang von drei Dimensionen, die allerdings zum Teil voneinander abhängen:

- **Datenkomplexität:** Dabei geht es um die Menge und die Struktur der Daten, die in einer gewissen Zeit verarbeitet werden müssen. Die Datenkomplexität steigt insbesondere durch die Berücksichtigung weiterer Datenquellen (z.B. mehr Detektoren, zusätzlich FPD etc.) und durch die Integration weiterer Prognosealgorithmen. Kosten im Zusammenhang mit der Datenkomplexität entstehen insbesondere bei der Implementierung (Software/Hardware) und dem Management der Datenverwaltung und der Datenaufbereitungsmodule.
- **Prognosekomplexität:** Darunter versteht man die Anzahl erforderlicher Rechenoperationen pro Zeiteinheit zur Erstellung von Prognosen. Die Prognosekomplexität hängt insbesondere von der Komplexität der verwendeten Prognosealgorithmen (inkl. Datenaufbereitungsalgorithmen) und der Datenmenge ab. Hinsichtlich der Grösse des Netzes skaliert sie etwa linear. Kosten hinsichtlich der Prognosekomplexität entstehen insbesondere bei der Implementierung (Software/Hardware) und der Feinabstimmung der Algorithmen.
- **Netzkomplexität:** Je grösser das Netz und je komplexer die Struktur des Netzes im Sinne von Alternativen bei der Routenwahl, desto grösser die Netzkomplexität. Dies hat Auswirkungen auf die Datenkomplexität und die Rechenkomplexität, was zu entsprechenden Kosten beiträgt. Die Netzkomplexität ist nur ein Element der anderen Dimensionen.

Zusätzlich gibt es einen Kostenaufwand für die Implementierung der Basissysteme, der vor allem am Anfang anfällt. Die folgende Tabelle 45 enthält eine Abschätzung der Kostenaufwände, die in den Etappen anfallen. Die Tabelle zeigt vor allem Kostensprünge; die Beurteilung erfolgt relativ innerhalb jeder Dimension (klein = Grundaufwand, mittel = ca. 150% des Grundaufwandes, gross = mind. 200% des Grundaufwandes). Die Schätzungen widerspiegeln auch mehr oder weniger die zu erwartenden Kostenanteile innerhalb jeder Etappe.

Tabelle 45 Geschätzte zusätzliche Kostenaufwände

Dimension/Etappe	Etappe 1	Etappe 2	Etappe 3	Etappe 4
Basissystem	gross, da Basis für alle Etappen gelegt wird	klein	klein	klein
Datenkomplexität	mittel	mittel-gross durch Integration von FPD etc.	mittel-gross durch Integration von weiteren Datenquellen	Mittel - gross (Simulationen)
Rechenkomplexität	klein-mittel (Basialgorithmen)	mittel (zusätzliche Prognosealgorithmen)	mittel-gross (Routingalgorithmen)	gross, da Simulationen geplant
Netzkomplexität	klein	klein	mittel, da Ausbau des Netzes	klein

Abbildung 46 zeigt die geschätzte Kostenverteilung nochmals in Form eines Balkendiagramms.

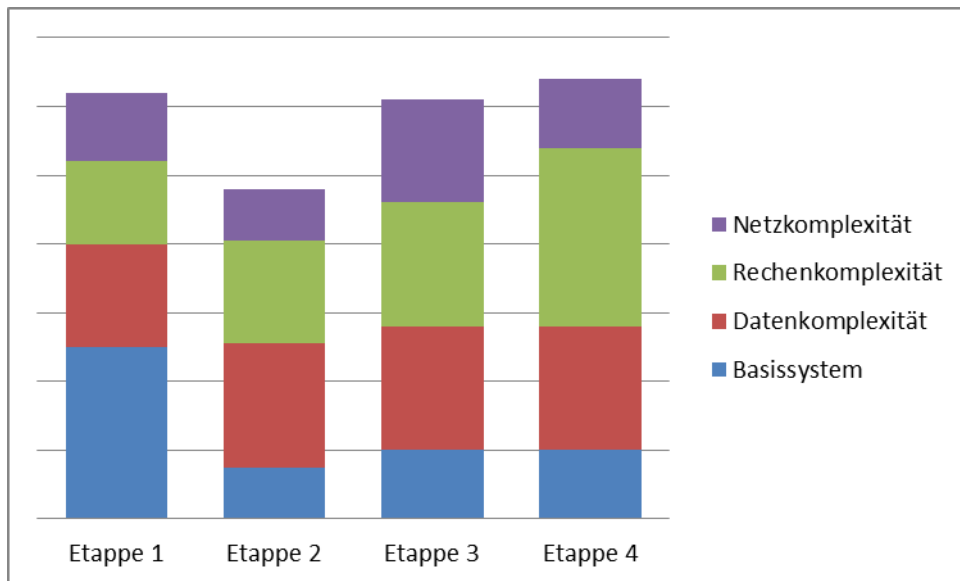


Abbildung 46 Geschätzter Kostenaufwand in relativen Einheiten eines angenommenen Grundaufwandes, aufgegliedert nach Etappen und unterschiedlichen Kostenfaktoren.

Bemerkungen:

- Ein Teil von Etappe 1, insbesondere das Basissystem, könnte idealerweise im Rahmen eines Testbetriebes mit verminderter Netzkomplexität realisiert werden (siehe Kapitel 7).
- Die zu erwartenden Unterhaltskosten steigen ebenfalls mit jeder Etappe. Eine zuverlässige Abschätzung lässt sich im Rahmen eines Testbetriebes durchführen.

6.5 Prognosekonzept

Die Arbeiten im Kapitel 4 haben gezeigt, dass nicht eine einzige, „beste“ Methode existiert, um zuverlässige Verkehrsprognosen im gewünschten Umfang (Kurz-/Mittelfrist, Outputdaten etc.) zu berechnen. Dieses Kapitel widmet sich daher der Frage, wie unterschiedliche Methoden konkret optimal kombiniert werden können, so dass ihre Stärken gegenseitig ergänzen. Das nachfolgende Prognosekonzept basiert auf der Erkenntnis, dass Verkehrsprognosen wiederkehrende Muster aufweisen, welche v.a. durch äussere Einflussfaktoren wie Wetter, Kalendertag etc. dominiert werden. Die Idee ist daher, diese bekannten Muster mit Zeitreihenmodellen zu kombinieren. In diesem Sinne konkretisiert und kondensiert dieses Kapitel die Ergebnisse aus Kapitel 4. Der Fokus des Prognosekonzepts liegt dabei vor allem auf der ersten Ausbaustufe (Etappe 1).

Schematisch läuft der Prognose-Vorgang folgendermassen ab:

1. In einem ersten Schritt findet eine Vorstrukturierung bzw. Vorsortierung des Verkehrsgeschehens statt, wobei hier auch externe Einflussfaktoren einfließen. Diese Vorstrukturierung stützt sich auf historisches Wissen. Mit dem Wissen über die Einflussfaktoren, die am zu prognostizierenden Datum/Zeit herrschen, wird daraus nun eine Basisprognose des Verkehrsgeschehens erstellt.
2. Gleichzeitig werden aufgrund der aktuellen Verkehrssituation Kurzfrist-Prognosen (mit Zeitreihenmodellen) erstellt.
3. Dabei wird aus mehreren Modellen automatisch der optimale „Modell-Mix“ ermittelt.
4. Die Basisprognose wird schlussendlich mit dieser Kurzfristprognose zu einer Hybridprognose angereichert.

Das Resultat dieser Prognose besteht aus einer floating-time Prognose. Dies bezeichnet eine Prognose, die den Prognosehorizont von 3 min bis max. 3 Monate beinhaltet. Dabei wird für Zeitpunkte, die in naher Zukunft liegen, automatisch die Zeitreihenprognose stärker gewichtet, während mit zunehmendem Prognosehorizont die Basisprognose, welche auf historischen Informationen beruht, dominiert (vgl. Kapitel 4.4).

6.5.1 Vorstrukturierung & Basisprognose

Die Vorstrukturierung hat zum Ziel, ähnliche Tagesganglinien zu Gruppen zusammenzufassen. Herkömmliche Clusteranalysen (wie auch in Kapitel 4 diskutiert) gruppieren ähnliche Verkehrsganglinien zu natürlichen Clustern. Das Problem dieses Vorgehens ist, dass nun nichts über die Struktur der erhaltenen Gruppen bekannt ist – man weiss zum Beispiel nicht, ob einer der Cluster aus Samstagen und Sonntagen besteht, oder ob eine Gruppe durch die Tatsache charakterisiert ist, dass sie das Schlechtwetter-Verkehrsgeschehen beinhaltet. In anderen Worten, die Assoziation von Einflussfaktoren und Clustern fehlt. Sie müsste mühsam von Hand angefertigt und nach eigenem Gutdünken interpretiert werden. Kenntnis dieser Zugehörigkeiten von Einflussfaktoren zu Clustern ist aber zentral, um eine Prognose anstellen zu können: Über den zu prognostizierenden Tag wissen wir meistens die Einflussfaktoren. Es stellt sich somit die Frage, wie mit dem Wissen der Einflussfaktoren die korrekte historische Situation, d.h. der ähnlichste Cluster, gefunden werden kann.

Das hier vorgeschlagene Verfahren nach [Chrobok, 2005] behebt diese Problematik durch ein doppeltes Clustering (DCA, double clustering algorithm), welches neben dem Clustering der Ganglinien auch ein Einflussfaktoren-Clustering vornimmt. Resultat dieser Vorstrukturierung – und darin unterscheidet sie sich von einfachen Clustering-Ansätzen – ist die Gruppierung von Einflussfaktoren mit ähnlichem Verkehrsgeschehen. Mit dem Wissen über Einflussfaktoren eines in der Zukunft liegenden Datums kann somit der zugehörige Cluster identifiziert werden, welcher am ehesten dieser Situation entspricht. Basierend auf dieser „Einordnung“ kann dann die Basisprognose angestellt werden (siehe Beispiel unten).

Der Ablauf des Algorithmus ist in Abbildung 47 dargestellt.

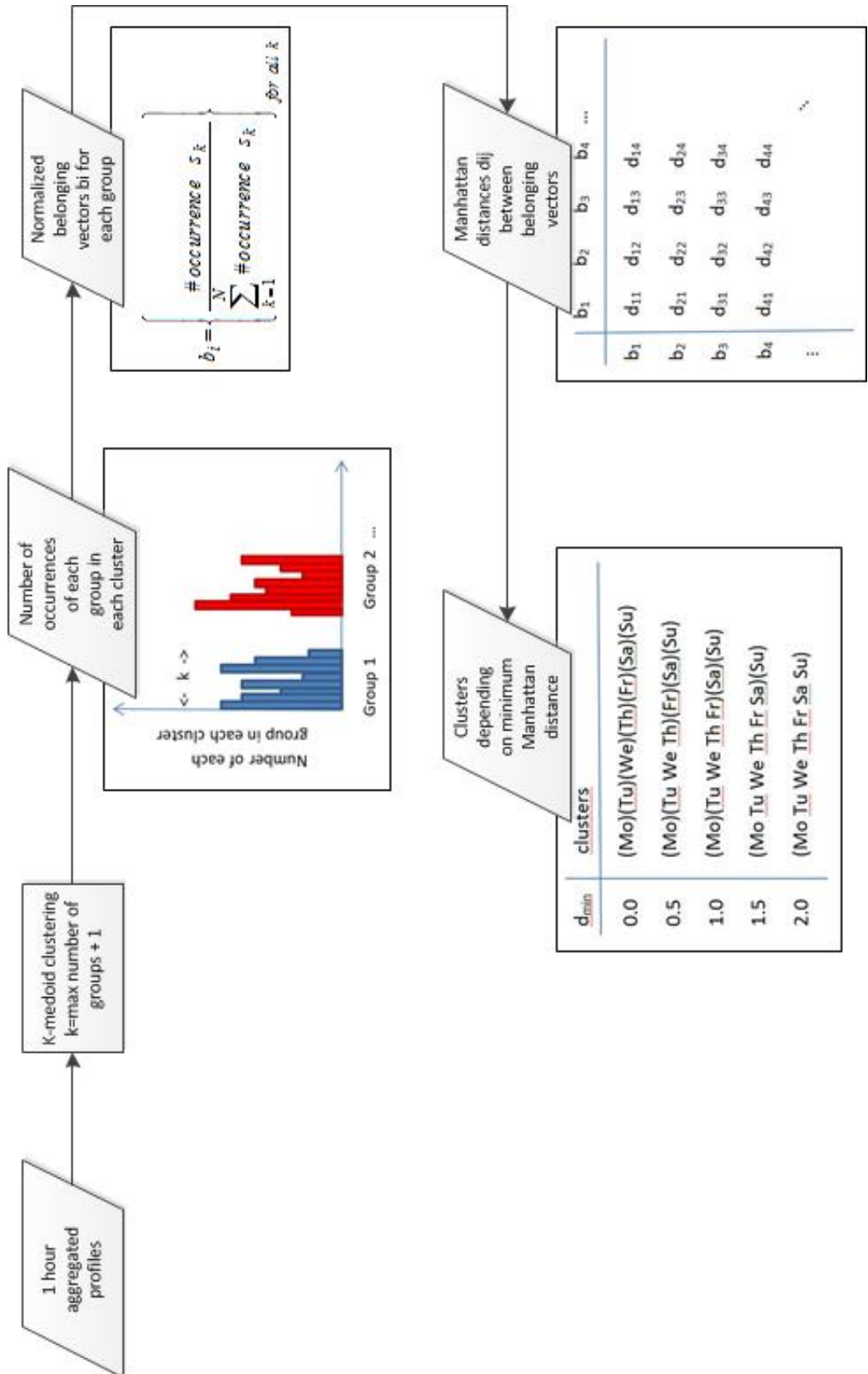


Abbildung 47 Ablauf des double clustering algorithms (DCA) gemäss [Chrobok, 2005]. Das Resultat der Analyse besteht im Gegensatz zu einfachen Clusteringanalysen in Clustern von Einflussfaktoren mit ähnlichem Verkehrsgeschehen.

Die Schritte von DCA im Detail sind:

1. **Attribute-Tagging:** Für jeden Detektor werden sämtliche historisch verfügbaren Tagesmessungen mit den damals vorherrschenden Einflussfaktoren versehen. Beispiel: Der 8. April 2007 erhält als Einflussfaktor das *Attribut* „Sonntag“, „Ostersonntag“, „Frühlingsferien“, „schönes Wetter“ etc. Dieses Tagging wird in einer separaten Datenbanktabelle abgelegt. Die Einflussfaktoren sind detektorbezogen, d.h. es können auch lokale Events etc. berücksichtigt werden, sofern es sich um repetitive Ereignisse handelt. Das Tagging kann grösstenteils automatisiert vorgenommen werden.

1h-Aggregation: Die 1h-Aggregationswerte der Tagesganglinien des Verkehrsaufkommens eines einzelnen Detektors werden erstellt für sämtliche verfügbaren historischen Daten. Es werden jeweils 1h-Aggregationswerte pro Fahrtrichtung, nicht aber pro Fahrspur verwendet (eine Aufteilung ist prinzipiell denkbar)

2. **K-medoid Clustering:** Die 1-h-Werte werden mittels eines k-Medoid Clustering-Algorithmus geclustert. Dabei wird die Gruppengrösse (Parameter k) grundsätzlich auf T+1 gesetzt, wobei T die Anzahl unterschiedlicher Attribute bezeichnet. Beispiel: Wenn 3 Wetterzustände (schlecht, mittel, schön) und die sieben Wochentage als externe Einflussfaktoren verwendet werden, ist die Attributgrösse T=10 und somit k=11. Die Idee hinter dieser Wahl ist, dass k genug gross gewählt wird, um prinzipiell einen Cluster für jedes Attribut zu erlauben. Als Distanzmass wird typischerweise die Manhattan-Distanz verwendet. Resultat ist ein Clustering von ähnlichen Tagesganglinien.
3. **Attribute-Cluster-Histogramme:** Für jedes Attribut (Sonntag, schlechtes Wetter, usw.) wird ein Histogramm erzeugt, welches aufzeigt, wie oft der Cluster k mit diesem Attribut vorkommt.
4. **Konstruktion der „Belonging-Vectors“:** Aus den Histogrammen werden die sogenannte Belonging-Vectors für jede Gruppe konstruiert. Die i-te Komponente des Vektors entspricht dabei der Anzahl gefundener Zugehörigkeiten der Gruppe zum Cluster i. Der Vektor wird entsprechend normiert mit der totalen Anzahl der gefundenen Zugehörigkeiten zu allen Clustern.
5. **Distanzen-Tabelle der Belonging-Vectors:** Paarweise wird die Manhattan-Distanz zwischen den Belonging-Vectors ermittelt.
6. **Clustering der Belonging-Vectors:** Belonging-Vectors mit einer kleineren Manhattan-Distanz als ein vorgegebener Schwellenwert werden zu einem Cluster zusammengefasst. Dies bildet den zweiten Clustering-Schritt des Verfahrens (daher der Name Double Cluster Algorithm, DCA). Für jeden Cluster wird notiert, welche der ursprünglichen Tagesganglinien ihm angehören. Die Ganglinien sind später für die Erstellung der Basisprognose relevant (s. unten).

Die Tages-Basisprognosen werden folgendermassen erstellt:

1. Ein Tag wird aufgrund seiner Attribute einer im DCA-Prozess gefundenen Attributklasse zugeteilt.
2. Die Basisprognose für den besagten Tag berechnet sich nun aus einem gewichteten Mittel sämtlicher in der Attributgruppe befindlichen Tagesganglinien. Für jede Ganglinie werden die x-Minuten-Ganglinienwerte für die Basisprognose verwendet gemäss folgendem Vorgehen: Für jedes x-Minuten-Intervall des zu prognostizierenden Tages sind die entsprechenden x-Minuten-Intervalle der Tagesganglinien chronologisch geordnet worden. Mit einem exponential smoothing Modell mit α werden diese Werte zu einem Prognosewert gemittelt. Dies bedeutet, dass ähnliche Tage, die zeitlich weniger lange zurückliegen, ein stärkeres Gewicht in der Prognose erhalten. Auf diese Art kann automatisch einer zeitlich langsam ändernden Dynamik (z.B. jährlich wachsendes Verkehrsaufkommen am Gotthard) Rechnung getragen werden. Der gleiche Prognoseschritt wird dann für das nächste x-Minuten-Intervall wiederholt usw., bis die Basisprognose des gesamten Tages erstellt ist. Die Parameter wurden in den bisherigen Analysen auf $x=15$ und $\alpha = 0.5$ gesetzt.

Das Prinzip der Vorstrukturierung und der abgeleiteten Basisprognose wird im Anhang V.2 an einem Beispiel erläutert und evaluiert.

6.5.2 Automatische Kurzfrist-Modellkombination

In Kapitel 4 wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen statistischen Zeitreihenmodellen vorgestellt, welche alle eine Einschrittprognose ermöglichen (d.h. Prognose einen Zeitschritt in die Zukunft). Die Benutzung solcher Algorithmen ist zwar nicht kompliziert, erfordert aber ein Tuning der Modellparameter, um optimale Prognosen zu erhalten – wohlgermerkt muss dies bei univariaten Modellen für jeden Detektor einzeln geschehen. Dadurch ist es mitunter sehr zeitaufwändig, die beste Methode mit den besten Parametern zu finden. Verschlimmernd kommt hinzu, dass sich die Modellparameter im Laufe der Zeit ändern können.

Eine Lösung für dieses bekannte Problem besteht darin, eine automatische Modellselektion und –Kombination vorzunehmen, die aus einem Pool von unterschiedlichen Modellen mit ihren Parametern eine Kombination errechnet, die optimal im Sinne des *a-posteriori*-Fehlers ist.

Ein vielversprechender Ansatz für eine automatische Modellkombination ist der sog. Bayesian Kombinationsansatz (bayesian combination approach, siehe [Zheng, 2006]). Dabei wird davon ausgegangen, dass eine Zeitreihe y_t durch eines von k Modellen mit Zeitreihen y_t^k optimal prognostiziert wird. [W. Zheng et al, 2006] verwenden das Bayes-Theorem, um eine Abschätzung zu erhalten für die posterior Wahrscheinlichkeit, dass Modell k das beste Modell ist. Die Wahrscheinlichkeit errechnet sich gemäss

$$p_t^k = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k}} p_{t-1}^k \cdot e^{-[(y_t - y_t^k)/\sigma_k]^2}}{\sum_{m=1}^K \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m}} p_{t-1}^m \cdot e^{-[(y_t - y_t^m)/\sigma_m]^2}}$$

worin p_{t-1}^k die frühere Wahrscheinlichkeit für Optimalität des k -ten Modells ist und σ_k die Standardabweichung des Modell k ist. Die Vorhersage basiert dann auf dem gewichteten Mittel aller Modelle, wobei mit der obigen Wahrscheinlichkeitsabschätzung gewichtet wird:

$$y_{t+1}^* = \sum_{k=1}^K p_t^k \cdot y_{t+1}^k$$

Vorteil dieser Methode ist, dass sie unabhängig von den Details der einzelnen Zeitreihenmodelle ist und daher beliebige Modelle ohne Anpassungen kombinieren kann. Im statistischen Sinne folgt auch, dass der Vorhersagefehler im Mittel immer geringer ist, wenn aus mehreren Modellen eine Durchschnitts-Prognose gebildet wird.

Resultate Modellkombination

Wir haben den obigen Algorithmus exemplarisch an zwei Zeitreihenmodellen überprüft: Modell 1 ist ein ARIMA(3,0,3)-Modell, welches an eine Geschwindigkeitszeitreihe gefittet wurde. Für Modell 2 ist ein Moving Average-Modell verwendet worden. Das heisst, $k=2$ in diesem Fall und die Standardabweichungen in obigem Ausdruck wurden basierend auf den bisherigen Abweichungen von Modell und wahren Werten errechnet. Die beiden Einschritt-Modellvorhersagen sind unten in Abbildung 48 abgebildet. Das Zeitintervall beträgt dabei immer 3 Minuten.

Die gewählten Modelle zeigen deutlich, dass das MA-Modell Nachteile beim Strukturbruch zeigt, dafür im Bereich des frei fließenden Verkehrs weniger Fluktuationen und daher tendenziell weniger Fehler aufweist.

Die Kombination der beiden Modelle ist in Abbildung 49 zu sehen, zusammen mit der Gewichtungsfunktion der zwei Modelle (Gewicht 1 bedeutet dabei, dass die Prognose nur

aus Werten des MA-Modells besteht). Während sich optisch kein gewaltiger Unterschied zwischen ARIMA(3,0,3) und der Modellkombination zeigt, so ist der statistische absolute Prognosefehler (MAPE) dennoch um ca. 3% reduziert worden.

MAPE ARIMA(3,0,3)	MAPE MA	MAPE Kombination
0.071	0.10	0.069

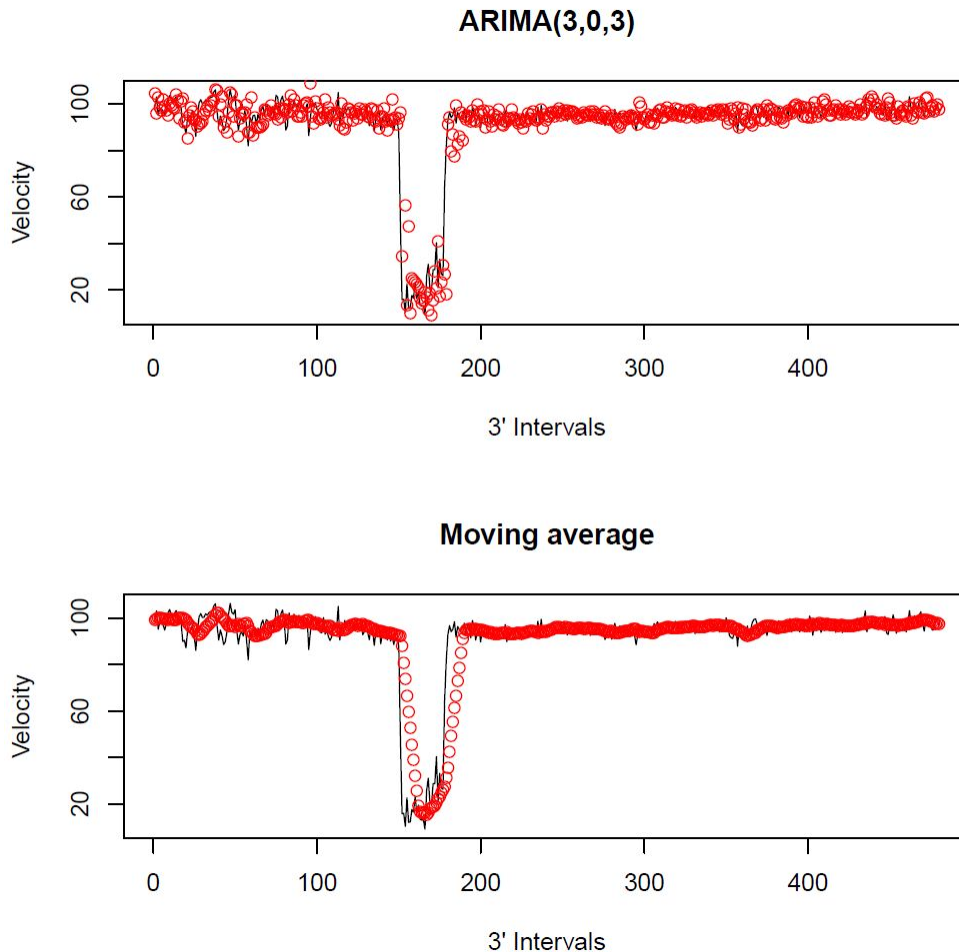


Abbildung 48 Einzel-Modellprognosen für ARIMA(3,0,3) und MA-Modell für eine Geschwindigkeitszeitreihe [ZHAW/Rapp, 2012c] mit Strukturbruch

Die Gewichtungsfunktion zeigt ausserdem, dass kurz nach Mitternacht und kurz vor dem Strukturbruch am Morgen das MA-Modell bessere Prognosen lieferte und daher bevorzugt gewichtet wurde. Am Strukturbruch selber und danach bietet das ARIMA-Modell die besseren Prognosen und wird daher dem MA-Modell vorgezogen.

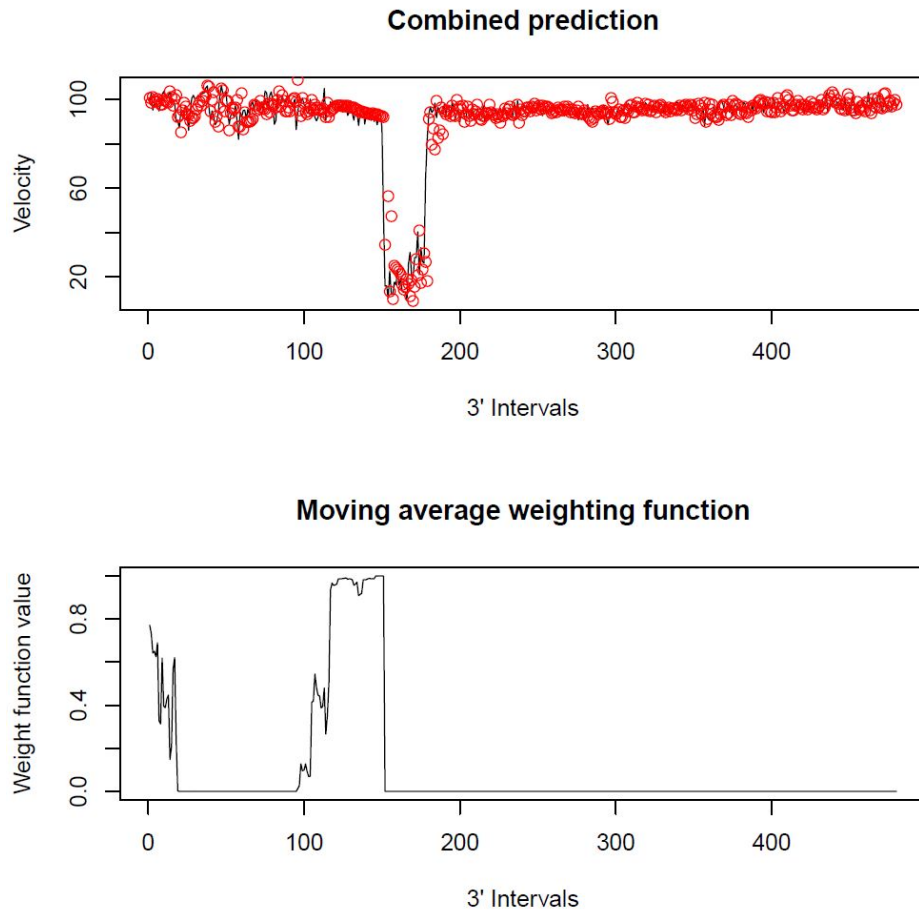


Abbildung 49 Automatische Modellkombination zwischen ARIMA(3,0,3) und einem Moving-Average-Modell (oben). Die Gewichtsfunktion des Moving-Average-Modells (unten) zeigt, dass das MA-Modell nur in der Nacht und kurz vor dem Strukturbruch bessere Prognosequalität als ARIMA liefert

6.5.3 Hybridprognose

Basisprognose und Kurzzeitprognosen haben unterschiedliche Prognoseanforderungen: Basisprognosen können weit im Voraus für den ganzen Tag erstellt werden, Kurzzeitprognosen, z.B. durch das oben beschriebene Modell-Kombinationsverfahren, nur jeweils für das nächste Zeitintervall. Es ist daher erstrebenswert, beide Prognosemethoden so zu vereinen, dass sich eine Hybridprognose ergibt, welche die Vorteile beider Ansätze vereint - Kurzzeitvorhersagen basierend auf aktuellem Verkehrsgeschehen und historisch-basierte Mittelfristprognosen.

Der einfachste Schritt in diese Richtung beruht darin, die Basisprognose durch das Wissen über die bisherige Verkehrssituation anzureichern (d.h. noch ohne eine Kurzzeitprognose anzustellen, resp. die Annahme ist hierbei, dass sich die aktuelle Situation kurzfristig nicht ändern wird). Gemäss [Chrobok, 2005] kann die aktuelle Situation J_{cur} mit der Basisprognose J_{hist} linear kombiniert werden, wobei abhängig vom Prognosehorizont t_h die Basisprognose ein linear anwachsendes Gewicht erhält.

Für den prognostizierten „Hybridprognosewert“ J_{prog} ergibt sich dann

$$J_{\text{prog}}(t_p) = J_{\text{hist}}(t_p) + k\Delta J(t_0)$$

mit

$$\Delta J(t_0) = J_{\text{cur}}(t_0) - J_{\text{hist}}(t_0),$$

$$k = \begin{cases} \eta \left(1 - \frac{t_h}{t_{\text{hmax}}}\right), & \text{if } 0 < t_h \leq t_{\text{hmax}}, \\ 0, & \text{if } t_h \geq t_{\text{hmax}} \end{cases}$$

$$t_h = t_p - t_0$$

Die Bedeutung der Ausdrücke ist folgende:

$J_{\text{prog}}(t_p)$: Vorhersage für Zeitpunkt t_p

$J_{\text{hist}}(t_p)$: Basisprognose für Zeitpunkt t_p

$J_{\text{cur}}(t_0)$: Letzter gemessener Wert zum Zeitpunkt t_0

t_0 : Zeitpunkt, zu welchem die Prognose berechnet wird (aktuelle Messung liegen daher bis t_0 vor)

t_p : Vorhersagezeitpunkt

η, t_{hmax} : Parameterwerte

Der Parameter t_{hmax} gibt dabei an, wie weit in die Zukunft die aktuelle Verkehrsinformation ein Gewicht haben soll – ab Zeitpunkt t_{hmax} ist die Prognose alleine durch die Basisprognose gegeben. Der Parameter η bestimmt den Einfluss der aktuellen Verkehrssituation (Wert 1 entspricht einer kompletten Gewichtung der aktuellen Verkehrssituation für den Zeitpunkt t_0).

Diese Art der Hybridprognose bedingt, dass sich die Tagesganglinien-Prognosen eines Tages dynamisch ändern, je mehr Information über das Verkehrsaufkommen verfügbar ist. Exemplarisch ist dies in Abbildung 50 für den Gotthard Detektor (gemäß Beispiel im Anhang V.2 gezeigt). Im Beispiel ist ersichtlich (Plot links oben), dass die Basisprognose (cyan) mit den wahren Werten (blau) nicht gut übereinstimmen. Ohne Wissen der aktuellen Verkehrssituation ist die Prognose daher relativ schlecht. Mit fortschreitender Zeit (Plot oben rechts) wird dem effektiv tieferen Verkehrsaufkommen Rechnung getragen, in dem die Hybridprognose (rot) nach unten korrigiert wird. Mit zunehmender Zeit und gemessenen Daten (grün) (Plot unten rechts) verbessert sich dadurch die Hybridprognose und stimmt dadurch besser mit den die tatsächlichen Werten überein.

Die obige Formulierung basiert auf der Annahme, dass sich das aktuell gemessene Verkehrsaufkommen zum nächsten Zeitpunkt hin nicht ändern wird. Anstelle dieser einfachen Annahme, die bereits eine Verbesserung der Basisprognose bewirkt, kann auch die oben vorgestellte Kurzfrist-Modellkombination verwendet werden. Die Idee ist dann, nicht nur das Wissen über den aktuellen Zeitpunkt, sondern auch die prognostizierten Daten als Korrektur zur Basisprognose zu benützen. Untersuchungen mit Einbezug eines ARIMA(3,0,3)-Modells haben aber nur kleine Verbesserungen des statistischen Fehlers gezeigt, da sich die verbesserte Kurzfristprognose nur auf wenige, unmittelbar folgenden Prognosen auswirkt.

Eine Analyse des statistischen Vorhersagefehlers ist in Abbildung 51 gezeigt. Dabei zeigt die horizontale Achse den Zeitpunkt für welchen die Prognose erstellt wurde, während die vertikale Achse angibt, wie viele Minuten diese Prognose im Voraus berechnet wurde. Wie zu erwarten zeigt es sich, dass kurzfristig berechnete Prognosen generell einen kleineren Fehler haben, da sie eben das aktuelle Verkehrsaufkommen berücksichtigen. Je grösser der Prognosehorizont wird, desto mehr basiert die Hybridprognose auf der Basisprognose und den historischen Werten – sie wird also schlechter. Wichtig ist jedoch, dass ab einem Vorhersagehorizont grösser als t_{hmax} die Hybridprognose nur noch auf der Basisprognose beruht, deren statistischer Fehler nicht mehr zunimmt mit wachsendem Vorhersagehorizont. Die Grafik in Abbildung 51 ist daher bei einem Vorhersagehorizont

von ca. 140 Minuten abgeschnitten, da der Fehler etwa dort den konstanten Wert der Basisprognose annimmt. Deutlich zu sehen ist in der Abbildung auch, dass Vorhersagefehler hauptsächlich zu Stosszeiten (morgens in Richtung 1, abends in Gegenrichtung) auftreten. Genau dann kann eine Verbesserung des Prognosefehlers erzielt werden, wenn das aktuelle Verkehrsgeschehen miteinbezogen wird.

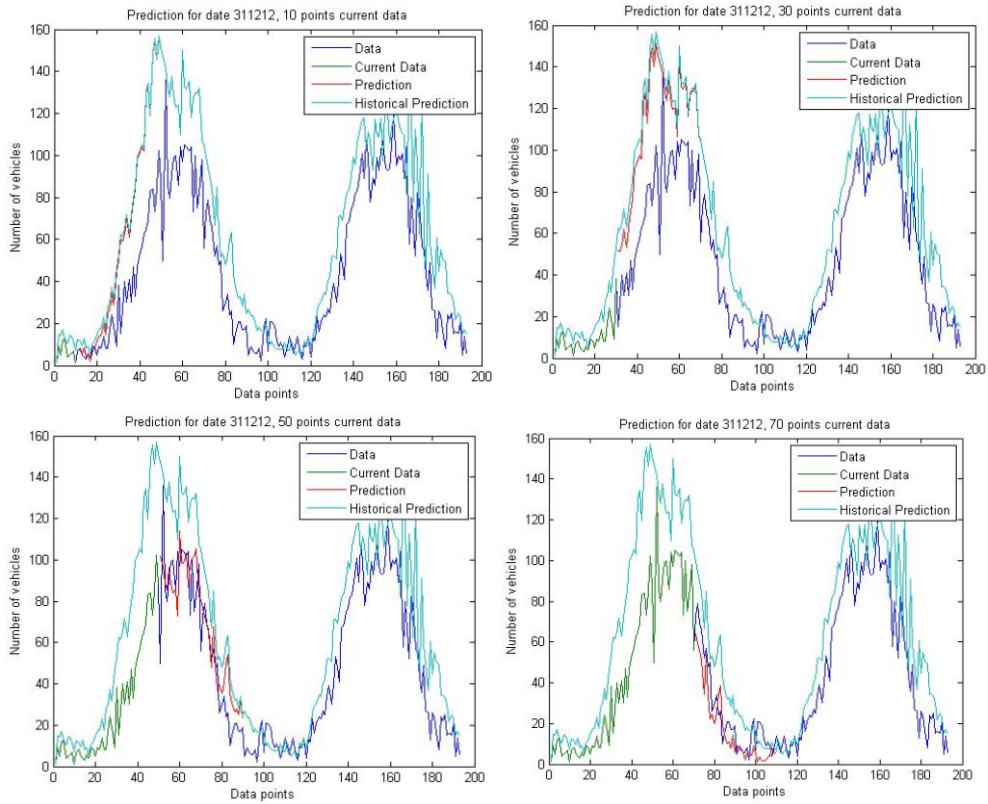


Abbildung 50 Dynamische Prognose der Tagesganglinie für verschiedene Zeitpunkte während des Tages

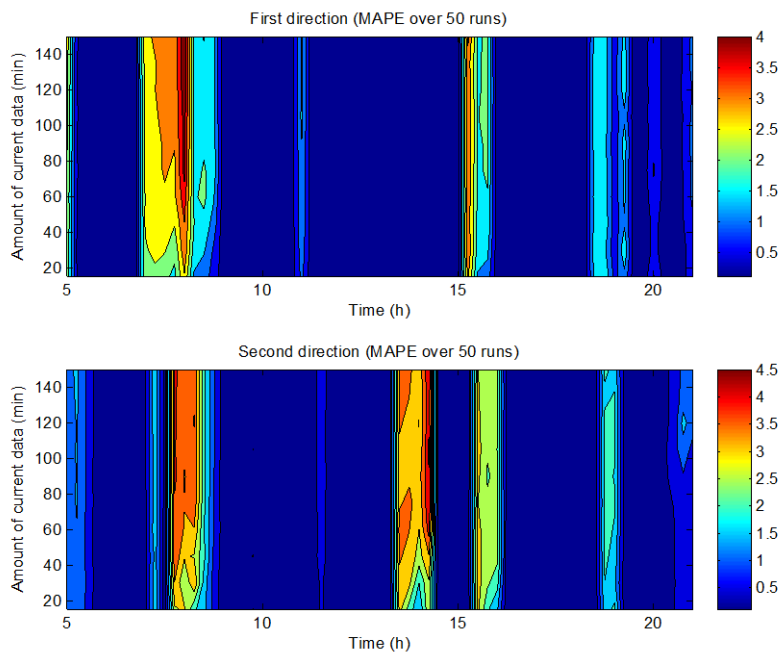


Abbildung 51 Prognosefehler der Hybridprognose in beide Richtungen

Das hier verwendete Hybridverfahren für Aufkommensprognosen kann gemäss [Matsumara] auch für Reisezeitprognosen verwendet werden, wobei anstelle des Verkehrsaufkommens gemessene Reisezeiten von Strassensegmenten verwendet werden. In Kombination mit den neu verfügbaren Swiscom-Reisezeit-Daten stellt diese Methode daher eine einfache Möglichkeit dar, aktuelle Reisezeitinformationen durch Prognosen zu ergänzen. Das im entsprechenden Reisezeit-Modul beschriebene Verfahren (Kapitel IT-Konzept) beruht daher auf demselben Prinzip wie das hier vorgestellte Hybridverfahren für die Verkehrsaufkommensprognose.

Weitere Methoden (etwa die direkte Reisezeitprognose mittels neuronalen Netzen), die nicht in der ersten Ausbaustufe implementiert werden, wurden im Kapitel 4 und z.T. detaillierter im Zwischenbericht AP3/4 [ZHAW/Rapp, 2012c] beschrieben.

6.6 IT-Konzept

In diesem Kapitel wird konzeptionell die technische Umsetzung des in den vorherigen Kapiteln skizzierten Systems beschrieben. Dazu gehören das Aufzeigen und Beschreiben von:

- Zusammenspiel der verschiedenen Algorithmen und Datensystemen im Tool
- Programmierungsplan für die einzelnen Methoden und das Gesamttool
- Schnittstellen zu anderen Applikationen VM CH

Das heisst, in wesentlichen Zügen sollen die Wege aufgezeigt werden, wie das operative System tatsächlich technisch zu implementieren ist. Zu diesem Zwecke befasst sich dieses Kapitel mit den folgenden Aspekten:

- Konzept der parallelen Datenverarbeitung im Basissystem
- Sicherstellung des zuverlässigen Prozessablaufes im Basissystem
- Einbindung des Systems in die Systemlandschaft von ASTRA
- Datenbankkonzept
- Module

Zu beachten ist, dass die ersten 4 Punkte schon für die erste Ausbaustufe des Systems relevant sind, um ein funktionierendes System zu ermöglichen. Die Etappierung betrifft in erster Linie den Ausbaustandard bei der Prognosefunktionalität, d.h. den Ausbau bei den Prognosemodulen.

6.6.1 Parallele Datenverarbeitung und Modulsynchronisation

Wie in Kapitel 6.4 analysiert, reicht die Rechenleistung eines einzelnen Prozessors nicht aus, um sämtliche nötigen Berechnungen zeitnah durchzuführen (d.h. innerhalb der gewünschten Aktualisierungsintervalle). Aus der Analyse der Input-Datenmenge und der benötigten Rechenpower (Kapitel 6.4.3), v.a. aber aufgrund der Ausfallsicherheit des Gesamtsystems ist eine parallele Abarbeitung möglichst vieler Prozessschritte unabdingbar. Grundsätzlich handelt es sich bei der Stauprognose um einen seriellen Prozess mit einer Hintereinanderschaltung von Prozessschritten (s. Kapitel 6.3.2). Jedoch können die einzelnen Prozessschritte meistens sehr effizient parallelisiert werden. Beispielsweise kann für sämtliche Detektor-Rohdaten das Preprocessing parallel auf mehreren Servern ausgeführt werden. Ebenso verhält es sich bei univariaten Prognosemethoden – sie hängen nur von den Daten eines einzigen Detektors ab und können somit pro Detektor parallel berechnet werden. Da die Module über die mehrprozess-taugliche DB ihre Daten austauschen, ist diese Parallelisierung relativ einfach möglich und kann teilweise asynchron erfolgen. Es muss jedoch mittels eines separaten Mechanismus an einigen Zeitpunkten für die Modulsynchronisation gesorgt werden – beispielsweise dürfen die Prognoseprozesse erst mit der Prognose-Berechnung starten, wenn die Detektordaten fertig aggregiert sind.

Message Queues zur Synchronisierung der Systemprozesse

Es gibt mehrere Möglichkeiten, parallele Prozesse miteinander zu synchronisieren. Bei lose gekoppelten Systemen, die mitunter auf mehreren Servern verteilt ablaufen, wird dazu meist ein *message queue* Konzept angewendet. Bei diesem Konzept kommuniziere-

ren die einzelnen Prozesse über kleine Meldungen (messages), die sie über einen gemeinsamen Kommunikationskanal systemweit, asynchron verschicken und empfangen. Message queues bestehen aus drei Komponenten, wie in Abbildung 52 dargestellt:

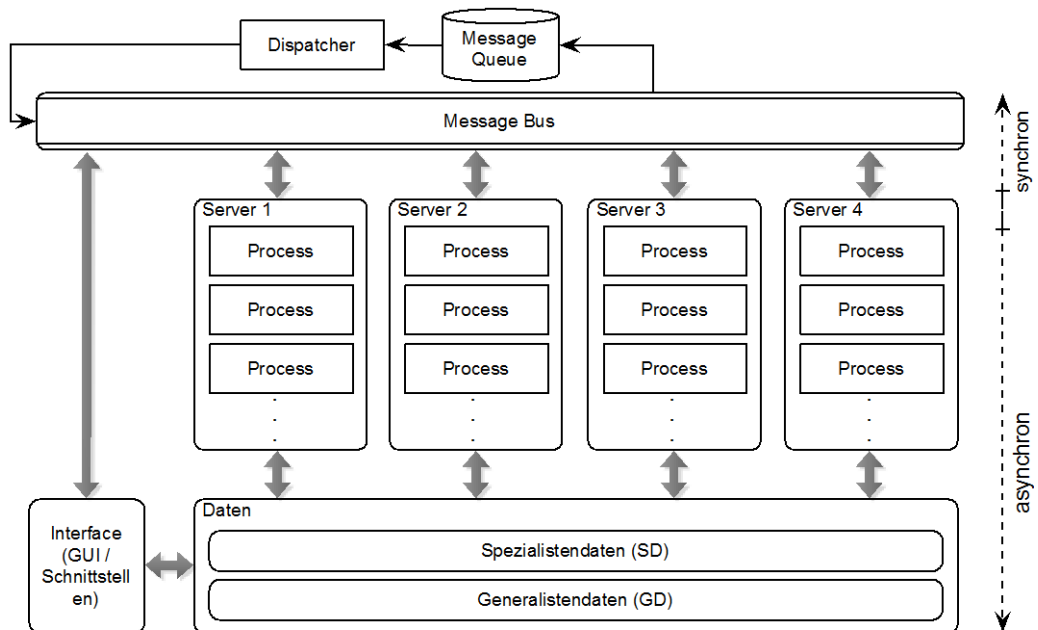


Abbildung 52 Message Queue Konzept zur Synchronisation mehrerer Prozesse auf unterschiedlichen Servern.

- **Message Bus:** Mit dem Message Bus wird ein einheitlicher Kommunikationskanal bezeichnet, über welchen Meldungen verschickt werden können. Der Message Bus bietet ein einheitliches, relativ einfaches Interface zum Versenden und Empfangen von Meldungen. Auf technischer Ebene läuft ein Message Bus meist über ein binäres, TCP-basiertes Protokoll. Dieses kann sowohl über normale File-Sockets, als auch über Ethernet oder kompatible Interprozess-Kommunikationshardware (Infiniband etc.) aufgebaut werden. Der Message Bus bietet dabei ein Interface, welches unabhängig vom konkreten Kommunikationsmechanismus (TCP/IP, Netzwerkkonfiguration, Hardware etc.) ist.
- **Dispatcher:** Der Message Bus wird zentral von einem Dispatch-Dienst (auch Broker genannt) verwaltet. Beim Dispatcher handelt es sich normalerweise um einen eigenständigen Prozess, der den Message Bus für die anderen Prozesse anbietet, sämtliche einkommenden Meldungen entgegennimmt und an die betroffenen Prozesse weiterleitet („dispatch“).
- **Message Queue (Warteschlange):** Sämtliche im Message Bus eingehenden Meldungen werden vor dem Verteilen in die Message Queue gegeben. Sie stellt nichts anderes als eine gewöhnliche Warteschlange dar. Dabei gilt meistens das FIFO-Prinzip (first in, first out): Die zuerst in der Schlange eingetroffenen Meldungen werden auch als erste wieder verteilt. Die Message Queue ist notwendig, da es sein kann, dass mehrere Meldungen gleichzeitig eintreffen, der Dispatcher aber noch mit dem Verteilen früherer Meldungen beschäftigt ist. Ausserdem stellt die Queue sicher, dass ein Prozess, der gerade mit anderen Berechnungen beschäftigt ist, eine an ihn gerichtete Meldung zum nächstmöglichen späteren Zeitpunkt entgegennehmen kann. Sie ist also unentbehrlich, damit keine Messages verloren gehen. Obwohl die message queue eigentlich nur eine Komponente ausmacht, hat sie dem gesamten Konzept den Namen gegeben. Im Folgenden ist mit message queue – wenn nicht anders angegeben – immer das Konzept und nicht die Warteschlange-Komponente gemeint.

Die Synchronisation von einzelnen Prozessen läuft in mehreren Schritten über den Message Bus ab und soll an Abbildung 53 exemplarisch gezeigt werden.

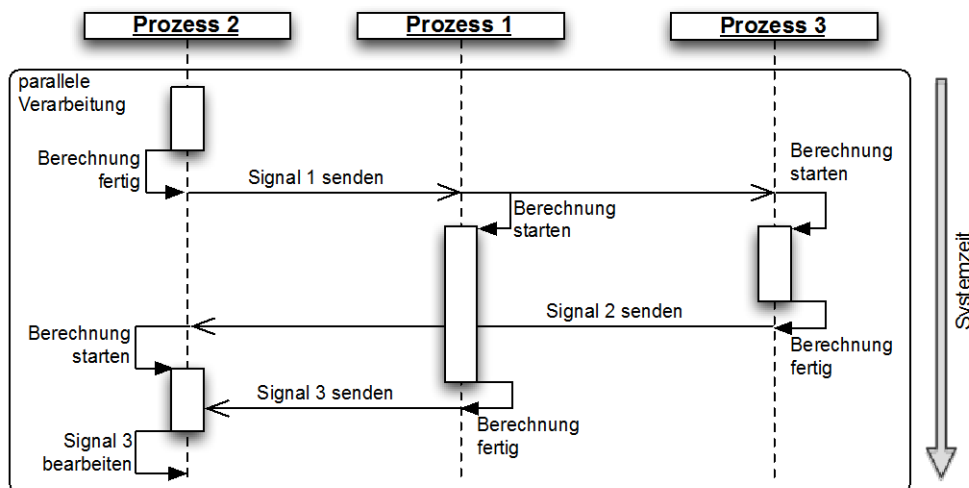
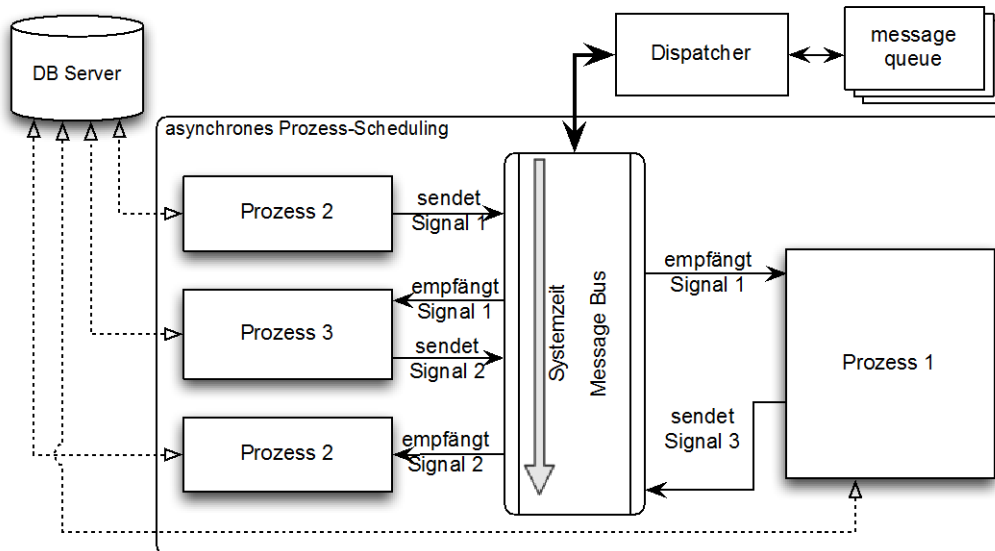


Abbildung 53 Schematischer Ablauf zur Prozesssynchronisation (oben) und zugehöriges Sequenzdiagramm (unten)

1. Prozess 1 und 3 haben sich beim Message Bus zuvor als Empfänger von Signal 1 registriert. Unmittelbar nach Erhalt des Signal 1 beginnen sie, ihre eigenen Berechnungen zu starten (welche dies konkret sind, wird durch die Prozesskonfiguration festgelegt). Beide Prozesse starten ihre eigenen Berechnungen zeitgleich und damit parallel.
2. Prozess 2 schliesst eigene Berechnungen ab und sendet Signal 1 an den Message Bus, um das System über den Abschluss der eigenen Berechnungen zu informieren.
3. Prozess 3 ist fertig und schickt zur Benachrichtigung Signal 2 an den Message Bus.
4. Prozess 2 reagiert auf Signal 2, indem es eigene Berechnungen startet (welche beispielsweise auf dem Output von Prozess 3 basieren könnten).
5. Während Prozess 2 beschäftigt ist, schliesst Prozess 1 seine Berechnungen ab und sendet zur Signalisation Signal 3 an den Message Bus.
6. Der Message Bus benachrichtigt Prozess 2 über Signal 3, sobald Prozess 2 die eigenen Berechnungen abgeschlossen hat und wieder empfangsbereit ist.

Wie das Beispiel zeigt, kann durch das message queue Konzept sichergestellt werden, dass gewisse Berechnungen erst durchführen, wenn die nötigen Daten dazu bereitstehen. So wartet im obigen Beispiel Prozess 2, bis Prozess 3 seine Berechnungen

abgeschlossen hat. Prozesse, die miteinander nichts zu tun haben, erfahren nichts voneinander und sind daher komplett unabhängig: Prozess 1 beispielsweise reagiert nicht auf Signal 2 von Prozess 3 und umgekehrt für Signal 3 von Prozess 1.

Ein weiterer Vorteil der message queue ist, dass bei Absturz von Prozess 1 Prozess 3 normal weiterläuft. Einzig Prozess 2 muss entscheiden, wie mit dieser Situation umzugehen ist (siehe Kapitel 6.6.2).

Message Queue Implementationen

Message Queues sind in verteilten Systemen (distributed systems / distributed computing) sehr weit verbreitet. Es erstaunt daher nicht, dass eine Reihe bestehender Software-Lösungen existieren, welche die Message Queue Funktionalität (d.h. einheitlicher Message Bus, Dispatch-Prozess und Warteschlange) bereitstellen. Lange Zeit hat jede dieser Lösungen ihr eigenes Protokoll verwendet, was insbesondere bedeutete, dass nicht systemübergreifend kommuniziert werden konnte. Seit einigen Jahren hat sich glücklicherweise der AMQP-Standard der OASIS Gruppe durchgesetzt (Advance Message Queue Protocol). AMQP ist ein binäres Message-Protokoll, dessen API (Programmierschnittstellen) öffentlich publiziert ist und von diversen Software-Anbietern unterstützt wird.

Die wichtigsten Anbieter von AMQP-Message Queues sind:

- Apache ActiveMQ: quelloffen und frei verfügbar für die wichtigsten Betriebssysteme, kommerzieller Support über Drittanbieter; Programmierinterfaces für Java, C++, Python, PHP und weitere.
- RabbitMQ: weit verbreitete Lösung, quelloffen und frei verfügbar für die wichtigsten Betriebssysteme, kommerzieller Support über Drittanbieter; Programmierinterfaces für Java, C++, .NET, Python, PHP und weitere
- Windows Azure Service Bus: als Teil des Windows Azure-Cloud-Angebotes; teilweise frei verfügbar, setzt jedoch Windows-Umgebung, .NET-Framework und MS SQL Server voraus. Programmierinterface für .NET und Java.

Eine Festlegung auf einen Anbieter ist nicht aufgrund der technischen Eigenschaften vorzunehmen, sondern hängt auch ganz wesentlich von der bestehenden Hard- und Softwareinfrastruktur ab. Da die Funktionalität der verschiedenen Lösungen aufgrund des Standards weitgehend identisch ist, ist eine Festlegung auf einen bestimmten Anbieter momentan aber gar nicht nötig.

6.6.2 Zeitkritische Abläufe, Fehlerbehandlung und Ausfallsicherheit

Die verschiedenen Module im Prognosesystem laufen zeitkritisch ab, d.h. bei einem Aktualisierungsintervall von z.B. 1 Minute muss sichergestellt werden, dass die Aggregation aller Detektordaten innerhalb weniger als einer Minute abgeschlossen ist, damit die Prognosemodule darauf basierend ihre Prognose anstellen können. Eine zentrale Frage in diesem Zusammenhang ist, wie das System konzipiert werden kann, damit verzögert ablaufende Prozesse oder Ausfälle einzelner Prozesse möglichst sicher abgefangen werden können und die Funktionalität des Systems möglichst wenig beeinträchtigen.

Bei seriell ablaufenden Systemen hält sich die Komplexität des Programmablaufes meist in Grenzen, sodass mittels geeigneter Fehlerbehandlung Abstürze des Systems bestmöglich vermieden werden können. Bei paralleler Verarbeitung steigen jedoch die Komplexität und der Aufwand zu stark an, um eine ähnliche Fehlerbehandlung zu programmieren. Ab einer gewissen Systemgröße ist daher mit Szenarien zu rechnen, die grundsätzlich nicht von der Fehlerbehandlung abgefangen werden können.

Eine mögliche Strategie, der steigenden Komplexität teilweise zu entgehen, besteht darin, die einzelnen Systembestandteile so unabhängig wie möglich voneinander zu konzipieren, damit sich der Absturz einer Teilkomponente nicht auf das restliche System auswirkt. Dieses Vorgehen führt zu drei Bedingungen, die das System zu erfüllen hat:

1. **Ausfallsicherheit:** Der Ausfall resp. Absturz eines oder mehrerer Prozesse darf nicht zum Ausfall des Gesamtsystems führen. Je nach gewünschter Verfügbarkeit des Systems darf auch der Ausfall von Hardware nicht zum Systemabsturz führen. Dies setzt eine ausfallsichere Rechnerumgebung (Cluster/Grid) voraus.

2. **Fehlerbehandlung Daten:** Fällt ein Prozess aus, kann er seine Aufgabe in Bezug auf Datenverarbeitung nicht mehr wahrnehmen. Alle von ihm abhängigen Prozesse müssen daher so programmiert werden, dass sie dennoch weiterlaufen können (wenn auch in reduzierter Funktion) und automatisch wieder normal funktionieren, sobald der fehlerhafte Prozess wieder normal abläuft.
3. **Fehlerbehandlung Synchronisation:** Sämtliche Prozesse, die von einem abgestürzten oder fehlerhaft ablaufenden Prozess abhängig sind, müssen so programmiert sein, dass sie nicht auf unbestimmte Dauer auf ein Signal des fehlerhaft arbeitenden Prozesses warten.

Ausfallsicherheit

Die Ausfallsicherheit ist grundsätzlich durch die lose Kopplung der parallel durchgeführten Prozesse bereits ansatzweise erfüllt, denn der Ausfall eines einzelnen Prozesses wirkt sich nicht auf die anderen Prozesse auf. Einzig der Ausfall des Message Dispatchers hat systemweite Konsequenzen, da die einzelnen Prozesse dann nicht mehr kommunizieren können. Im technischen Sinne stürzt das System zwar nicht im strengen Sinne ab, es kommt jedoch zum Stillstand, was funktionell mit einem Absturz identisch ist. Die meisten Software-Lösungen, die das message queue Prinzip implementieren (insb. die oben genannten Anbieter), haben jedoch ausfallsichere Dispatcher-Prozesse. Dabei übernimmt automatisch ein Backup-Dispatcher, wenn der Hauptprozess ausfällt. Dank der Zwischenlagerung aller Messages in der Warteschlange gehen beim Fail-over-Fall keine Meldungen verloren.

Nach dem Absturz eines Prozesses muss auch dafür gesorgt werden, dass ein Ersatzprozess für ihn einspringt. Es gibt im Wesentlichen drei verschiedene Ansätze für dieses Szenario:

1. Eigenständige Prozess-Steuerung via Masterprozess
2. Watchdog-Prozesse
3. GRID-Framework

Die drei Ansätze werden im Anhang V.3 technisch näher erläutert.

Wichtig bei den drei vorgestellten Methoden ist, dass Lösung 1. und 2. auch innerhalb einer GRID-Umgebung realisiert werden können. In diesem Fall wird nicht die volle GRID-Funktionalität genutzt, sondern nur die Message Queue. Vorteil der GRID-Lösung ist, dass der zentrale, parallel verfügbare Datenspeicher allen Tasks zur Verfügung steht und eine Entlastung der Datenbank erreicht wird. Ebenfalls ist diese Lösung in Hinblick auf zukünftige Erweiterbarkeit besser geeignet, da ein Umstieg auf eine vollständig GRID-basierte Lösung gemäss Punkt 3 schrittweise möglich ist. In Hinblick auf zukünftige Entwicklungen (insb. Einbindung von Simulationen) bietet der GRID-Ansatz eine besser skalierbare und v.a. einfachere zu verwaltende Lösung, da sich die Entwickler nicht um die Zuweisung der Tasks an Nodes kümmern müssen und die Rechenkapazität durch Einbinden zusätzlicher Nodes laufend erweitert werden kann, ohne dass ein Neustart oder Rekonfiguration des Systems nötig ist.

Aus Kostensicht sind die Fixkosten einer GRID-Lösung deutlich höher: Während AMQP-Lösungen grundsätzlich frei verfügbar sind oder pro Broker-Prozess lizenziert werden müssen, so wird GRID-Software üblicherweise pro CPU lizenziert (Richtkosten GridGain-Lösung: USD 20'000 für 10 CPUs pro Jahr).

Fehlerbehandlung Daten

Verschiedenste Prozesse bauen auf den Daten anderer Module oder auf externen Input-Daten auf. Wie wird (allgemein) mit der Situation umgegangen, wenn diese Daten aufgrund eines Fehlers in der vorherliegenden Prozesskette nicht bereitstehen?

Ein eleganter Ansatz besteht darin, diesen Fehlerfall so grosszügig wie möglich zu behandeln: Auf abstrakter Ebene bedeutet das Fehlen von Daten für ein Prognosesystem nichts weiteres, als dass gewisse nützliche Information nicht für die Prognose verfügbar ist. Das bedeutet aber nicht, dass keine Prognose angestellt werden kann und soll. Dieser Ansatz gilt als Leitprinzip für den Umgang mit fehlenden Daten. Die Umsetzung un-

terscheidet sich dabei nach verschiedenen Modulen:

- **Preprocessing-Module:** Preprocessing-Module müssen unterscheiden können zwischen **fehlerhaften Daten**, **nicht erhobenen Daten** (z.B. keine Fahrzeugdurchgänge zwischen 00:00 und 00:01), und **nicht-zugreifbaren Daten** (Daten, die erhoben wurden, aber aufgrund eines Kommunikationsfehlers nicht zugreifbar sind). Die Behandlung von fehlerhaften Daten resp. deren Filterung ist, wie schon erwähnt, zentraler Bestandteil der Preprocessing-Module. Diese Filterung erfolgt am einfachsten nach empirischen und/oder heuristischen Methoden (i.a. bekannte Verfahren), welche schon in den jetzigen Testcodes zur Anwendung kommen. Die Unterscheidung von nicht erhobenen gegenüber nicht zugreifbaren Daten muss pro Modul individuell implementiert werden: Detektor-Daten enthalten i.A. eigene Fehler-Codes, die dazu ausgewertet werden können. Bei Meteo-Daten, beispielsweise, entfällt die Unterscheidung, da das Wetter immer präsent ist, fehlende Datensätze also auf nicht-zugreifbare Daten hinweisen. Diese Unterscheidung ist wichtig, da sie Informationsgehalt hat: Nicht-erhobene Daten (keine Detektordurchgänge, keine Event-Daten) bedeuten, dass tatsächlich keine solchen Ereignisse eingetroffen sind. Sie stellen daher auswertbare Daten dar. Nicht-zugreifbare Daten bedeuten Unwissen über den Datenzustand. Da die Preprocessing-Module nur Aufbereitung vornehmen, überlassen sie diese Art von Daten-Fehler den Prognosemodulen. Sie signalisieren den Vorfall durch ein entsprechendes Signal an die Prognosemodule.
- **Prognosemodule:** Prognosemodule müssen aufgrund der Vorarbeit der Preprocessing-Module mit zwei Arten von Fehlern umgehen: den oben erwähnten nicht-zugreifbaren Daten, und dem Ausfall eines Preprocessing-Moduls. Auch Sicht des Prognosemoduls präsentieren sich beide Szenarien durch fehlende Daten zum aktuellen Systemzeitpunkt t . Dabei spielt es keine Rolle, ob diese Daten fehlen aufgrund eines Prozessausfalls oder weil das Preprocessing-Modul nicht auf die Daten zugreifen konnte. In Prognosemodulen muss daher im Wesentlichen der Umgang mit fehlenden Daten behandelt werden. Eine einfache Möglichkeit ist die Verwendung des vorherigen Wertes oder eine Mehrschrittprognose. Um anzudeuten, dass die prognostizierten Werte eine höhere Unsicherheit haben, wird dies zusammen mit den Prognosedaten entsprechend vermerkt (durch ein grösseres Unsicherheitsintervall).
- **Postprocessing-Module:** Bei den Postprocessing-Modulen ist nur ein Szenario möglich, nämlich, dass Daten vom Prognosemodul fehlen. In diesem Fall kann das Postprocessing-Modul nur alte Langzeitprognosen, die zum einem früheren Zeitpunkt angestellt wurden, als Datengrundlage verwenden. Sind auch diese nicht verfügbar, können keine Resultate dargestellt/exportiert werden und der entsprechende Fehler ist dem Anwender/der Anwendungsapplikation mitzuteilen.

Wie aus der obigen Zusammenstellung ersichtlich, müssen die meisten Module nur mit der Situation fehlender Daten umgehen können, ohne detailliertere Fehlerbehandlung oder Kenntnis darüber zu haben, warum die Daten fehlen. Einzig bei den Inputmodulen müssen fehlende Daten gemäss ihrer Ursache unterschiedlich behandelt werden. Folglich ist der Umgang mit fehlenden Daten programmiertechnisch relativ einfach implementierbar. Grundsätzlich sorgen fehlende Daten also nicht zum Ausfall des Systems, sondern zu einer reduzierten Prognosequalität.

Fehlerbehandlung Synchronisation

Ein kritischer Aspekt für die Stabilität des Systems ist der Umgang mit fehlerhafter Prozess-Synchronisation. Das klassische Beispiel zur Illustration der Problematik tritt dann auf, wenn Prozess 2 auf ein Signal von Prozess 1 wartet, dieser Prozess aber ausgefallen ist. Beispielsweise könnte ein Preprocessing-Modul abgestürzt sein, womit auch das nachfolgende Prognosemodul keine neuen Prognosen mehr anfertigt. Ebenso werden alle von diesem Prognosemodul abhängigen Postprocessing-Module ebenfalls nicht mehr weiterarbeiten, da sie vergeblich auf ein Signal vom Prognosemodul warten.

Eine Lösung dieses Abhängigkeitsproblems besteht darin, zusätzlich zu den Signalen der Prozesse sog. systemweite Timer-Signale einzurichten. Die Timer-Signale werden in Zeitabständen, die an das Updateintervall des Systems angepasst sind, an alle Module

gesendet. Ein Modul verrichtet dann seine Arbeit, wenn es entweder ein Signal von einem anderen Modul erhält (1. Priorität), oder wenn das Timer-Signal eintrifft (2. Priorität).

Ein zusätzliches Problem in der Synchronisierung besteht dann, wenn ein Prozess so lange mit einer Berechnung beschäftigt ist, dass sich für ihn relevante Messages anhäufen. Würde der Prozess dann alle Meldungen nacheinander abarbeiten, so könnte sich die Situation ergeben, dass er ständig hinterherhinkt und Aufgaben abarbeitet, die eigentlich zum aktuellen Systemzeitpunkt nicht mehr nötig wären. Abbildung 54 illustriert die Problematik: Die Tasks von Prozess 1 laufen schnell genug ab, dass sie innerhalb des Aktualisierungsintervalls abgeschlossen sind. Prozess 1 kann sich somit immer gleich um einen Task kümmern, sodass die bereits berechnete Datenlage zum Intervall t auf Daten des vorherigen Schrittes $t-1$ basiert. Prozess 2 braucht länger für seine Tasks. Die Verzögerungen akkumulieren sich bis $t=3$. Es würde nun beim Abschluss des zweiten Tasks im Intervall $t=3$ keinen Sinn mehr machen, in der noch verbleibenden Zeit das Signal von $t=3$ zu bearbeiten. Stattdessen überspringt Prozess 2 den dritten Task und wartet bis das Signal für den vierten Task bei $t=4$ gesendet wird. Nach Abschluss des Tasks liegen damit die Daten zum Punkt $t=5$ bei beiden Prozessen wieder auf gleichem, aktuellem Stand vor. Das System hat sich resynchronisiert.

Technisch lässt sich dies durch eine endliche Lebensdauer von Messages realisieren, was in der Abbildung durch die gepunkteten vertikalen Linien dargestellt ist. Bei Prozess 2 wird der dritte Task daher nicht gestartet, da Prozess 2 sich erst dann wieder um eingegangene Messages kümmern kann, nachdem die Lebenszeit von Signal $t=3$ bereits abgelaufen ist. Prozess 2 nimmt daher erst bei $t=4$ wieder die Arbeit auf, wodurch sich die Datenlage wieder synchronisiert hat.

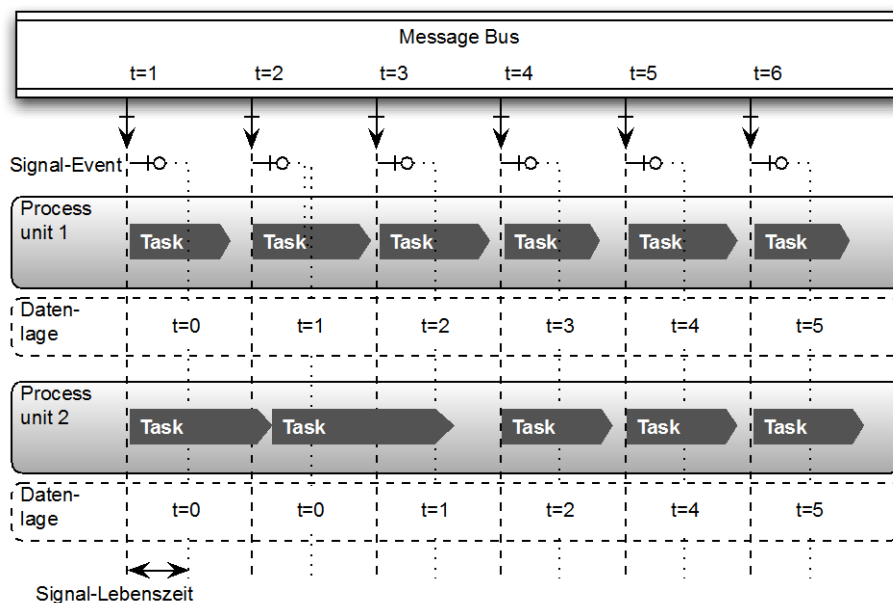


Abbildung 54 Message-Lebenszeiten als Mittel zur Prozess-Resynchronisation

6.6.3 Schnittstellen und Einbindung in die ASTRA-Systemlandschaft

Das Stauprognosesystem kann auf unterschiedliche Arten in die ASTRA-Systemlandschaft⁷ eingebunden werden. Konzeptionell stellt sich die Frage, ob das System als eigenständige *Fachapplikation* (FA, s. Glossar, auch: Fachanwendung) oder als separater Dienst einer bestehenden Fachapplikation eingebunden werden soll. Wir schlagen eine Integration als separate Fachapplikation vor aus folgenden Gründen:

⁷ Bei einem Pilotsystem kann die Frage der Einbindung allenfalls noch zurückgestellt werden,

- **Komplexität:** Das Stauprognosesystem weist eine relativ grosse Komplexität auf und verlangt eine parallele Datenverarbeitung. Die Einbindung als eigenständige Fachapplikation erlaubt die grösstmögliche Freiheit bei der Systemarchitektur.
- **Verwendbarkeit Outputdaten:** Die Prognosedaten des Systems werden mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht nur für eine einzige bestehenden FA von Interesse sein. Um diese Daten in der nötigen Flexibilität sämtlichen bestehenden und zukünftigen FAs massgeschneidert zur Verfügung stellen zu können, ist die Konzipierung als eine eigenständige FA sinnvoll.
- **Erweiterbarkeit:** Es ist zu erwarten, dass das Stauprognosesystem laufend erweitert wird, einerseits durch neue Algorithmen, andererseits technisch durch neue Datenquellen und Datenausgaben. Die dafür nötige Flexibilität ist durch eine eigenständige FA am besten gewährleistet.

Die Einbindung der Fachapplikation „Stauprognosesystem“ in die ASTRA-Systemlandschaft lässt sich auf unterschiedliche Weise bewerkstelligen. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist dabei der Grad der Integration mit anderen FAs. Es lassen sich drei unterschiedliche Integrationsvarianten ableiten, die im Folgenden im Detail beschrieben werden.

Bemerkung: Da die ASTRA Systemlandschaft zum Zeitpunkt dieser Arbeit in einer Umstrukturierungsphase war (insb. Migration vom MISTRA-Konzept zur INA-Architektur (Integrierte Anwendungen), sind die nachfolgend vorgeschlagenen Einbindungsvarianten und Schnittstellen allgemein formuliert. Die exakten Daten-Schnittstellen sollen somit während der Umsetzung von INA genauer spezifiziert werden.

Integrationsvariante 1: Unabhängiges Datensystem

Die Fachanwendung Stauprognosesystem verfügt über ihre eigene Datenbank. Sie kommuniziert mit der Aussenwelt (Umgebung) über den Import von Input-Daten (Preprocessing-Module). Diese können entweder von Drittanbietern stammen (Meteo etc.) oder via Schnittstelle von der ASTRA Datenbank (INA). Dies ermöglicht die Einbindung der FA-weit zugänglichen Basisdaten in die FA „Verkehrsprognosen“. Ähnlich wie die Input-Daten werden auch die Output-Daten behandelt: Die Output-Daten werden von der Verkehrsprognose-FA einerseits selber durch entsprechende Daten- und/oder Benutzerinterfaces zur Verfügung gestellt, als auch in die INA-Datenbank zurückgespielt, wo sie für andere FAs zur Verfügung stehen. In dieser Integrationsvariante kommuniziert die FA mit der Aussenwelt nur über Interfaces beim Preprocessing- und beim Postprocessing-Schritt. Schematisch ist die Anbindung in Abbildung 55 gezeigt.

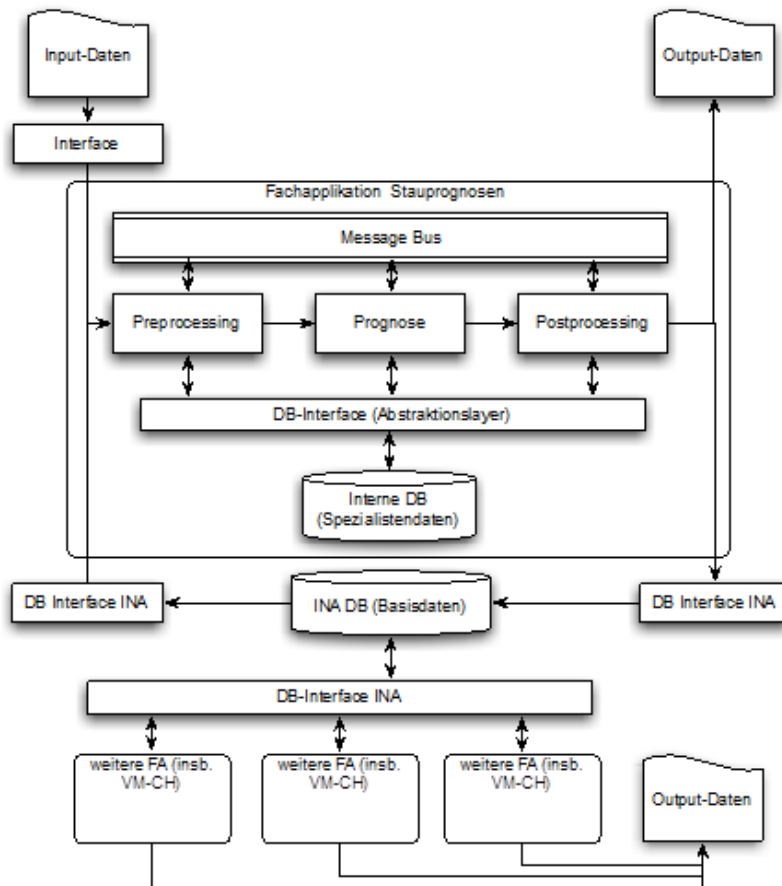


Abbildung 55 Schema Integrationsvariante 1

Vorteile:

- **Geringe Abhängigkeiten, einfache Integration:** Die FA agiert als grösstenteils eigenständige Anwendung, die nur über Import- und Export-Schnittstellen am Anfang (Preprocessing) und am Ende (Postprocessing) des Datenflusses verfügt. Die Integration ist daher minimal und wenig aufwändig. Und die Abhängigkeit von anderen FAs ist auf zwei Punkte im Datenfluss reduziert.
- **Unabhängiges Datenmodell:** Da die Kommunikation mit externen FAs nur beim Preprocessing und Postprocessing stattfindet, kann die Verkehrsprognose-FA ihr eigenes, optimiertes Datenmodell verwenden, ohne Rücksicht auf andere FAs nehmen zu müssen. Insb. kann das Datenmodell erweitert werden und wachsen, ohne die Kompatibilität zu anderen FAs zu brechen (solange ggf. die Preprocessing- und Postprocessing-Module angepasst werden).
- **Geringe Komplexität:** Bis auf die Schnittstellen mit ASTRA resp. der INA-Datenbank kann die FA unabhängig entwickelt werden. Das senkt die Komplexität und den Aufwand der Implementierung. Zudem kann mit der Implementation begonnen werden (z.B. in einem Testbetrieb), ohne die Details der Anbindungs-Interfaces seitens INA bereits komplett zu kennen.

Nachteile:

- **Unflexible Integration:** Da externe FAs nur auf Exporte eines Postprocessing-Moduls zugreifen können, verfügen externe FAs nicht über Zugriff auf interne Daten des Stauprognosesystems. Je nach externer FA könnte ein solcher Zugriff auf gewisse interne Daten jedoch notwendig werden. In solchen Fällen müsste dazu ein Postprocessing-Modul dahingehend abgeändert werden, dass die benötigten internen Daten auch ans INA-System exportiert werden. Es ist somit eine Systemanpassung nötig.

- **Daten- und Serviceredundanz:** Bei der Einbindung als grösstenteils unabhängige FA mit eigener DB werden potentielle Synergien mit der bestehenden Systemlandschaft schlecht genutzt: Zum einen muss ein separater DB-Server und Message-Bus betrieben werden (Service-Redundanz), zum anderen ist davon auszugehen, dass gewisse interne Daten (wie Detektor-Aggregationswerte) entweder bereits von anderen FAs berechnet wurden (insb. VM-CH) oder benutzt werden könnten. Die zusätzliche interne Speicherung dieser Daten stellt somit eine eigentlich unnötige Datenredundanz dar.

Integrationsvariante 2: Direkter Zugriff durch externe Fachapplikationen

Die zweite Integrationsvariante unterscheidet sich im Wesentlichen von der vorherigen durch den direkten Datenzugriff externer FAs auf die interne DB. Aus Sicherheitsgründen ist der Zugriff über ein DB-Interface geregelt, welches Lesezugriff auf die meisten Moduldaten erlaubt. Im Gegensatz zu Variante 1 fällt der Export der Prognosedaten in die INA-DB weg. Dies kann nun bei Bedarf von einer externen FA übernommen werden, ist aber grundsätzlich nicht nötig dank Direktzugriff auf die interne DB. Es ist bei dieser Variante damit zu rechnen, dass sowohl die Verkehrsprognose-FA als auch andere FAs aus den Prognosedaten entsprechende Output-Daten ableiten in unterschiedlicher Form (z.B. andere Benutzerinterfaces, Verwertung in anderen Outputgrössen etc.). Der Import von Daten in die FA erfolgt weiterhin von externen Quellen (Meteo etc.) als auch direkt über die INA-Datenbank. Das Integrationsschema ist in Abbildung 56 dargestellt.

Vorteile:

- **Geringe Komplexität:** Da der Datenzugriff von externen FAs via interne DB selbstständig vorgenommen wird, bleibt die geringe Komplexität von Variante 1 auch hier bestehen. Durch den Wegfall der nötigen Export-Module (Postprocessing-Module) reduziert sich auch der Implementationsaufwand.
- **Flexible Integration:** Im Gegensatz zu Variante 1 können externe FAs nun direkt auf sämtliche für sie wichtigen Daten zugreifen, ohne dass Systemanpassungen an der Verkehrsprognose-FA nötig sind. Nichtsdestotrotz hat die Verkehrsprognose FA die Datenhoheit, d.h. das interne Datenmodell kann erweitert werden falls nötig.
- **Integration in Schritten:** Die Einbindung in andere FAs resp. die ASTRA-Systemlandschaft kann bei dieser Variante in mehreren Schritten erfolgen, angefangen bei einer unabhängigen FA im Testbetrieb, wie in Variante 1. Im nächsten Schritt (z.B. operativer Betrieb) kann mit sehr wenig Aufwand die Freigabe der internen Daten technisch realisiert werden.
- **Verantwortung bei externen FAs:** Die externen FAs sind für die Verwendung der Verkehrsprognose-Daten selber zuständig. Sie müssen sich daher eigenständig um das Abholen und Auswerten dieser Daten kümmern.

Nachteile:

- **Komplexeres Feedback:** Da der Zugriff für externe FAs nur lesend erfolgt, bleibt hier wie auch bei Variante 1 das Problem, dass ein Feedback von externen FAs nicht direkt in die Verkehrsprognose-FA einbezogen werden kann. Stattdessen muss diese Feedback-Schleife über den Datenimport via INA-DB erfolgen, was zusätzliche Komplexität für solche externe FAs und die Verkehrsprognose-FA bedeutet.
- **Serviceredundanz:** Während die Freigabe der internen Daten die Datenredundanz gegenüber Variante 1 reduziert, bleibt die Serviceredundanz grösstenteils bestehen.

Kompatibilität bei zukünftigen Entwicklungen: Zukünftige Entwicklungen und Erweiterungen der Stauprognose-FA können bewirken, dass das interne Datenmodell ändert. Die externen FAs müssen vorzeitig über diese Änderungen informiert sein, und benötigen eine entsprechende Systemanpassung.

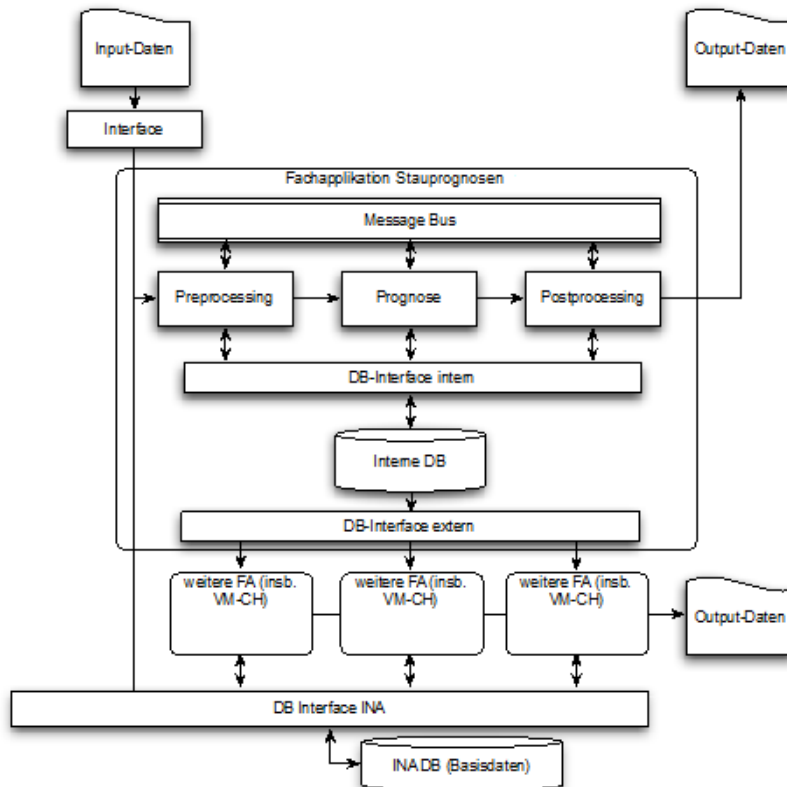


Abbildung 56 Schema Integrationsvariante 2

Integrationsvariante 3: vollständige Datenintegration

Die dritte Integrationsvariante reduziert sämtliche Systemredundanzen und bietet eine vollständige Datenintegration in die INA-Systemlandschaft – siehe Abbildung 57. Da die parallele Datenverarbeitung und die dazu nötige Infrastruktur (insb. Message Bus) FA-spezifisch sind, bleiben diese Systemkomponenten Bestandteile der FA. Systemseitig wird aber die Datenbankanbindung komplett seitens ASTRA/INA angeboten. Das bedeutet insbesondere, dass sich der Daten-Import und Export vereinfacht, resp. die Preprocessing- und Prognosemodule direkt die relevanten Daten aus der INA-DB holen (falls bereits vorhanden). Andernfalls legen sie sie dort ab, womit auch der Zugriff für andere FAs ermöglicht wird. Durch die starke Anknüpfung an INA macht ein gesonderter Export der Daten wenig Sinn, da sie sowieso sämtlichen FAs zeitnah zur Verfügung stehen.

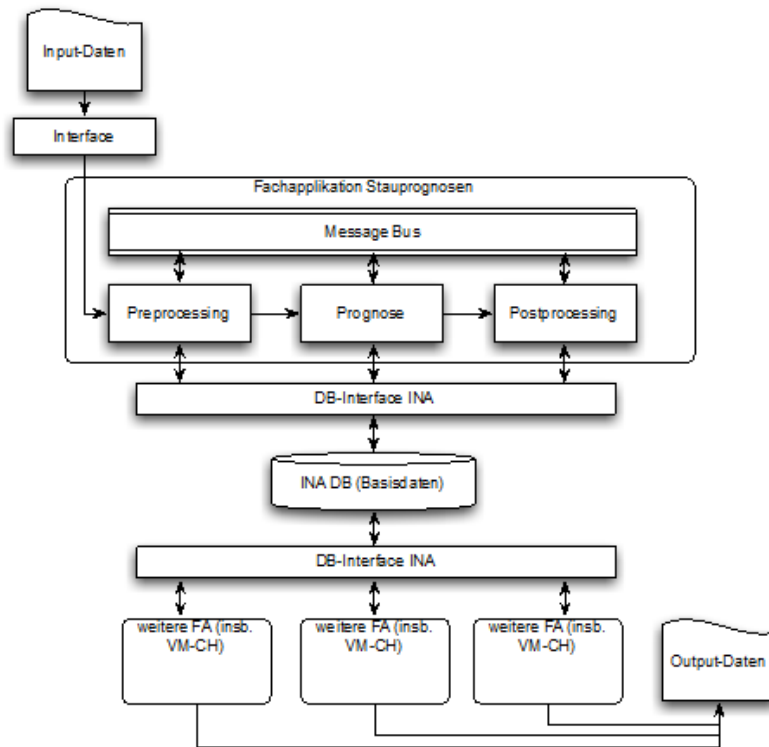


Abbildung 57 Schema Integrationsvariante 3

Vorteile:

- **Schlankte Architektur mit wenig Daten- und Serviceredundanzen:** Die bei Variante 1 und 2 vorhandenen Redundanzen fallen bei der Vollintegration praktisch vollkommen weg und sorgen für eine schlanke Systemarchitektur.
- **Vereinfachter Datenaustausch mit externen FAs:** Der Datenaustausch lesend und schreibend ist sehr einfach über die zentrale DB gewährleistet.
- **Reduzierter Implementationsaufwand:** Durch die Reduktion der Preprocessing- und Postprocessing-Module ist der Implementationsaufwand geringer als bei den anderen Varianten.

Nachteile:

- **Hoher Planungsaufwand:** Die komplette Integration der FA benötigt eine sehr sorgfältige Planung insb. des Datenmodells und der Schnittstellen, sowie eine Überprüfung der Performance der DB sowie deren Skalierungsmöglichkeiten. Hierzu sind eine präzise INA-Systemdokumentation und der Dialog mit den INA-Entwicklern notwendig. Aufwand und Komplexität für die Integration könnten sich somit trotz schlanker technischer Struktur vergrößern.
- **Hoher Anfangsaufwand:** Durch den hohen Planungsaufwand ist ein Testbetrieb im Sinne dieser Integrationsvariante mit grossem Aufwand verbunden, da trotz Testphase bereits die komplette Planung im Detail durchgeführt werden muss, um spätere Integrationsrisiken oder Neu-Implementationen zu vermeiden.
- **Kompatibilität bei zukünftigen Entwicklungen:** Wie bei Variante 2 bleibt auch hier das Problem bestehen, dass eine Änderung der FA datenbankseitig die Kompatibilität zu anderen FAs bricht.

Bemerkung: Die unterschiedlichen Integrationsvarianten unterscheiden sich insbesondere durch den Grad der Datenautonomie des Systems. Möglicherweise macht es Sinn, die Integration des Systems auch zu etappieren und in der ersten Etappe zunächst die Integrationsvariante 1 anzugehen.

6.6.4 Datenbank und Datenablage

Das Stauprognosesystem setzt eine zentrale, von allen Modulen zugängliche Datenablage voraus, um sämtlichen persistenten Daten zu speichern. Die wichtigsten Merkmale und Anforderungen dieser Datenablage sind:

- **Performance:** Die Daten müssen von mehreren Prozessen (da parallele Datenverarbeitung) gleichzeitig und mit minimaler Latenzzeit gelesen und geschrieben werden können.
- **Strukturierte Ablage:** Da das System datenintensiv abläuft, ist eine strukturierte Datenablage nötig, die möglichst gut die Daten- und Objektstruktur auf Systemebene abbildet.
- **Ausfallsicherheit:** Das System speichert sämtliche persistenten Daten in der Datenbank ab. Daher muss diese ausfallsicher und ggf. redundant geplant werden.
- **Kompatibilität:** Je nach Integrationsvariante für die Einbindung in die ASTRA-Systemlandschaft muss auf die Kompatibilität mit bestehender Infrastruktur geachtet werden (s. unten).

Die zu speichernden Daten tabellarisch sind hauptsächlich strukturiert, mit zusätzlicher hierarchischer Struktur (z.B. Zuordnung Detektoren zu Segmenten). Es gibt drei etablierte Methoden zu Ablage solcher Datenstrukturen:

- **Relationale Datenbanken (RDBMS):** Diese „klassischen“ Datenbanken speichern Daten in tabellarischer Form, wobei Links zwischen Tabellen die Datenrelationen abbilden. Sie zeichnen sich v.a. durch hohe Performance, standardisierte Interfaces (SQL) und durch den grossen Verbreitungsgrad aus. Da sämtliche Daten theoretisch auf die tabellarische Form gebracht werden können, kann das Stauprognosesystem mit einer relationalen Datenbank grundsätzlich betrieben werden, wobei auf eine geeignete (im Sinne der Performance und optimalen Datenspeicherung) Datenstruktur benötigt wird.
- **Hierarchische Datenbanken:** Hierarchische Datenbanken erlauben die Ablage von Baumstrukturen und sind daher z.B. für die Speicherung von hierarchischen Datenstrukturen, wie sie z.B. bei der objektorientierten Datenmodellierung auftreten, sehr gut geeignet. Dadurch erlauben sie eine sehr einfache (da „natürlichste“) Ablage von Daten aus objektorientierten Programmen und wären daher für das vorgeschlagene, modulare System aus konzeptioneller Sicht optimal. Ihre Performance ist i.A. aber deutlich langsamer als jene von relationalen Datenbanken. Da die meisten vom System benötigten Daten rein tabellarischer Form sind, sind hierarchische DBs daher nicht gut geeignet und werden im Folgenden nicht weiter beschrieben.
- **Key-value Datenbanken:** Diese neuartigen Datenbanken (u.a. bei Google, Amazon, Facebook etc. im Einsatz) beschränken sich auf die Ablage von Datenpaaren, wobei jedes Datenpaar aus einem Schlüssel (key) und dem dazugehörigen Wert (value) besteht. Das Modellieren von Relationen ist datenbankseitig nicht möglich, ebenso wie die direkte Ablage von tabellarischen oder hierarchischen Strukturen. Letztere müssen daher zur Speicherung zuerst als tabellarischer Form (2 Dimensionen) in vektorielle Form (1 Dim.) gebracht werden (und umgekehrt für Lesezugriff). Dies stellt technisch zwar kein Problem dar, erschwert praktisch aber den Datenzugriff in der gewohnten tabellarischen Form. Dieser Nachteil kann durch Zwischenschaltung geeigneter Zugriffsfunktionen umgangen werden. Mittlerweile bieten mehrere Hersteller SQL-kompatible Zwischenlayer an, welche key-value-Datenbanken um eine Pseudo-Relationalität erweitern und den einfachen Datenzugriff in gewohnter Weise ermöglichen. Der grosse Vorteil solcher Datenbanken ist, dass durch die sehr primitive Datenablage eine extrem hohe Performance erreicht werden kann, und die physische Datenablage auf mehreren Rechnern verteilt erfolgt. Solche DBs kommen daher bei GRID-Computing zum Einsatz. Durch die verteilte Datenablage ist eine weitere, in traditionellen System unmögliche Form der Optimierung möglich: Die GRID-Software und die Datenbank optimieren die Verteilung der Daten und Rechentasks so, dass Rechnungen und dafür nötige Daten möglichst auf demselben Rechner durchgeführt resp. abgelegt werden. Dadurch wird die Latenzzeit für

Datenzugriff übers Netzwerk enorm reduziert. Kombiniert mit GRID-Lösungen verdrängen key-value-DBs im High-Performance-Bereich zusehends traditionelle, relationale Datenbanken.

Welche der beiden Varianten (relationale DB oder key-value-DB) verwendet wird, hängt u.a. von der Einbindung in die ASTRA-Systemlandschaft ab (s. Kapitel 6.6.3): Bei der Vollintegration besitzt das Stauprognosesystem keine eigene DB, sondern benutzt die relationale Datenbank der ASTRA-Systemlandschaft. Spielraum bieten folglich v.a. die beiden anderen Varianten, bei welcher das System über eine eigene DB verfügt. Grösstmögliche Flexibilität beim Design und der Wahl einer Datenbanklösung bietet die Integrationsvariante 1. Mögliche DB-Lösungen richten sich daher einzig nach den Bedürfnissen des Verkehrsprognose-Systems, da die Kommunikation mit anderen Fachanwendungen über entsprechende Output-Module erfolgt.

Im Anhang V.4 werden möglichen Datenbank-Varianten genauer erläutert.

6.6.5 Zusammenfassung Systemarchitektur und Module

Die vorgeschlagene Systemarchitektur erlaubt einen modularen Aufbau und damit eine grösstmögliche Erweiterbarkeit. Der Gesamtüberblick über das System einschliesslich den wichtigsten Modulen und dem vereinfachten Datenfluss ist in Abbildung 58 gezeigt.

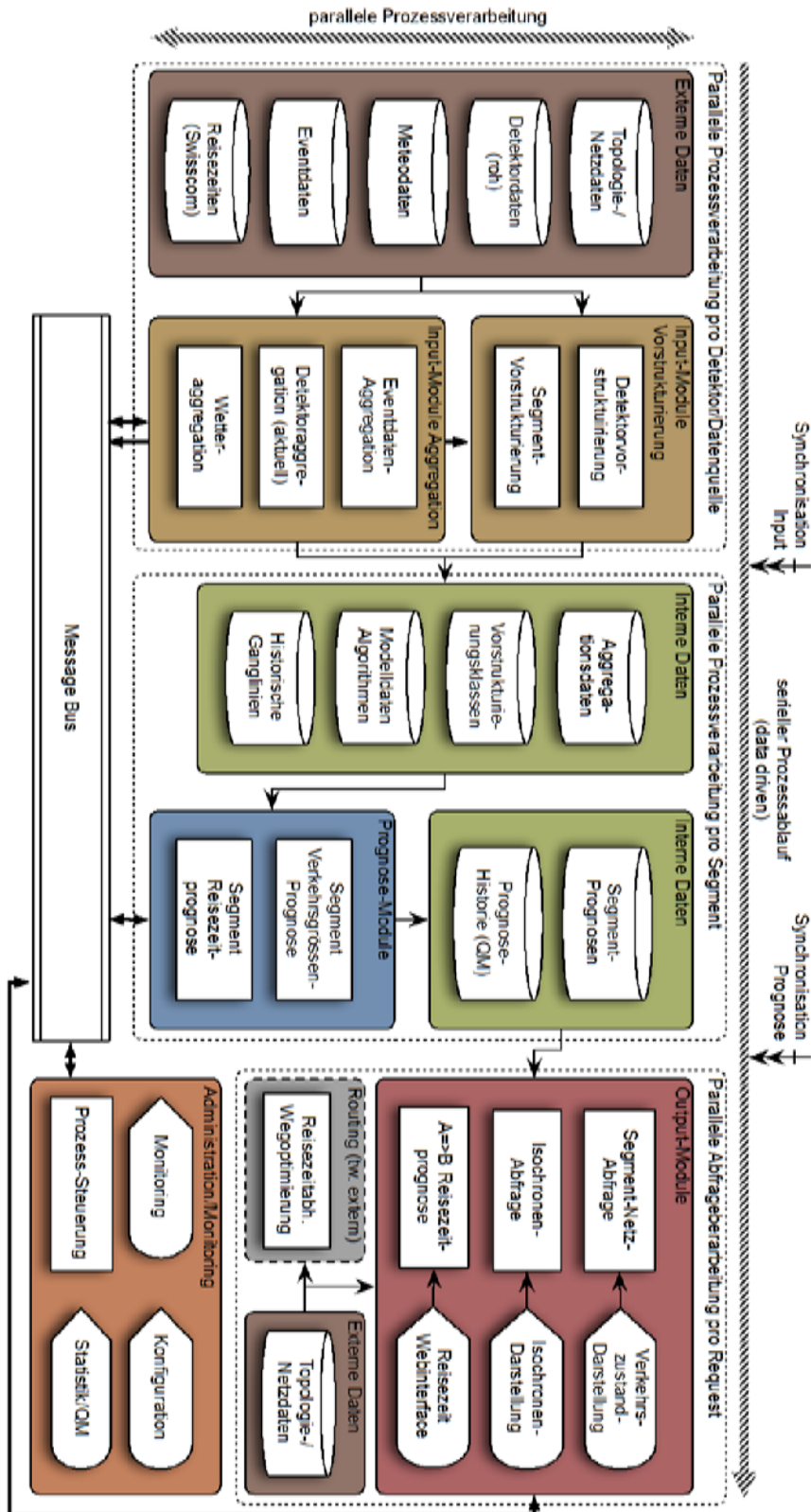


Abbildung 58 Überblick Systemarchitektur mit Modulen und rudimentärem Datenfluss

Zur Veranschaulichung ist in der Abbildung auch gezeigt, dass nur wenige Synchronisationpunkte aufgrund der losen Modulkopplung nötig sind und dadurch eine relativ einfache verteilte Systemarchitektur möglich ist.

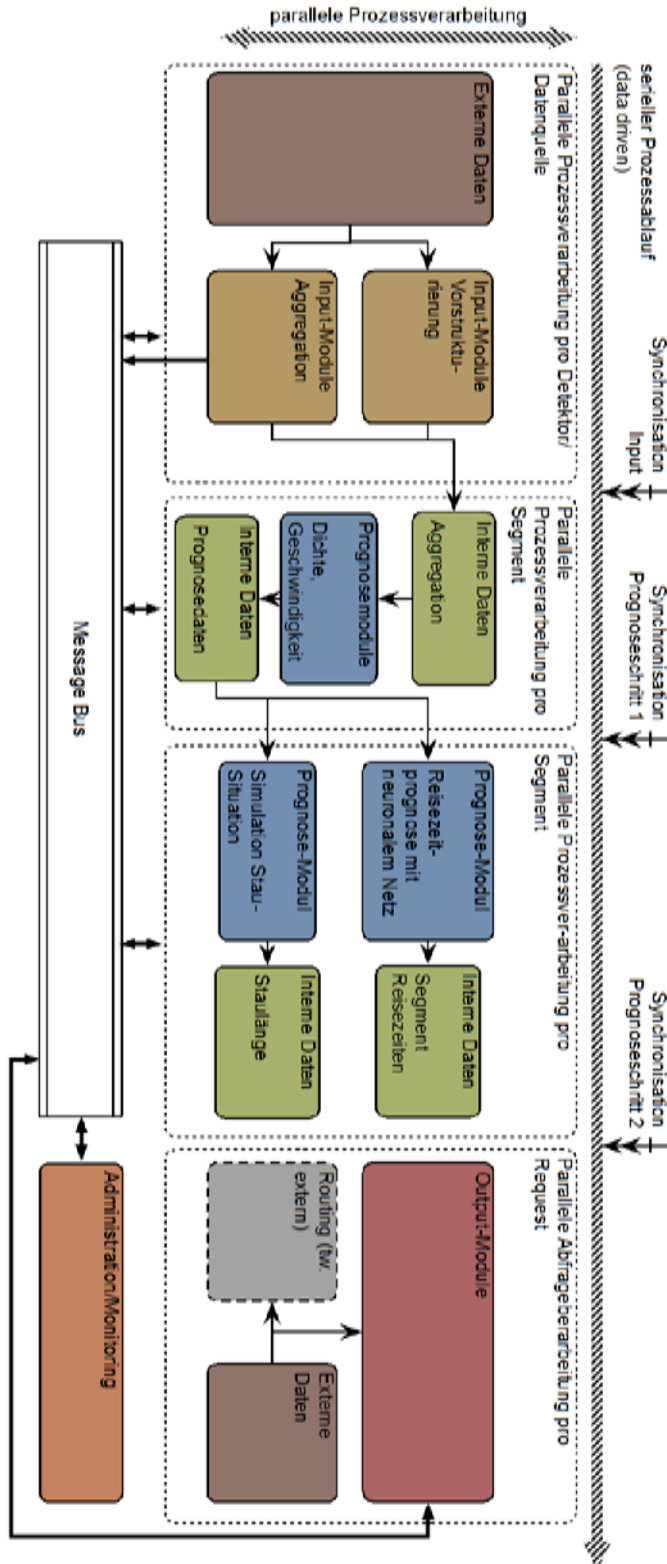


Abbildung 59 Systemübersicht für eine Systemerweiterung mit mehrstufigem Prognoseverfahren (neuronales Netz und Staulängen-Simulation)

Um die Erweiterbarkeit exemplarisch zu zeigen, ist in Abbildung 59 eine vereinfachte Systemübersicht dargestellt, in welcher Prognosen in mehreren, aufeinander aufbauenden Schritten erstellt werden. Beispiel einer solchen Prognose ist die Reisezeitprognose mittels eines neuronalen Netzes basierend auf prognostizierten Geschwindigkeiten zur on-trip Reisezeitprognose. Ebenfalls in dieser Systemerweiterung ist die Einbindung von

abschnittsbasierten Modellsimulationen zur Prognose von Staulängen ersichtlich. Auch diese Prognosen basieren auf vorangehenden Verkehrsprognosen: Um die Staulänge simulieren zu können, müssen dem Modell die zukünftig zu erwartenden Zu- und Abflüsse (d.h. Verkehrsaufkommen, -dichte und -geschwindigkeit) ausserhalb des Staugebietes übergeben werden. Durch den modularen Systemcharakter und die lose Modulkopplung, die nur über die zentrale Datenbank besteht, ist diese Erweiterung ohne grosse Systemanpassungen möglich. Nötig für die korrekte parallele Verarbeitung ist dazu nur ein separates Timer-Signal (Synchronisationssignal), welches die Prognosen des ersten Prognoseschrittes (Dichte, Geschwindigkeiten) mit jenen des zweiten Schrittes (neuronalen Netz, Simulationen) zeitlich abstimmt.

Vor- und Nachteil der Systemarchitektur

Vorteile:

1. **Service-orientierte Architektur:** Die Aufteilung der einzelnen Module gemäss Prozessschritten ist vergleichbar mit einer serviceorientierten Architektur (SOA), wo jeder Systembestandteil (hier die einzelnen Module) einen einzelnen, wohldefinierten Service leisten. Diese Services werden miteinander verknüpft, es ist aber grundsätzlich egal, wie diese Services zur Verfügung gestellt werden: Zentral ist beispielsweise nicht, wie und welches Modul die Aggregation der Detektordaten vornimmt, sondern nur, dass diese Daten verfügbar sind. Dadurch sind die einzelnen Module faktisch relative lose gekoppelt, was die Erweiterbarkeit und Flexibilität des Systems in den Grundzügen erst möglich macht.
2. **Lose Kopplung:** Der Prognoseprozess und der resultierende Systemaufbau sind *data driven*, d.h. der wesentliche Systemablauf besteht aus der Bereitstellung und Errechnung von wohldefinierten Daten nach einem repetitiven Muster. Dies ermöglicht die besagte lose Kopplung der Systemteile über die Datenbank, ohne dass Module direkt miteinander kommunizieren müssen, wodurch die Schnittstellen zwischen den Modulen stark reduziert werden können.

Nachteile:

1. Komplexität: Die Modularisierung eines Systems bedeutet immer höhere anfängliche Komplexität, da die Interoperabilität der Module (und zukünftiger Module) bei der Systemkonzeption und -entwicklung geplant werden muss. Dieser höhere Initialaufwand sollte sich jedoch durch die Zeiteinsparungen in späteren Entwicklungsphasen wieder kompensieren.
2. DB-Anforderungen: Bei lose gekoppelten Modulen, welche im Wesentlichen über eine gemeinsame Datenbank miteinander kommunizieren, werden höhere Anforderungen an die Datenbank gestellt: Sie muss zum Beispiel den parallelen Zugriff auf die Daten (simultane Lese- und Schreiboperationen) erlauben, was jedoch bei allen modernen RDBMS der Fall ist. Des Weiteren ist der Datenaustausch via Datenbank deutlich langsamer als ein in-Memory Austausch von Daten.
3. Synchronisation: Die Synchronisation der einzelnen, parallelen Prozessschritte stellt immer eine komplexe Herausforderung dar und erfordert daher eine sehr sorgfältige Planung bei der Implementierung und entsprechende Systemtests.

Beschreibung der Module:

1. **Preprocessing-Module:** Preprocessing-Module charakterisieren sich dadurch, dass sie für jegliche historische Datenaufbereitung verantwortlich sind. Sie bereiten Daten bis zum aktuellen Zeitpunkt t auf. Um für das Prognosesystem Daten zur Verfügung zu stellen, müssen diese als erstes importiert werden. Innerhalb eines Preprocessing-Moduls wird der Datenimport von sogenannten *Import-Tools* übernommen. Import-Tools enthalten die spezifischen Routinen, die für das Abholen externer Daten nötig sind, d.h. sie sind an die entsprechende Schnittstelle des Datenlieferanten angepasst. Dabei kann ein Preprocessing-Modul mehrere Import-Tools definieren, falls es Daten aus mehreren Quellen importieren muss. Die Auslagerung des Datenimports innerhalb der Preprocessing-Module auf Import-Tools hat folgende Vorteile:

- Da die Datenquellen ausserhalb der Kompetenzen der Systementwickler liegen, muss eine einfache Adaption des Systems an sich ändernde Datenquellen möglich sein. Dies ist durch die Trennung des Datenimports von der Datenaufbereitung, resp. durch die Auslagerung des Prozesses auf Import-Tools sichergestellt.
- Import-Tools können grundsätzlich von anderen Modulen wiederverwendet werden, ohne dass das gesamte Preprocessing-Modul angepasst werden muss. Dies erlaubt zusätzliche Flexibilität und die Reduktion von Abhängigkeiten einzelner Module voneinander.
- Preprocessing-Module können grundsätzlich gegenseitige Abhängigkeiten vorweisen. Z.B. kann die Hochrechnung von Reisezeiten aus Detektorwerten auf aggregierten Detektorwerten beruhen. Schematisch ist diese Abhängigkeit durch eine Schleife von Modul-Output zu –Input in Abbildung 60 dargestellt.

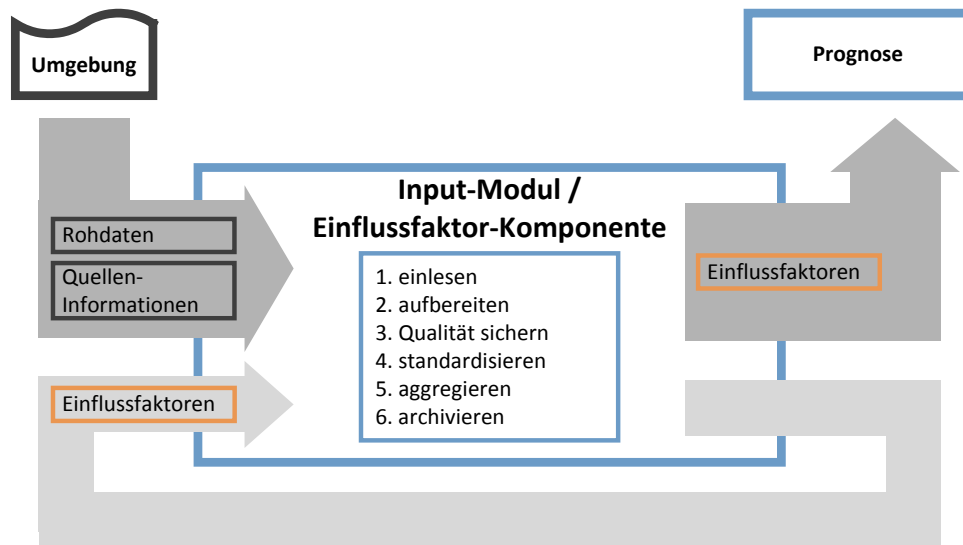


Abbildung 60 Schema der Preprocessing-Module

Im Rahmen des Projektes wurden die folgenden 4 Preprocessing-Module für die Entwicklungsetappe 1 ausgearbeitet:

- **Detektor-Aggregation:** Dieses Modul kümmert sich um die zeitgerechte Bereitstellung der Detektordaten. Exemplarisch ist der Prozessablauf in Abbildung 61 schematisch dargestellt.

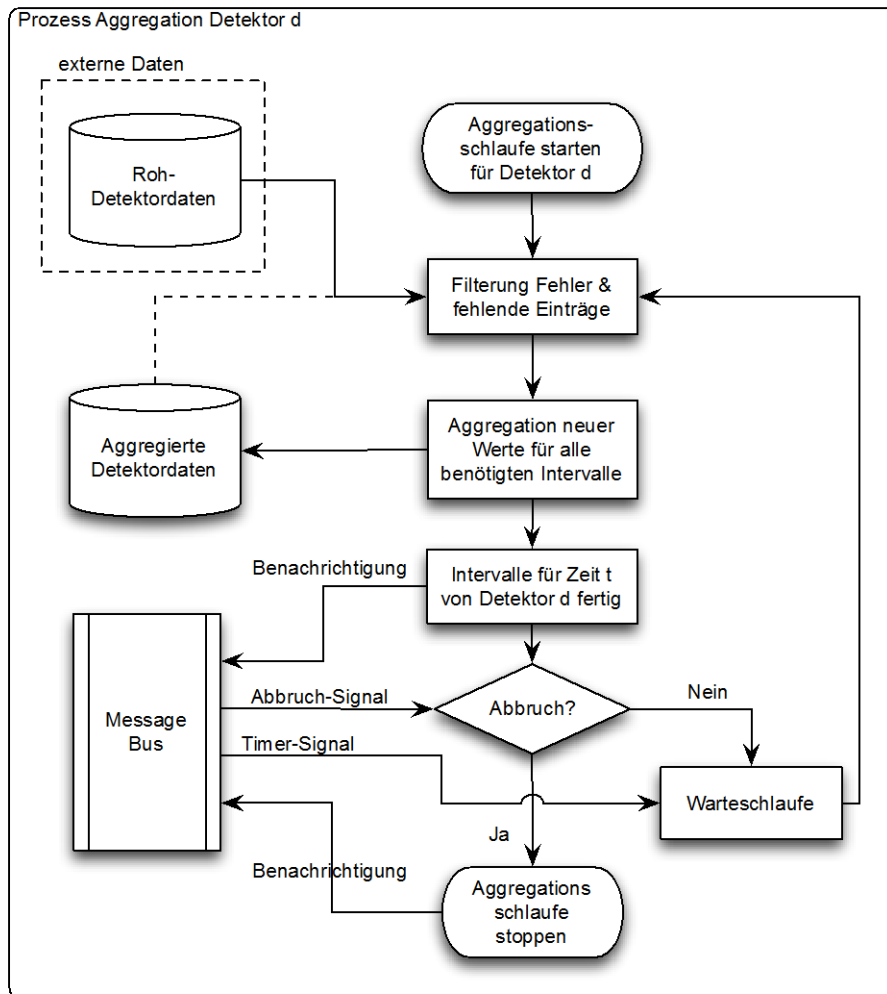


Abbildung 61 Prozessablauf Detektor-Aggregation

- **Einflussfaktor-Aufbereitung:** Dieses Modul kümmert sich um den Import oder die Berechnung und Aufbereitung externer Einflussfaktoren (Wetter, Kalendertag, Ferien, Anlässe etc.), die für die Vorstrukturierung relevant sind.
- **Vorstrukturierung:** In diesem Modul werden die Klassen für die Basisprognose bestimmt (siehe Kapitel 6.5).
- **Basisdaten-Import und Aufbereitung:** Dieses Preprocessing-Modul hat zum Ziel, sämtliche vom System benötigten statischen Basisdaten (Strassen-Netzdaten, Detektor-Position, Segmentdefinitionen etc.) aus den Basisdaten oder ggf. aus Generalistendaten/Exportdaten anderer ASTRA Fachanwendungen zu importieren.

Eine technisch detaillierte Beschreibung der Module hinsichtlich Prozessabläufen, Schnittstellen, Modulkomponenten und Datenmodellen findet sich in [ZHAW/Rapp, 2013b].

2. **Prognose-Module:** Wenn alle notwendigen Daten für eine Prognose bereitstehen, werden sie den eigentlichen Prognose-Modulen zur Verfügung gestellt. Die von den Prognose-Modulen erzeugten Daten können weiteren Prognose-Modulen als Input dienen. Beispielsweise können die prognostizierten Reisezeiten für gewisse Strassenabschnitte für die Prognose von Staus auf ebendiesen Strassenabschnitten genutzt werden. Schematisch ist dies in Abbildung 62 durch die Feedback-Schleife dargestellt. Die spezielle Eigenschaft eines Prognose-Moduls ist die Anwendung spezifischer Algorithmen im Bereich Stau- und Verkehrsfluss-Prognosen wie zum Beispiel Zeitreihenmodelle oder Clustering/Klassifizierung. Innerhalb eines Prognose-Moduls werden die prognostizierten Daten archiviert. Das Prognose-Modul über-

nimmt dabei auch die Aufgabe, die Prognose-Genauigkeit für bereits vergangene Prognosezeitpunkte, für welche wahre Messungen bereits existieren, nachzutragen. Dies ist wichtig, damit sich das verwendete Prognoseverfahren laufend fehlerbasiert optimieren kann.

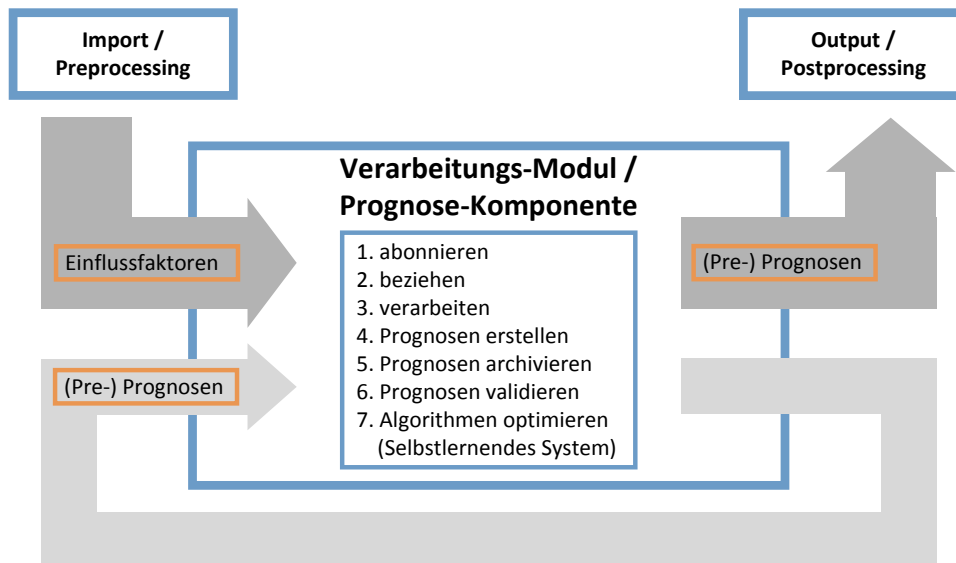


Abbildung 62 Schema der Prognosemodule

Eine technisch detaillierte Beschreibung verschiedener Prognosemodule findet sich in [ZHAW/Rapp, 2013b].

- 3. Postprocessing-Module:** Postprocessing-Module kümmern sich um die Aufbereitung, Aggregation und Formatierung der Prognosedaten für den Export aus dem Prognosesystem heraus (s. Abbildung 63). Dieser Teil des Prognosesystems hat mit der Prognoseerstellung nichts mehr zu tun. Ziel jeder Postprocessing-Komponente ist ein massgeschneidertes Angebot der Prognosedaten für eine spezifische Anwendung z.B. als Input für eine Reiseempfehlungs-Applikation. Die Prognosedaten werden von einem Postprocessing-Modul daher derart aufbereitet, dass sie von der entsprechenden Anwendung direkt eingelesen/importiert werden können. Technisch können die Postprocessing-Module via Datenbank auf die Daten sämtlicher Module des Systems lesend zugreifen. Ähnlich wie bei den Preprocessing-Modulen ist auch hier innerhalb eines Postprocessing-Moduls die Aufbereitung vom Export-Prozess getrennt: Der eigentliche Export wird dabei von sog. Export-Tools übernommen, welche sich um die entsprechende Schnittstelle zur externen Applikation kümmern. Dies stellt sicher, dass eine Anpassung eines Outputs unabhängig vom Rest des Prognosesystems erfolgen kann.

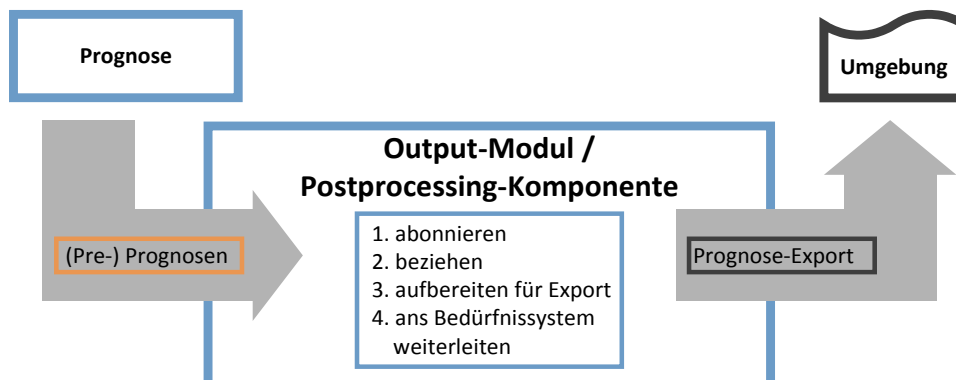


Abbildung 63 Schema der Postprocessing-Module

7 Beurteilung des Konzeptes für ein Stauprognosesystem

7.1 Einleitung

7.1.1 Ziel der Abklärungen

Das Kapitel 7 beinhaltet im Rahmen der Phase 1b Konzept folgende **Projektziele**:

- Die Beurteilung und Bewertung verschiedener Varianten für das Systemkonzept für das Stauprognosesystem (Ergebnis des Kapitels 6), um die weiterzuverfolgenden Varianten einzugrenzen.
- Die Konkretisierung der Phase 2 Testanwendungen.

Aus der Phase Systemkonzept (Kapitel 6) sind jedoch keine grundsätzlich verschiedenen Stauprognosesystemkonzepte sondern vier Ausbaustufen (modularer Aufbau) eines einzelnen Konzepts hervorgegangen. Die Stufen sind durch die Bedürfnisse, die Datenlage und die Methodik definiert. Insbesondere wurde darauf geachtet, dass die erste Etappe gewisse Mindestanforderungen abdeckt und dass die Voraussetzungen für einen Testbetrieb (Verfügbarkeit von Daten und Methodik) gegeben sind. Die weiteren Etappen decken sinnvolle mögliche Ausbaustufen ab. Im Hinblick auf die Testanwendungen kommt zur Zeit aufgrund der verfügbaren Daten und der verfügbaren Methodik nur die erste Etappe in Frage.

Das Kapitel 7 ergründet Eigenschaften und Vor- bzw. Nachteile der vier Ausbaustufen sowie eines Stauprognosesystems im allgemeinen. Weiter liefert Kapitel 7 einen kompakten Überblick als Entscheidungsgrundlage für die Entscheidungsträger.

7.2 Vorgehen

Es wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Identifizierung der massgebenden Kriterien für die Beurteilung des Systemkonzeptes, Festlegung der Mindestanforderungen
- Beurteilung/Bewertung der Ausbaustufen anhand des Kriteriensets
- Konkretisierung der Phase II Testanwendungen.

7.2.1 Generelle Beurteilungsmethodik

Beurteilungsgegenstand

Die wichtigsten **Merkmale** der vier Etappen sind gemäss Kapitel 6:

1. Etappe:
 - Verkehrszustandsprognose als Basis für Stau- und Reisezeitprognose
 - Beschränkung auf Querschnittsdaten und Basisumfelddaten
 - Nationalstrassen und ausgewählte kantonale HLS
2. Etappe:
 - Direkte Reisezeitprognosen
 - Erweiterung auf Streckendaten (FPD, FCD etc.)
 - Erweiterte Berücksichtigung von Umfelddaten
3. Etappe:
 - Erweiterung auf kantonale HLS/HVS
 - Differenzierte Ermittlung der Staulängen und -dauern
 - Routingfunktionen (mit rudimentärem Rerouting)
4. Etappe:
 - Simulation von neuralgischen Netzteilen
 - Komplettes Rerouting

- Umfassende Berücksichtigung Umfelddaten
- Automatisierte VM-Schnittstellen

Stufenweise Beurteilung

Die Beurteilung der vier Etappen erfolgt in mehreren Stufen und umfasst:

- Die Überprüfung des Abdeckungsgrads der Anforderungen (Stufe 1)
- Eine SWOT-Analyse für die erste und die letzte Ausbautappe (Stufe 2)
- Ein qualitatives Argumentarium pro / contra eines Stauprognosesystems (Stufe 3)
- Einige Überlegungen zu dem monetarisierbaren Nutzen eines Stauprognosesystems (Stufe 4).

Stufe 1 zeigt, inwieweit die vier Ausbautappen die im Rahmen des Kapitels 3 festgelegten **Anforderungen** abdecken.

Stufe 2 baut auf diesen Erkenntnissen auf, um **Stärken und Schwächen** der Ausbautappen zu identifizieren. Die Berücksichtigung von externen Faktoren (Chancen und Risiken) erweitert den Blickwinkel und erlaubt eine umfassendere Beurteilung der Etappen. Da Chancen und Risiken weitgehend die gleichen für alle Etappen sind, konzentriert sich die zweite Stufe auf die erste und die letzte Etappe, um einerseits das gesamte Spektrum der Varianten abzudecken, ohne andererseits zu viel gegenüber Stufe 1 zu wiederholen.

Mit der Stufe 3 versuchen wir allgemein Vor- und Nachteile eines Stauprognosesystems aufzuzeigen.

Als Abschluss der Bewertung versuchen wir, einen Einblick in den monetären Nutzen des Stauprognosesystems zu gewinnen (Stufe 4). Aufgrund des heutigen Kenntnisstands zu den Auswirkungen und dem Nutzen eines Stauprognosesystems ist aber kaum mehr als eine grobe Abschätzung der monetären Grössen möglich, welche auf dem Spiel stehen.

Ergänzende Details zur Beurteilungsmethodik befinden sich in den nachfolgenden Kapiteln.

7.3 Abdeckungsgrad der Anforderungen

7.3.1 Beurteilungsmethodik und -kriterien

Wie bereits oben erwähnt ist das Ausmass der Erfüllung der Anforderungen an das Stauprognosesystem massgebend für die Beurteilung der Systemkonzeptvarianten. Grundlage für die Formulierung der Anforderungen bilden die Ergebnisse der Bedürfnisanalyse (Kapitel 3), der State of the Art Analyse Stauprognoseverfahren und -systeme (Kapitel 2) sowie die Erkenntnisse aus Kapitel 4 (Prognoseverfahren und Prognosevariablen) und Kapitel 5 (Datenverfügbarkeit und -bereitstellung). Für die Formulierung der Mindestanforderungen werden auch die Kriterien des Beurteilungsrasters verwendet, wobei nicht für alle Teilkriterien Mindestanforderungen formuliert werden müssen. Alle Systemkonzeptvarianten sollten diese Mindestanforderungen einhalten.

Für die Beurteilung der Systemkonzeptvarianten und die Formulierung der Anforderungen kommen folgende Hauptkriterien zum Einsatz:

- **Prognosefähigkeit/Funktionalität:** beurteilt werden die durch das Systemkonzept abgedeckten Funktionalitäten wie Anwendungszwecke, Prognosekenngrössen, Abdeckung Strassenklassen, berücksichtigte Verkehrsdaten und berücksichtigte externe Faktoren.
- **Realisierbarkeit:** beurteilt wird die Komplexität in Bezug auf die verwendeten Verkehrsdaten, Umfeld- und Ereignisdaten usw.
- **Kosten:** beurteilt werden die Kosten bezüglich Basisystem, Datenkomplexität, Rechenkomplexität und Netzkomplexität.

Gegenüber dem ursprünglich vorgesehenen Beurteilungsraster (Stand Ende 2012) wurden Vereinfachungen vorgenommen. Dies, weil anstelle von Systemvarianten Systemetappen zu beurteilen waren (die sich nicht in allen Beurteilungskriterien unterscheiden) und weil sich verschiedene Kriterien erst im Rahmen eines Testbetriebs beurteilen lassen

(z.B. stat. Güte, Betriebszuverlässigkeit).

Im Anhang VI.1 ist der Beurteilungsraster für das Systemkonzept tabellarisch dargestellt. Er enthält für die 3 Hauptkriterien die identifizierten Teilkriterien, die Zielgrössen und die Mindestanforderungen.

Konkret erfolgt die **Bewertung** der Abdeckung der Anforderungen **in drei Schritten**:

- Schritt 1: Der Abdeckungsgrad der Anforderungen in der Etappe 4 wird für jeden Indikator ermittelt
- Schritt 2: Die Fortschritte der einzelnen Etappen werden bezüglich jedes Indikators / jeder Zielgrösse qualitativ bewertet (0 = Kein Fortschritt, 1 = Fortschritt klein, 2 = Fortschritt gross)
- Schritt 3: Der Abdeckungsgrad der Anforderungen in jeder einzelnen Etappe wird ausgehend von der Etappe 4 berechnet.

Ein Zahlenbeispiel für einen fiktiven Indikator X veranschaulicht das Vorgehen bei der Bewertung:

- Schritt 1: Ein Vergleich zwischen Etappe 4 und den Anforderungen aus der Bedürfnisanalyse (Kap. 3) zeigt, dass der Indikator X die Anforderungen zu 90% abdeckt.
- Schritt 2: Die qualitative Bewertung ergibt 2 Punkte für die erste und die zweite Etappe, 5 Punkte für die dritte Etappe und 6 Punkte für die vierte Etappe.
- Schritt 3: 6 Punkte (Etappe 4) entsprechen 90% der Anforderungen; daraus lässt sich ableiten, dass 2 Punkte (Etappe 1 und 2) 30% und 5 Punkte (Etappe 3) 75% der Anforderungen entsprechen.

Etappe 4 kann die Anforderungen aus der Bedürfnisanalyse (Kapitel 3) in folgendem Ausmass abdecken:

- Teilkriterium 1.1 Anwendungszwecke -> 70%:
Etappe 4 berücksichtigt Verkehrsinformation (30%⁸), Reise- und Routenplanung (20%) und Verkehrsmanagement (20%); nicht berücksichtigt sind Baustellen-/Unterhaltsplanung (12.5%), Strassennetzplanung (7.5%) und Verkehrsmonitoring (10%).
- Teilkriterium 1.2 Prognosekenngrossen -> 100%:
Etappe 4 kann alle gewünschten Kenngrossen direkt oder indirekt berücksichtigen.
- Teilkriterium 1.3 Strassenklassen -> 85%:
Etappe 4 berücksichtigt Nationalstrassen (44%) und Hauptverkehrsstrassen (41%); nicht berücksichtigt sind Sammelstrassen (9%), Erschliessungsstrassen (3%) und andere Strassen (3%).
- Teilkriterium 1.4 Abdeckung Verkehrsdaten -> 70%:
Etappe 4 berücksichtigt Querschnittsdaten (43%) und Floating Car Data / Floating Phone Data (26%); nicht berücksichtigt sind Videokameras (10%), automatische Nummernschilderkennung (7%), Nachfragematrizen (7%) und Verkehrsmeldungen (7%).
- Teilkriterium 1.5 Abdeckung externe Faktoren -> 97%:
Etappe 4 kann alle gewünschten externen Faktoren bis auf den ÖV (3%) berücksichtigen.
- Teilkriterium 2.1 Komplexität -> 0%:
Dieses Teilkriterium wurde im Rahmen der Bedürfnisanalyse nicht angesprochen, wobei die logische Anforderung lautet, so wenig Komplexität wie möglich. Wir nehmen an, dass die vierte Etappe die grösste Komplexität erreicht und somit am wenigsten den Anforderungen entspricht (0%).
- Teilkriterium 3.1 Kosten -> 0%:
Dieses Teilkriterium wurde im Rahmen der Bedürfnisanalyse nicht angesprochen,

⁸ Die Angaben in Prozent zeigen den Anteil der Befragten, welcher im Rahmen der Bedürfnisanalyse ein bestimmtes Merkmal / Eigenschaft des Systems als wichtig/nötig eingestuft hat.

wobei die logische Anforderung lautet, so wenig Kosten wie möglich. Wir nehmen an, dass die vierte Etappe den grössten Aufwand verursacht und somit am wenigsten den Anforderungen entspricht (0%).

Diese maximalen Zielerreichungsgrade sind bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Anhang VI.2 enthält für jedes Teilkriterium eine Tabelle mit den Details zur Bewertung.

7.3.2 Ergebnisse

Die Abbildungen auf den folgenden Seiten veranschaulichen die Ergebnisse graphisch.

Abbildung 64 zeigt, dass **Etappe 1** die Erreichung der Mindestanforderungen mit einem relativ kleinen Aufwand und einer überschaubaren Komplexität erlaubt.

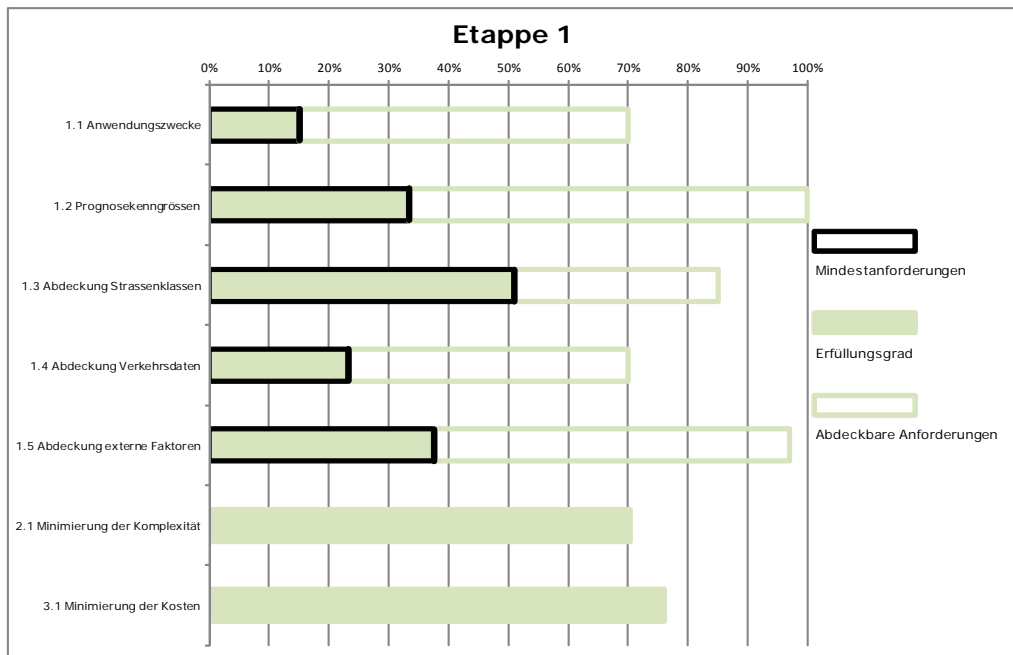


Abbildung 64 Beurteilung des Abdeckungsgrads der Anforderungen durch Etappe 1

Etappe 2 ist etwas teurer und komplexer, erlaubt aber insbesondere beim Teilkriterium „Abdeckung Verkehrsdaten“ mit der Berücksichtigung von Streckendaten (Floating Car Data / Floating Phone Data) einen grossen Sprung nach vorne (vgl. Abbildung 65). Die nächsten Etappen bringen bezüglich dieses Teilkriteriums kein weiteren Vorteile mehr mit sich. Bei den externen Faktoren ist mit der Berücksichtigung von Wetter, Baustellen und Ferienkalender Ausland auch ein grosser Fortschritt gegenüber Etappe 1 zu registrieren.

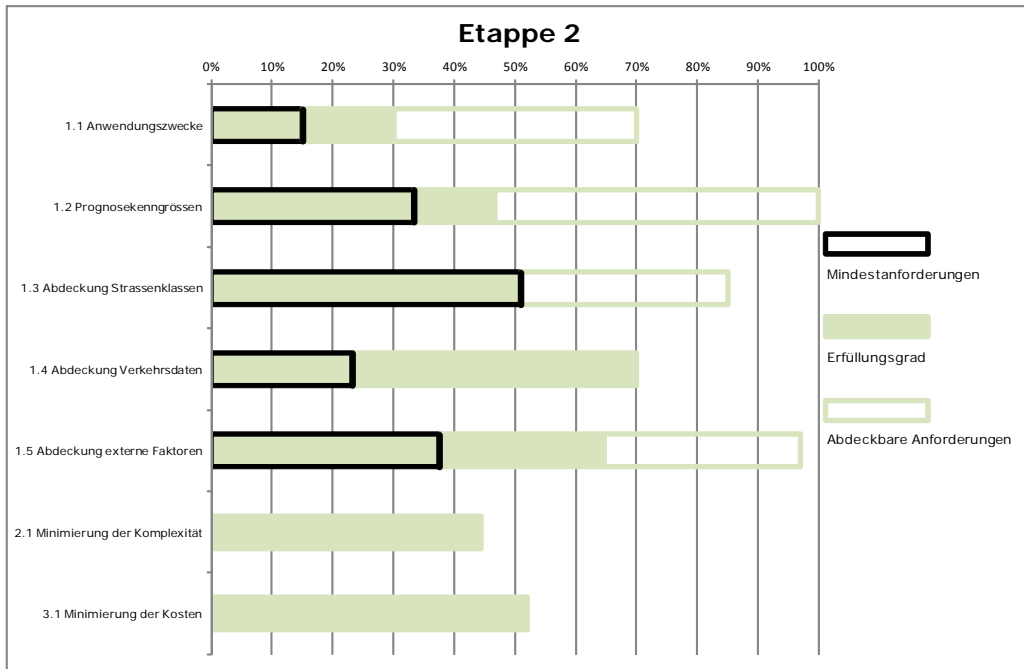


Abbildung 65 Beurteilung des Abdeckungsgrads der Anforderungen durch Etappe 2

Etappe 3 ist noch etwas teurer und komplexer als Etappe 2, führt aber zu wichtigen Fortschritten bezüglich der Teilkriterien Prognosekenngrößen (direkte Prognose der Staulänge und der Staudauer) und Abdeckung Strassenklassen (kantonale HLS/HVS vollständig abgedeckt; vgl. Abbildung 66).

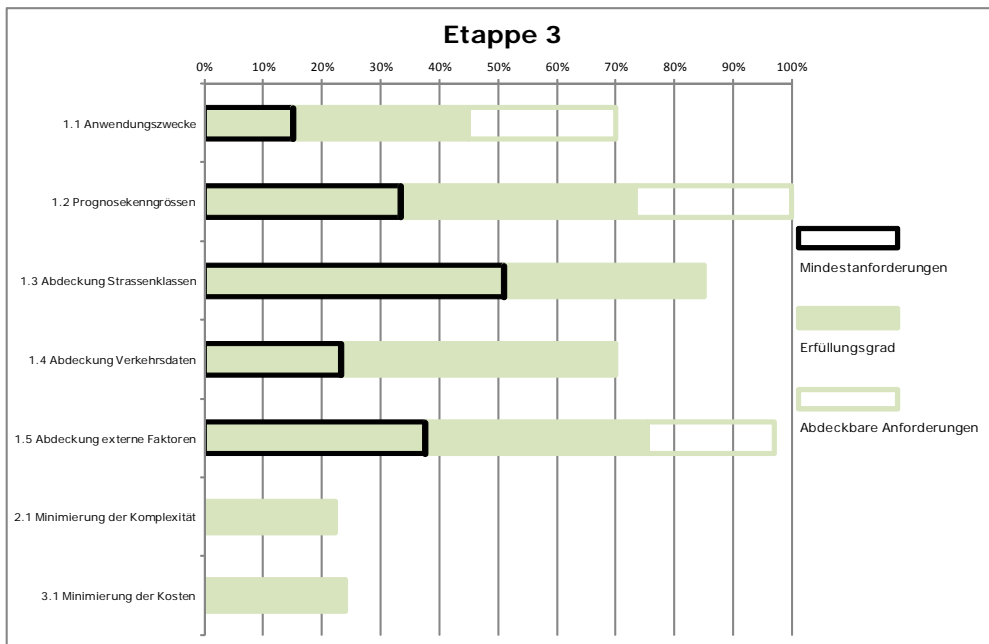


Abbildung 66 Beurteilung des Abdeckungsgrads der Anforderungen durch Etappe 3

Etappe 4 bringt gegenüber Etappe 3 deutliche Fortschritte bezüglich der Anwendungszwecke (Rerouting, automatisierte Schnittstelle für VM-Massnahmen usw.), der Prognosekenngrößen (Berechnung Staulängen und Staudauer mittels Simulationen) und der Berücksichtigung der externen Faktoren (Unfälle / Störungen, automatisierte Schnittstelle zu VM-Massnahmen) mit sich (vgl. Abbildung 67).

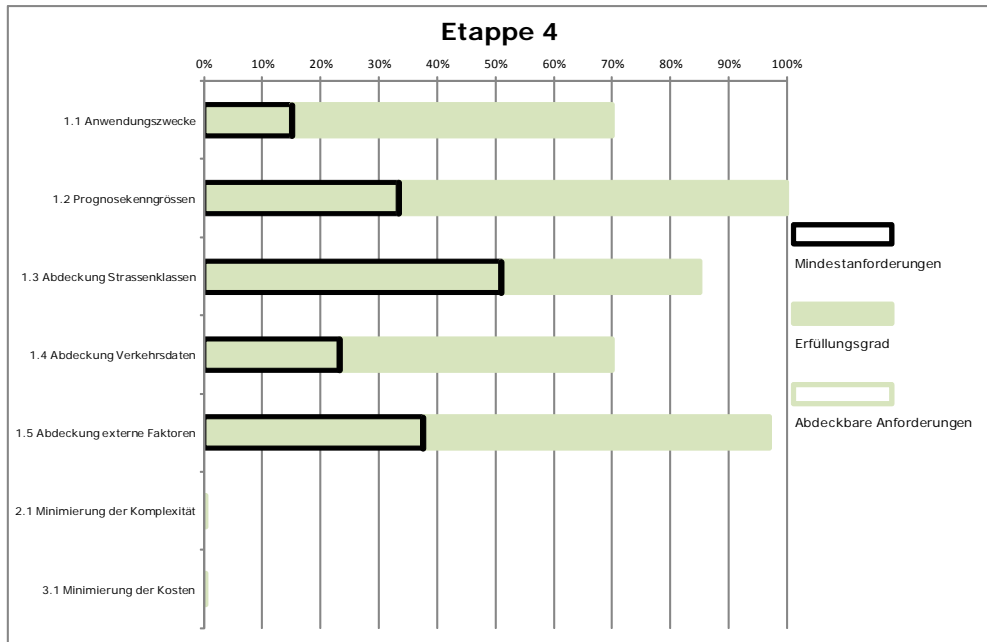


Abbildung 67 Beurteilung des Abdeckungsgrads der Anforderungen durch Etappe 4

Abbildung 68 fasst die Ergebnisse für alle vier Etappen graphisch zusammen. Dabei ist ersichtlich, welche Etappe bezüglich welcher Kriterien Fortschritte erlaubt. So bringt z. B. jede Etappe Vorteile bezüglich der Anwendungszwecke. Bei der Abdeckung der Verkehrsdaten ist das Maximum bereits mit der Etappe 2 erreicht.

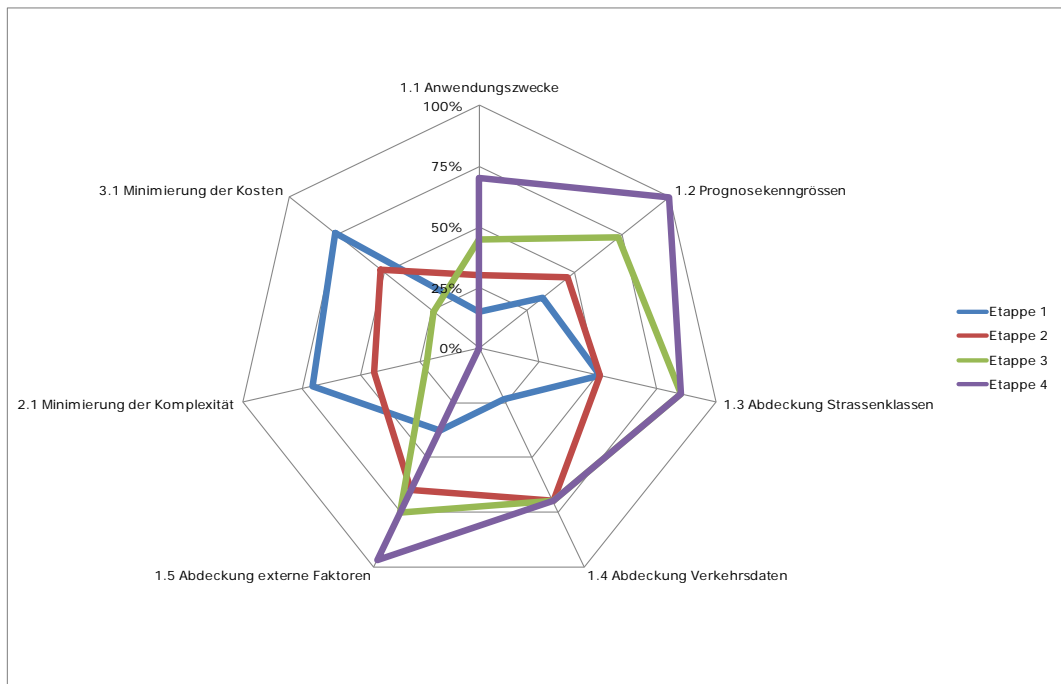


Abbildung 68 Überblick zum Abdeckungsgrad der Anforderungen aller vier Etappen

7.4 SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse umfasst projektinterne Stärken und Schwächen sowie projektexterne Chancen und Risiken. Gegenüber der Beurteilung in der Stufe 1, welche auf die Anforderungen gemäss Bedürfnisanalyse fokussiert, wird der Blick etwas ausgeweitet.

Folgende Tabelle 46 zeigt die SWOT-Analyse für die **erste Etappe**. Stärken und Schwächen der ersten Etappe leiten sich weitgehend aus der Analyse im vorherigen Abschnitt ab. Als weitere Stärken sind die kurzfristige Umsetzbarkeit und die Minimierung der Risiken zu erwähnen, sowie die Tatsache, dass dieses Stauprognoseverfahren auf die Schweizerischen Bedingungen zugeschnitten ist.

Die Chancen liegen einerseits beim Problemdruck, der voraussichtlich hoch bleiben bzw. sich verschärfen wird. Die technologische Entwicklung wird das Projekt sowohl beim Systeminput als auch bei der Nutzung des Systemoutputs unterstützen. Die Flexibilisierung der Arbeitszeiten und der erhöhte Bedarf nach Informationen zur Optimierung des Zeitmanagements sind weitere Faktoren, welche die Entwicklung eines Stauprognosesystems begünstigen werden. Die Risiken liegen bei den knappen Ressourcen (personell / finanziell), bei möglichen Ziel- bzw. Interessenkonflikten und bei der Akzeptanz. Bei fehlenden Alternativen, sei es bezüglich Routen/Verkehrsmittel, sei es bezüglich Abfahrtszeiten, reduziert sich der Nutzen des Stauprognosesystems.

Tabelle 46 SWOT-Analyse Etappe 1 Stauprognosesystem

Intern	
Strenghts	Weakness
<ul style="list-style-type: none"> • Ein Stauprognosesystem für die Verkehrsinformation liegt vor; eine minimale Funktionalität für das Verkehrsmanagement ist gewährleistet. • Die künftige Verkehrslage ist erfasst. • Das Netz der Nationalstrassen ist abgedeckt. • Gewisse externe Faktoren sind berücksichtigt (aktuelle Verkehrslage, Wochentag, Ferienkalender der Schweiz, VM-Eingriffe bei der Netzstruktur). • Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Output-Kenngrössen liegt vor. • Minimaler Aufwand für Aufbau und Betrieb des Systems • Umsetzbarkeit zum Zeitpunkt 2013 gewährleistet (Methodik und Datenverfügbarkeit vorhanden) • Umsetzungsrisiken minimal • Betriebsrisiken minimal • Auf die schweiz. Bedingungen zugeschnitten • Ausbaufähigkeit des Systems 	<ul style="list-style-type: none"> • Das Stauprognosesystem deckt mehrere Anwendungszwecke nicht ab (Reise- und Routenplanung, Baustellen- / Unterhaltsplanung, Strassennetzplanung usw.). • System berücksichtigt nur Querschnittsdaten (geringere Auflösung der Output-Daten). • Nur abgeleitete Prognose für Reisezeiten, Staulänge und Staudauer möglich (tiefere Genauigkeit als bei direkten Prognosen) • Kantonale HLS/HVS nur punktuell berücksichtigt, untergeordnetes Netz und Strecken im Ausland nicht berücksichtigt • Diverse externe Faktoren nicht direkt berücksichtigt (Wetter, Baustellen usw.)
Extern	
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> • Problemdruck ist hoch und wird hoch bleiben. • Technologische Entwicklung (leistungsfähigere IT-Systeme, Big Data–Problematik usw.) • Bedürfnis nach Informationen nimmt zu (Optimierung des Zeitmanagements) • Zunahme der elektronischen Vernetzung (Mobile Geräte, Fahrzeug-Geräte) • Datenverfügbarkeit und –vernetzung nimmt zu (Verdichtung der Zählstellen usw.) • Flexibilisierung der Arbeitszeiten und der –orten • Zentrale Stelle für Verkehrsmanagement (VMZ-C) • Weitere zunehmende Synergien mit Fachapplikationen des ASTRA (MISTRA, INA usw.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Knappe Ressourcen (finanziell und/oder personell) • Bei fehlenden Alternativen möglicherweise tiefer Nutzen • Zielkonflikte möglich (Verkehrsverlagerung auf das untergeordnete Strassennetz usw.) • Fehlende Glaubwürdigkeit/Geringe Akzeptanz bei den potentiellen Nutzern (beschränkte Wahrnehmung des zusätzlichen Nutzens, Datenschutz-Problematik usw.)

Die nächste Tabelle 47 zeigt die Ergebnisse der SWOT-Analyse für die **Etappe 4**. Gegenüber der ersten Etappe bietet die vierte Etappe bei den Stärken eine Reihe von Vorteilen / zusätzlichen Funktionalitäten. Zu den Schwächen dieser Etappe gehört insbesondere die Umsetzbarkeit, welche heute noch nicht gegeben ist. Chancen und Risiken entsprechen denjenigen, welche für die erste Etappe identifiziert wurden.

Tabelle 47 SWOT-Analyse Etappe 4 Stauprognosesystem

Intern	
Strengths	Weakness
<ul style="list-style-type: none"> • Ein Stauprognosesystem für die Verkehrsinformation, die Reise- und Routenplanung sowie das Verkehrsmanagement liegt vor • System berücksichtigt Querschnitt- und Streckendaten (sehr feine Auflösung der Output-Größen) • Es liegen qualitativ hochwertige Prognosen für die künftige Verkehrslage, die Reisezeiten, die Staulänge und die Staudauer vor. • Das Schweizerische Hauptverkehrsnetz ist abgedeckt (Nationalstrassen, kantonale HLS/HVS) • Alle relevanten externen Faktoren sind berücksichtigt (aktuelle Verkehrslage, Wochentag, Ferienkalender Schweiz/Ausland, VM-Eingriffe bei der Netzstruktur, Wetter, Baustellen usw.). • Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Output-Kenngrößen liegt vor. • Automatisierung des Verkehrsmanagement • Auf die Schweizerischen Bedingungen zugeschnitten • Ausbaufähigkeit des Systems 	<ul style="list-style-type: none"> • Das Stauprognosesystem deckt gewisse Anwendungszwecke nicht ab (Baustellen- / Unterhaltsplanung, Strassennetzplanung usw.). • Strecken im Ausland und untergeordnetes Netz nicht berücksichtigt • Relativ hoher Aufwand für Aufbau und Betrieb des Systems • Umsetzbarkeit zum Zeitpunkt 2013 noch nicht gewährleistet (bezüglich Methodik und insbesondere Datenverfügbarkeit) • Umsetzungsrisiken vorhanden (Komplexität usw.) • Betriebsrisiken vorhanden z.B. Rückkopplungseffekte (grössere Auswirkungen bei Fehlprognosen)
Extern	
Opportunities	Threats
<ul style="list-style-type: none"> • Problemdruck ist hoch und wird hoch bleiben. • Technologische Entwicklung (leistungsfähigere IT-Systeme, Big Data–Problematik usw.) • Bedürfnis nach Informationen nimmt zu (Optimierung des Zeitmanagements). • Zunahme der elektronischer Vernetzung (Mobile Geräte, Fahrzeug-Geräte) • Datenverfügbarkeit und –vernetzung nimmt zu (Verdichtung der Zählstellen usw.). • Flexibilisierung der Arbeitszeiten und der –orten (Wahlmöglichkeiten nehmen zu) • Zentrale Stelle für Verkehrsmanagement (VMZ-CH Emmen) • Weitere zunehmende Synergien mit Fachapplikationen des ASTRA (MISTRA, INA usw.) 	<ul style="list-style-type: none"> • Knappe Ressourcen (finanziell und/oder personell) • Bei fehlenden Alternativen möglicherweise tiefer Nutzen • Zielkonflikte möglich (Verkehrsverlagerung auf das untergeordnete Strassennetz usw.) • Fehlende Glaubwürdigkeit/Geringe Akzeptanz bei den potentiellen Nutzern (beschränkte Wahrnehmung des zusätzlichen Nutzens, Datenschutz-Problematik usw.)

7.5 Argumentarium pro / contra

Ziel der dritten Bewertungsstufe ist es, ein Argumentarium pro / contra eines Stauprognosesystems zu erarbeiten.

Dieses Ziel ist dadurch erschwert, dass wir über keine genaueren Informationen über die Auswirkungen eines Stauprognosesystems verfügen: Führt das System wie gewünscht zu einer Reduktion der Staustunden? In welchem Umfang? Welche Verkehrsverlagerungen werden eintreten? Wo? Weiter ist die Detailkonfiguration des Systems noch nicht bekannt: Wer betreibt das System? Wer hat Zugriff? Wie? Inwieweit werden dem Strassenutzer Reise-/Routenempfehlungen zur Verfügung gestellt?

Das Argumentarium muss sich demnach auf wenige Aspekte konzentrieren, die wir besser kennen und auf die vorhandenen Unsicherheiten hinweisen.

Folgende Argumente sprechen **für ein Stauprognosesystem**:

- Strassenbenützer sind besser über die künftige Verkehrslage auf dem berücksichtigten Strassennetz informiert, dadurch können Sie:
 - Ihre Fahrten / Transporte / Einsätze besser planen
 - Zuverlässiger die Fahrzeiten planen / einschätzen
 - Ihr Fahrverhalten rechtzeitig auf die prognostizierte Verkehrslage anpassen
- Strassenbetreiber sind besser über die künftige Verkehrslage auf dem berücksichtigten Strassennetz informiert, und können das Verkehrsmanagement und die betrieblichen Tätigkeiten optimieren.
- Ist das Stauprognosesystem ins ASTRA integriert, kann man direkt das System steuern und ins Verkehrsmanagement integrieren.

Unter den Strassenbenützern wird das System insbesondere bei denjenigen Nutzen stiften, welche einen hohen Wert auf die Reisezeit bzw. auf die Zuverlässigkeit der Reisezeiten legen. Das betrifft insbesondere den Geschäftsverkehr (Güterverkehr, Geschäftsreisen) aber auch die Unternehmungen des öffentlichen Verkehrs. Bei den Ereignisdiensten dürfte die zusätzliche Information hilfreich sein, um besser für die Einsätze vorbereitet zu sein. Das dürfte die Effizienz der Ereignisdienste zu Gunsten aller erhöhen. Kann die Richtung und Ausmass der Auswirkungen des Stauprognosesystems auf die Reisezeiten noch nicht definiert werden, ist jedoch mit grosser Wahrscheinlichkeit anzunehmen, dass die Zuverlässigkeit der Reise- und Transportzeiten zunehmen wird.

Je grösser das vom System abgedeckte Netz ist, desto höher der Kreis der Nutzer.

Die durch das System zusätzlich zur Verfügung gestellten Informationen sind insbesondere bei unvorhergesehenen Stauereignissen (z. B. wegen Unfällen) sowie für ortsunkundige Personen (in diesem Fall auch bei regelmässigen Stauphänomenen) nützlich.

Unter den Strassenbetreibern werden insbesondere die Verkehrsmanagementsdienste vom System profitieren. Ein gewisser Nutzen ist aber auch im Hinblick auf die Unterhalts- und Baustellenplanung denkbar.

Folgende Argumente sprechen **gegen ein Stauprognosesystem**:

- Das Stauprognosesystem benötigt eine gewisse Investition sowie einen gewissen Aufwand für die Entwicklung und den Betrieb des Systems
- Unerwünschte Verkehrsverlagerungen können nicht vollständig ausgeschlossen werden (z. B. auf das untergeordnete Strassennetz)

Es ist klar, dass das Stauprognosesystem Kosten verursachen wird. Der Nutzen kann im Voraus nur schlecht abgeschätzt werden. Einige wenige Zahlen im nächsten Abschnitt legen dar, dass aufgrund der sehr hohen volkswirtschaftlichen Staukosten und der relativ bescheidenen Investitions- und Betriebskosten für ein Stauprognosesystem, ein gutes Kosten-Nutzen Verhältnis erwartet werden kann.

Die Gefahr von unerwünschten Verkehrsverlagerungen existiert. Das Ausmass dieser unerwünschten Verlagerungen ist aber unbekannt. Als **Massnahme** ist es deswegen wichtig, die Angaben aus dem Stauprognosesystem stets mit **Empfehlungen** zu möglichen Umfahrungsmöglichkeiten zu begleiten, um auch das durch das System nicht erfasste Netz zu berücksichtigen.

7.6 Grobe quantitative Bewertung des Nutzens für die Verkehrsteilnehmer

7.6.1 Einleitung

Die wichtigste Frage lautet, inwieweit ein Stauprognosesystem zur **Vermeidung von Stau** und den damit verbundenen volkswirtschaftlichen Kosten beitragen kann. Weiter interessiert, inwieweit ein Stauprognosesystem zu einem effizienteren Strassenbetrieb führen kann.

Eine quantitative Bewertung der Auswirkungen eines Stauprognosesystems ist **zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich**.

Voraussetzung dafür wären einerseits Tests zum System selber, um dessen Prognosefähigkeit und Zuverlässigkeit zu ermitteln. Andererseits wären Informationen zu den Auswirkungen auf die Verkehrsteilnehmer und den Betreiber nötig.

Wird die Reduktion der Stauzeiten auf dem Schweizerischen Strassennetz als Hauptziel des Stauprognosesystems definiert, dann **kann das System den Umfang der Stauzeiten beeinflussen, wenn folgende Punkte gewährleistet sind:**

- Die betriebliche Zuverlässigkeit und die Zugänglichkeit des Systems sind gegeben.
- Die Bekanntheit des Systems ist gegeben; das System wird benützt, die vom System gelieferten Informationen sind verständlich.
- Die Verkehrsteilnehmer verfügen über Handlungsalternativen (bezüglich Routenwahl, Verkehrsmittelwahl, Wahl der Abfahrtszeit bzw. des Abfahrtstags, Zielwahl oder sogar bezüglich Durchführung der Fahrt).
- Die Verkehrsteilnehmer passen das eigene Mobilitätsverhalten an.
- Die Veränderungen führen zu einer Reduktion der Stauzeiten.

Leider existieren heute dazu kaum Informationen.

Die **betriebliche Zuverlässigkeit** des Systems kann erst im Rahmen von Pilotprojekten / Testanwendungen ermittelt werden. Mit der Implementierung der dritten Etappe geht das System von abgeleiteten zu direkten Prognosen der Staulängen bzw. der Staudauer über, was genauere und zuverlässigere Prognosen liefern wird. Die Ausführungen im Kapitel 2 haben gezeigt, dass funktionierende Stauprognosesysteme eine Realität sind. Der Zugänglichkeit des Systems ist bei dessen Entwicklung hohe Aufmerksamkeit zu schenken.

Das beste Stauprognosesystem bringt keinen Nutzen, solange das Instrument nicht **bekannt** ist bzw. nicht **benützt** wird oder dessen Informationen nicht **verstanden** werden. Auch zu diesen Themen kann vorläufig keine Aussage für das noch zu entwickelnde Stauprognosesystem gemacht werden. Es ist jedoch auch aufgrund der Bedürfnisanalyse anzunehmen, dass seitens der Verkehrsteilnehmer das Interesse vorhanden ist. Im Rahmen einer Befragung von etwa 100 Autobahnbenutzern in Deutschland [Bast, 2009] konnte z. B. festgestellt werden, dass 72% Reisezeitangaben nutzen. Eine Befragung von knapp 600 Autobahnbenutzern in Taiwan zeigt, dass etwa 90% auf Echtzeitinformationen zum Strassenverkehr zurückgreifen, 44% sogar häufig oder jederzeit [Ju, 2005]. Befragungen im Rahmen eines SVI-Forschungsprojekts im Jahr 2003 ergaben, dass etwa 60% der Verkehrsteilnehmer immer Verkehrsmeldungen im Radio hören [B+S, 2004].

Bei der Entwicklung des Systems sind diese Themen zu beachten. Insbesondere ist auch die Bekanntheit und Zugänglichkeit für die Verkehrsteilnehmern aus den umliegenden Länder zu berücksichtigen, will man auch für Regionen wie Basel, Genf, Schaffhausen, Bodensee oder Tessin ein brauchbares Instrument zur Verfügung stellen. Ab Etappe 2 umfasst das System eine (zuerst vereinfachte) Funktionalität für Reise- und Routenplanung, welche in den Etappen 3 und 4 weiter ausgebaut wird. Das dürfte mehr Nutzer dazu bewegen, das System zu benützen, solange die Komplexität (für die Nutzer) nicht allzu hoch wird.

Das Thema der **Handlungsalternativen** ist sehr wichtig und ist von den Etappen des Stauprognosesystems unabhängig. Stehen keine oder kaum Alternativen zur Verfügung, nutzt auch das beste Stauprognosesystem wenig. Die Verkehrsteilnehmer sind halt bes-

ser über die bevorstehenden Staus informiert und können Gegenmassnahmen treffen (Anpassung der Geschwindigkeit, Erhöhte Aufmerksamkeit usw.). Aufgrund der Berechenbarkeit einiger Stauphänomene (auf dem Nordring in Zürich, vor dem Gotthard-Tunnel usw.) ist die Frage nach den Handlungsalternativen durchaus berechtigt. Wieso fahren z. B. täglich tausende von Verkehrsteilnehmern auf dem Zürcher Nordring, wenn allen klar ist, dass es Stau gibt? Es ist anzunehmen, dass die Mehrheit tatsächlich keine Alternative hat. Pendler, die täglich diese Strecke zurücklegen, kennen die Stauphänomene in der Regel gut und sind auch über mögliche Alternativen informiert, falls solche überhaupt existieren. Eine 2003 durchgeführte Befragung von „Stauteilnehmern“ im Rahmen eines SVI-Forschungsprojekts [B+S, 2004] ergab, dass 76% der Personen, welche über den Stau informiert waren, trotzdem in den Stau gefahren sind, weil sie weder den Zeitpunkt der Reise noch die Route ändern konnten. 58% erwarteten aus einer Verhaltensänderung keinen Nutzen (Mehrfachnennungen möglich)⁹. Bei anderen Personen, z. B. Personen, die diese Strecke nicht regelmässig befahren oder ortskundig sind, ist es aber auch plausibel zu unter stellen, dass eine rechtzeitige Information über die Stauprognose die Suche nach Alternativen fördern würde. Dabei ist zu beachten, dass bei instabilen Verkehrssituationen auch wenige Fahrzeuge einen grossen Einfluss auf die Reisezeiten ausüben können. Weiter ist zu berücksichtigen, dass regelmässig eintretende Verkehrsüberlastungen nicht die einzige Ursache für Staus sind. So kann Stau auch die Folge eines Unfalls oder einer Baustelle sein. In diesem Fall kann ein Stauprognosesystem auch für Personen nützlich sein, die eine bestimmte Strecke regelmässig befahren und ortskundig sind.

Sind die vorherigen Voraussetzungen erfüllt, stellt sich dann die Frage, wie viele Verkehrsteilnehmer bereit sind, **ihr Verhalten tatsächlich zu modifizieren**. Fragen nach der Zuverlässigkeit des Stauprognosesystems (stimmen die Prognosen wirklich?) oder z. B. nach der Zweckmässigkeit eines Routenwechsels (ist die alternative Route wirklich schneller?) werden sich stellen. Auch dazu können zum heutigen Zeitpunkt noch keine Aussagen gemacht werden. Es ist jedoch anzunehmen, dass ein gewisser Anteil der Verkehrsteilnehmer bereit ist, ihr Verhalten aufgrund von Verkehrsinformationen anzupassen. Eine etwas ältere Studie aus den Niederlanden, bei welcher über 800 Personen befragt wurden, zeigt z. B., dass 12% bis 30% der Verkehrsteilnehmer die Routenwahl aufgrund von Verkehrsinformationen häufig ändern. Bei 40% bis 60% ist das nur manchmal der Fall und nur bei etwa 25% nie der Fall (vgl. [Emmerink, 1996]). Die vorher erwähnte Studie zu Autobahnbenützern in Taiwan konnte zeigen, dass je nach Abschnitt bis zu 1/3 der Verkehrsteilnehmer bereit war, die Route nach der Bereitstellung von Echtzeitinformationen zu wechseln. Dieser Anteil sank, je näher das Ziel war (vgl. [Ju, 2005]).

Ändert ein Teil der Verkehrsteilnehmer ihre Route, ihre Abfahrtszeit (oder Abfahrtstag) oder ihr Verkehrsmittel, **stellt sich die Frage, ob das nicht zu zusätzlichen Stautunden oder zu Reduktion vom Fahrkomfort anderswo führen wird**. Z. b. auf dem untergeordneten Strassennetz, wenn das Stauprognosesystem nur das übergeordnete Strassennetz berücksichtigt. Die Antwort auf diese Frage kann nur nach der Durchführung von Modellberechnungen oder im Rahmen von Testanwendungen geliefert werden. In diesem Zusammenhang kommt dem Verkehrsmanagement eine wichtige Rolle zu. Es ist nicht nur wichtig, die Verkehrsinformationen zu verbreiten, sondern auch die Anweisungen dazu. In bestimmten Fällen ist ein Stau auf der Autobahn besser, als wenn gleichzeitig sowohl Autobahn als auch das untergeordnete Strassennetz überfüllt sind.

Die Ausführungen in diesem Abschnitt zeigen, welchen Punkten bei der Beurteilung eines Stauprognosesystems Beachtung geschenkt werden soll, bzw. welche Faktoren einen Einfluss darauf haben. Da eine direkte Schätzung des Nutzens des Stauprognosesystems zur Zeit nicht möglich ist, versuchen wir im nächsten Abschnitt darzustellen, wie gross die Wirkungen sein müssten, damit der Nutzen die voraussehbaren Investitionen und Betriebskosten kompensieren kann.

7.6.2 Stautunden und Staukosten in der Schweiz

Das ASTRA publiziert jährlich einen Bericht zu den Stautunden auf dem Nationalstras-

⁹ Diese Zahlen gehen auf die Antworten von nur 38 Personen zurück (von 600 Befragten), welche die Information zum Stau vor der Abfahrt erhielten. Die Ergebnisse aus dieser sehr kleinen Stichprobe können nur grob die Tendenz zeigen.

sennetz. 2012 wurden knapp **20'000 Staustunden** auf dem Nationalstrassennetz registriert, $\frac{3}{4}$ davon wegen Verkehrsüberlastung.

2007 liess das ARE die Staukosten des Strassenverkehrs in der Schweiz für das Jahr 2005 ermitteln [ARE 2007]. **Die Staukosten summieren sich für 2005 auf 1'100 bis 1'460 Mio. CHF/Jahr¹⁰**, d.h. etwa 3 bis 4 Mio. CHF/Tag. Etwa die Hälfte dieser Kosten geht auf die Autobahnen zurück, der Rest auf das übrige Strassennetz. Die Berechnung der Staukosten setzt die Ermittlung der Fahrzeugstauzeiten voraus, welche sich aus Staulänge, Geschwindigkeitsdifferenz Zustand Freie Fahrt – Zustand Stau, Verkehrsstärke und Staudauer berechnen lassen. Für 2005 wurden 35 Mio. Fahrzeugstauzeiten ermittelt. Die Staukosten betragen somit 2005 gut 41 CHF / Fahrzeugstauzeit¹¹.

Es ist zu beachten, dass die Staustunden auf dem Nationalstrassennetz¹² zwischen 2005 und 2012 um 80% zugenommen haben (vgl. Abbildung 69). Die für das Jahr 2005 ermittelten Staukosten sind somit in der Zwischenzeit vermutlich stark angestiegen.

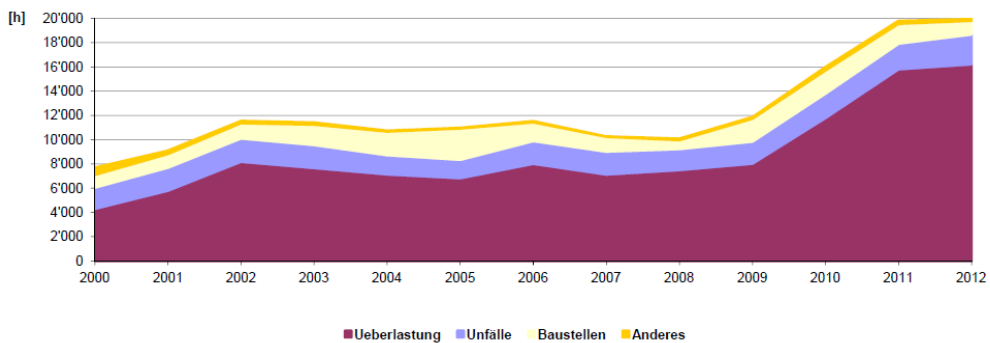


Abbildung 69 Entwicklung der Staustunden 2000 bis 2012

Lassen sich durch ein Stauprognosesystem die **Staukosten** auch um nur **1% reduzieren**, ergeben sich bei einer konservativen Rechnung¹³ jährliche **Einsparungen** in der Grössenordnung **von 10 bis 15 Mio. CHF**.

Ein Beispiel kann helfen, die Zusammenhänge zu veranschaulichen:

- Nehmen wir an, 4'000 Fahrzeuge fahren auf einer Autobahnstrecke (2 km) in den Morgenspitzenstunden durch. Stau bildet sich an 220 Werktagen pro Jahr und dauert jeweils eine Stunde. Die Geschwindigkeit sinkt bei Stau von 100 km/h auf 10 km/h, d.h. die Durchfahrt dauert 12 anstatt 1,2 Minuten. Jeden Tag verlieren 4'000 Fahrzeuge 10,8 Minuten für die Durchfahrt, was 720 Fahrzeugstauzeiten/Tag entspricht. Die Staukosten betragen etwa 6,6 Mio. CHF/Jahr.
- Nehmen wir an, dank einem Stauprognosesystem kann die betroffene Verkehrsmenge um 5% reduziert werden (-200 Fahrzeuge/h, durch zeitliche Verschiebung der Fahrt, durch andere Route etc.) und die Geschwindigkeit um 1 km/h erhöht werden (11 km/h). Die Zeit für die Durchfahrt bei Stau reduziert sich somit um etwa 1 Minute gegenüber dem früheren Zustand. Der Reisezeitverlust sinkt auf 615 Fahrzeugstauzeiten /Tag¹⁴; die Staukosten betragen nur noch 5,6 Mio. CHF, d.h. 1 Mio. CHF weniger als im Referenzfall.

Diese wenigen Zahlen zeigen das hohe volkswirtschaftliche Potential hinter der Reduktion der Staustunden. Auch eine kleine Verbesserung kann zu einem beträchtlichen Nutzen führen.

¹⁰ Der tiefere Wert berücksichtigt die kleinsten Reisezeitverluste nicht.

¹¹ In diesem Betrag sind die Energie-, Unfall- und Energiekosten vereinfacht enthalten.

¹² Für die übrigen Strassen liegen keine aktuellen Daten vor.

¹³ D. h. aufgrund der Staukosten des Jahres 2005.

¹⁴ Vorausgesetzt, dass auf andere Strecken keine zusätzliche Staustunden entstehen.

7.7 Vorschlag für Testanwendungen

7.7.1 Anforderungen

Die Testanwendungen bauen auf dem modularen Ansatz auf und sollten in erster Linie die 1. Etappe des Stauprognosesystems abdecken (siehe Kapitel 6.4). Soweit möglich sollten auch Elemente späterer Etappen einbezogen werden (z.B. Einbezug von Streckendaten, Einbezug weiterer Einflussfaktoren, Einbezug HVS).

An die Testanwendungen für ein Stauprognosesystem werden weiter folgende Anforderungen gestellt:

- Abdeckung typischer Situationen mit Stauphänomenen:
 - Verbindung zwischen Agglomerationsräumen (mit Umleitungsmöglichkeiten auf dem Nationalstrassennetz)
 - Agglomerationssituation (entlang A1, ohne Umleitungsmöglichkeiten auf dem Nationalstrassennetz)
 - Transitsituation mit hohem Anteil Schwerverkehr (entlang A2, mit Umleitungsmöglichkeiten auf dem Nationalstrassennetz)
- Abgrenzbares Gebiet
- Stabile Verhältnisse bezüglich Kapazität (keine bauliche Massnahmen während der Testanwendung, d.h. etwa 2014 - 16)
- Abdeckung der Hauptnutzergruppen Strassenbenützer und Strassenbetreiber
- Verfügbarkeit von Querschnittsdaten (Detektorendichte) und soweit möglich Streckendaten (aus Bluetooth Versuch Wiggertal oder Swisscom)
- Regelmässige Auslösung von VM-Massnahmen
- Begleitende Ermittlung der Qualität, Flexibilität und Zuverlässigkeit der Outputgrössen
- Begleitende Ermittlung des Einflusses der Einflussfaktoren auf die Prognosequalität
- Begleitende Ermittlung der Wirkungen / des Nutzens des Stauprognosesystems
- Organisatorischer Einbezug des ASTRA Verkehrsmanagements und der ASTRA Verkehrsmanagementzentrale (sowie der ASTRA-Filialen, Kantone im Testgebiet).

7.7.2 Testanwendungen

Wir sehen vor, die Testgebiete zusammen mit dem ASTRA und der VMZ-CH festzulegen. Die vorgeschlagenen Testgebiete sind in der nachfolgenden Abbildung 70 dargestellt:

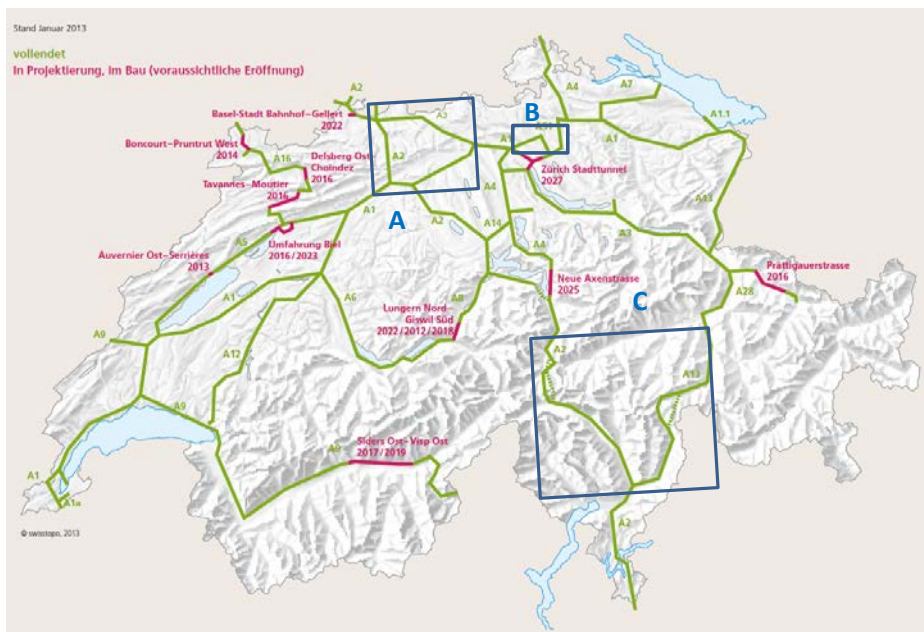


Abbildung 70 Mögliche Gebiete für Testanwendungen

Nachfolgend werden die Testgebiete kurz beschrieben.

Tabelle 48 Verbindung zwischen Agglomerationsräumen A

	Merkmale	Bemerkungen
Lage	Mittelland (Kt. SO, AG, BL)	
Verkehrsnetz	Nationalstrassen A1/A2/A3 (Verzweigungen Birrfeld, Augst, Härkingen, Wiggertal)	
Verkehrssituation	Überlagerung West-Ost und Nord-Süd-Verkehr (inkl. Transit) Regelmässige Stausituation im Raum Belchentunnel und zur Zeit Härkingen-Wiggertal (Ausbau 6 Spuren bis Ende 2014)	
Verkehrsdaten	Detektordaten ASTRA (und ev. Kantone) Streckendaten (aus Bluetooth und Swisscom Versuch)	Historisch und aktuell
VM-Massnahmen	Verkehrsinformation, Wechseltextanzeigen / Wechselwegweisungen, Geschwindigkeitsharmonisierung und Gefahrenwarnungen. Rampenbewirtschaftung und Pannestreifenumnutzung geplant. Diverse Umleitungsmöglichkeiten vorhanden: z. B. Zürich – Bern via A3/A2, Basel – Bern via A3 usw.	
Einflussfaktoren	Verkehr, Wochentag, Ferienkalender (Wetter, Witterung)	
Umfelddaten	Ferienkalender, Wetterprognosen	Historisch und aktuell
Output-Kenngrössen	Reisezeiten, Reisezeitverluste, Verkehrslage/-zustand	

Tabelle 49 Agglomerationsituation B

	Merkmale	Bemerkungen
Lage	Raum Zürich (Kt. ZH)	
Verkehrsnetz	Nordring Zürich	
Verkehrssituation	Überlagerung West-Ost Verkehr mit starkem Pendlerverkehr Regelmässige Stausituation Nordring sowie Zufahrten zur Stadt Zürich (grösster Stauschwerpunkt auf Nationalstrassennetz)	
Verkehrsdaten	Detektordaten ASTRA (und ev. Kantone) Streckendaten	Historisch und aktuell
VM-Massnahmen	Verkehrsinformation, Wechseltextanzeigen / Wechselwegweisungen, Geschwindigkeitsharmonisierung und Gefahrenwarnungen, Rampenbewirtschaftung. Pannestreifenumnutzung geplant. Keine Umleitungsmöglichkeiten auf Nationalstrassennetz	
Einflussfaktoren	Verkehr, Wochentag, Ferienkalender (Wetter, Witterung)	
Umfelddaten	Ferienkalender, Wetterprognosen	Historisch und aktuell
Output-Kenngrössen	Reisezeiten, Reisezeitverluste, Verkehrslage/-zustand	

Tabelle 50 Transitsituation C

	Merkmale	Bemerkungen
Lage	Kantone TI und GR	
Verkehrsnetz	Alpenübergänge Gotthard und S. Bernardino ab Verzweigung Bellinzona (Süd-Nord Richtung)	
Verkehrssituation	Nord-Süd-Verkehr mit hohem Transitanteil und Schwerverkehr	
Verkehrsdaten	Detektordaten ASTRA (und ev. Kantone) Streckendaten	Historisch und aktuell
VM-Massnahmen	Verkehrsinformation, Wechseltextanzeigen / Wechselwegweisungen, Dosiersystem Gotthard. Umleitungsmöglichkeiten auf Nationalstrassennetz vorhanden.	
Einflussfaktoren	Verkehr, Wochentag, Ferienkalender (Wetter, Witterung)	
Umfelddaten	Ferienkalender, Wetterprognosen	Historisch und aktuell
Output-Kenngrössen	Reisezeiten, Reisezeitverluste, Verkehrslage/-zustand	

7.8 Folgerungen

Die Bewertung konnte den Nutzen eines Stauprognosesystems nicht quantifizieren. Aufgrund der vorhandenen Informationen ist es berechtigt zu erwarten, dass ein Stauprognosesystem einen hohen volkswirtschaftlichen Nutzen liefern kann. Die Umsetzung des Projekts und die Qualität der gelieferten Prognosen können entscheidend zum Erfolg / Misserfolg beitragen. Deswegen sind Testanwendungen für eine definitive Beurteilung des Projekts zwingend nötig.

Die Frage nach der besten Variante stellt sich so nicht, da alle Etappen zum gleichen Konzept gehören. Es kann jedoch die Frage nach dem optimalen Endausbau gestellt werden.

Mit den heutigen Informationen ist es schwierig, diese Frage zu beantworten. Es liegen weder Testanwendungen noch genauere Informationen zu den Auswirkungen des Systems vor. Es ist weiter in Erinnerung zu rufen, dass die Etappierung durch die Bedürfnisse, die Datenlage und die Methodik definiert sind. So kann zur Zeit nur Etappe 1 realisiert werden. Die Testanwendungen sind auf diese Etappe ausgerichtet (vgl. nächsten Abschnitt).

Im Kapitel 7.3 konnten wir zeigen, dass auch Ausbautappe 4 nicht alle Anforderungen abdecken kann. So wäre es naheliegend zu folgern, dass alle Etappen realisiert werden müssen. Die Frage lautet, ob wirklich alle Anforderungen abzudecken sind.

Der modulare Aufbau zwingt jedoch nicht schon jetzt zu einer Entscheidung, wie der Endausbau aussehen soll. Man kann eben etappenweise vorgehen und aufgrund der Ergebnisse jeder Etappe entscheiden, ob eine zusätzliche Etappe Sinn macht.

Es bestehen verschiedene Möglichkeiten von Testanwendungen, welche in Zusammenarbeit mit dem ASTRA und den Kantonen zu konkretisieren sind.

8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

8.1 Schlussfolgerungen

Das Projekt hatte im Wesentlichen zum Ziel den State of the Art von Stauprognoseverfahren und –systemen aufzuzeigen, die Anforderungen an ein Stauprognosesystem zu identifizieren, die massgebenden Einflussfaktoren herzuleiten, den Datenbedarf und die Dateneignung für ein Stauprognosesystem zu analysieren, die Eignung von verschiedenen Algorithmen für eine Stauprognose zu untersuchen sowie ein Systemkonzept zu erarbeiten und zu beurteilen.

Die Untersuchung hat zu den oben angesprochenen Themen zahlreiche neue Erkenntnisse gebracht und die Zweck- und Machbarkeit eines Stauprognosesystems in der Schweiz grundsätzlich bestätigt. Die Untersuchung hat unter anderem gezeigt, dass

- heute für die Schweiz **ein verlässliches Stauprognosesystem, welches den Strassenbetreibern und Strassenbenützern die notwendige Unterstützung** für ein zweckmässiges Verkehrsmanagement und eine sinnvolle Reiseplanung bietet, fehlt. Bestehende Verkehrsinformationssysteme in der Schweiz beschränken sich weitgehend auf die Darstellung der aktuellen oder historischen Verkehrslagen, welche in die Zukunft extrapoliert werden.
- verlässliche Stauprognoseverfahren und –systeme **das Verkehrsmanagement auf National- und Hauptverkehrsstrassen unterstützen und nachhaltig verbessern** können.
- Stauprognoseverfahren und –systeme ein hohes volkswirtschaftliches Potential für eine Reduktion der Stautunden aufweisen. Lassen sich durch ein Stauprognosesystem **die Staukosten auch um nur 1% reduzieren**, ergeben sich bei einer konservativen Rechnung auf Basis der Zahlen aus 2005 in der Schweiz **jährliche Einsparungen in der Grössenordnung von 10 bis 15 Mio. CHF**. Aufgrund der weiteren Zunahme der Stautunden dürften die Einsparungen heute deutlich höher sein.
- es zahlreiche **verschiedene simulationsbasierte und statistische Stauprognoseverfahren** gibt, die vielversprechend sind, aber den Weg in den praktischen Einsatz noch nicht gefunden haben.
- die untersuchten Stauprognosesysteme grundsätzlich auch in der Schweiz anwendbar wären. Die „**grossen Anbieter**“ von Stauprognosesystemen verfügen über **Standardprodukte**, die weit verbreitet sind und welche die **aktuelle Verkehrslage gut abdecken**. Im Vordergrund steht die Verkehrsinformation und nicht die Nutzung für das Verkehrsmanagement. **Defizite** bestehen jedoch **bei der Prognosefähigkeit** und in der **Anpassungsfähigkeit an spezifische lokale Rahmenbedingungen** in der Schweiz. Die verwendeten Prognoseverfahren und –methoden und die berücksichtigten Einflussgrössen für die Prognosen sind meist eine „Black Box“. Die „**kleinen Anbieter**“ stellen eher ein wissenschaftlich abgesichertes und hoch qualitatives Prognoseverfahren in den Vordergrund, welches eine gute Übereinstimmung von Prognosewerten mit effektiven Messwerten erreicht. Eine **Berücksichtigung von speziellen lokalen Rahmenbedingungen** scheint eher gegeben. Aufgrund der eher besseren Qualität der Prognosegrössen erscheint auch eine Nutzung dieser Systeme für das Verkehrsmanagement erfolgversprechender.
- seitens der Strassenbenützer als auch seitens der Strassenbetreiber **ein Bedürfnis nach einem Stauprognosesystem besteht**; insbesondere für die Verbesserung der Verkehrsinformation, des Verkehrsmanagements und der Reise- und Routenplanung.
- die Anforderungen an ein Stauprognosesystem hoch sind; insbesondere hinsichtlich Qualität der Output-Kenngrössen, räumlicher Abdeckung, Aktualisierung und Integration in bestehende Datenerfassungs- und Verkehrsmanagementssysteme.
- eine Kombination von statistischen und simulationsgestützten Prognoseverfahren am vielversprechendsten ist. Für **mittel- und langfristige Prognosen** wird der aktuelle lokale Verkehrszustand immer weniger relevant. Daher wird für längere Prognosehorizonte der Einbezug von Methoden, die aufgrund **historischer Daten** das Muster der Verkehrslage erkennen und erfassen, entscheidend. Ein **Einbezug**

- möglichst vieler **externer Faktoren** kann zu grossem Datenbedarf führen und die Prognosen unter Umständen sogar verschlechtern. Es ist daher empfehlenswert, auf wenige relevante Einflussfaktoren zu fokussieren.
- die Verfügbarkeit und der Zugang zu den Verkehrs- und Umfelddaten ein zentraler Faktor ist und dass die laufenden Bestrebungen zur Verbesserung der Querschnitts- und Streckendaten den Einsatz und die Qualität von Stauprognosesystemen unterstützen. Bei der Verwendung von Inputdaten für ein Stauprognosesystem sind zahlreiche **Risiken** zu beachten (Ungenügende Datenqualität, falsche Daten, keine Datenlieferung infolge Ausfall, verspätete Datenlieferung etc.), welche die Qualität der Outputkenngrössen reduzieren. Durch Kontrollroutinen sollten diese Risiken möglichst minimiert werden.
 - das vorgeschlagene Systemkonzept die unterschiedlichen technischen Möglichkeiten, Bedürfnisse und Entwicklungsunsicherheiten berücksichtigt, ein modulartige Architektur aufweist und 4 Ausbautetappen des Systems vorsieht. Insbesondere wurde darauf geachtet, dass die erste Etappe gewisse Mindestanforderungen abdeckt und dass die Voraussetzungen für einen Testbetrieb (Verfügbarkeit von Daten und Methodik) gegeben sind. Die weiteren Etappen decken sinnvolle mögliche Ausbaustufen ab. Die Einbindung des Stauprognosesystems in die ASTRA-Systemlandschaft soll in Form einer **eigenständigen Fachapplikation** erfolgen. Dafür stehen drei Integrationsvarianten mit variierendem Autonomiegrad der Fachapplikation zur Diskussion. Das vorgeschlagene Systemkonzept erscheint funktionsfähig und machbar.
 - die Beurteilung der Systemkonzeptvarianten grundsätzlich positiv ausfällt. Die **Etappe 1** erlaubt die Erreichung der **Mindestanforderungen** mit einem relativ **kleinen Aufwand** und einer überschaubaren Komplexität. **Etappe 2** ist etwas teurer und komplexer, erlaubt aber insbesondere beim Teilkriterium „Abdeckung Verkehrsdaten“ mit der Berücksichtigung von Streckendaten (Floating Car Data / Floating Phone Data) einen grossen Sprung nach vorne. Die nächsten Etappen bringen bezüglich dieses Teilkriteriums keinen weiteren Vorteil mehr mit sich. Bei den externen Faktoren ist mit der Berücksichtigung von Wetter, Baustellen und Ferienkalender Ausland auch ein grosser Fortschritt gegenüber Etappe 1 zu registrieren. **Etappe 3** ist noch etwas teurer und komplexer als Etappe 2, führt aber zu wichtigen Fortschritten bezüglich der Teilkriterien Prognosekenngrössen (direkte Prognose der Staulänge und der Staudauer) und Abdeckung Strassenklassen (kantonale HLS/HVS vollständig abgedeckt). **Etappe 4** bringt gegenüber Etappe 3 deutliche Fortschritte bezüglich der Anwendungszwecke (Rerouting, automatisierte Schnittstelle für VM-Massnahmen usw.), der Prognosekenngrössen (Berechnung Staulängen und Staudauer mittels Simulationen) und der Berücksichtigung der externen Faktoren (Unfälle / Störungen, automatisierte Schnittstelle zu VM-Massnahmen) mit sich.
 - beim vorgeschlagenen Stauprognosesystem Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken zu beachten sind. Die **Schwächen der ersten Etappe** sind: nicht alle Anwendungszwecke abgedeckt; geringe räumliche Auflösung da nur Querschnittsdaten berücksichtigt werden; nur abgeleitete Prognosen mit beschränkter Qualität; kantonale HLS/HVS nur teilweise abgedeckt. Gegenüber der ersten Etappe bietet die **vierte Etappe bei den Stärken eine Reihe von Vorteilen / zusätzlichen Funktionalitäten** (bessere Auflösung dank Nutzung von Streckendaten, Berücksichtigung aller relevanten externen Faktoren, Verbesserung Prognosequalität). Zu den **Schwächen der 4. Etappe** gehört der hohe Aufwand für den Aufbau und Betrieb des Systems und insbesondere die heute noch eingeschränkte Umsetzbarkeit. Die **Chancen** eines Stauprognosesystems liegen einerseits beim Problemdruck, der voraussichtlich hoch bleiben bzw. sich verschärfen wird. Die technologische Entwicklung wird das Projekt sowohl beim Systeminput als auch bei der Nutzung des Systemoutputs unterstützen. Die Flexibilisierung der Arbeitszeiten und der erhöhte Bedarf nach Informationen zur Optimierung des Zeitmanagements sind weitere Faktoren, welche die Entwicklung eines Stauprognosesystems begünstigen werden. Die **Risiken** liegen bei den knappen Ressourcen (personell / finanziell), bei möglichen Ziel- bzw. Interessenkonflikten und bei der Akzeptanz. Bei fehlenden Alternativen, sei es bezüglich Routen/Verkehrsmittel, sei es bezüglich Abfahrtszeiten, reduziert sich der Nutzen des Stauprognosesystems. Diese sind bei einer weiteren Vertiefung zu berücksichtigen.

8.2 Forschungsbedarf

Im Rahmen des Projektes wurden weitere Forschungslücken identifiziert. Diese können grob unterteilt werden in

- notwendige Entwicklungsarbeiten bei Algorithmen
- datenabhängige Abklärungen, die erst im Rahmen eines Testbetriebs erfolgen können
- vertiefende Abklärungen in Bezug auf die Wirkung des Systems

Forschungsbedarf besteht vor allem in folgenden Bereichen:

- Die identifizierten Bedürfnisse und Anforderungen der Strassenbenützer und Strassenbetreiber sollten anhand eines grösseren Samples von Strassenbenützern und Strassenbetreibern konkretisiert und verifiziert werden.
- Im Rahmen eines Testbetriebs sind verschiedene Verkehrsdatenquellen (Querschnitts- und Streckendaten) als Inputdaten zu prüfen und deren Eignung zu beurteilen. Dabei sind auch die Risiken hinsichtlich der Prognosequalität genauer zu quantifizieren.
- Im Rahmen eines Testbetriebs sind mittels entsprechender Begleituntersuchungen die Prognosefähigkeit, die Qualität (statistische Güte, Abbildungstiefe etc.), die Flexibilität (bezogen auf die Inputdaten, Erweiterung etc.) und die Zuverlässigkeit/Stabilität des Systemkonzeptes mit verschiedenen Ausprägungen zu ermitteln.
- Als Grundlage für die quantitative Bewertung des Stauprognosesystems sind die Wirkungen auf die Verkehrsteilnehmer (zum Beispiel Wirkungen der Stauinformation auf das Verkehrsverhalten) und die Betreiber für verschiedene Netzkonfigurationen und verwendete Kommunikationskanäle näher zu analysieren. Dies könnte mittels Simulationen, Fahrsimulatoren und im Rahmen von Begleituntersuchungen zum Testbetrieb erfolgen.
- Insbesondere treten Rückkoppelungseffekte zwischen Verkehrsaufkommen und Verkehrsprognose auf, wenn die Verkehrsteilnehmenden ihr Verhalten aufgrund der Prognose (wie allenfalls erwünscht) anpassen und dadurch die ursprüngliche Prognose ihre Gültigkeit verliert. Die vorgeschlagenen lernfähigen Methoden können diese Selbst-Modifikation der Prognose berücksichtigen, wenn die Reaktion der Verkehrsteilnehmenden bei ähnlichen Prognosen jeweils einem ähnlichen Muster folgt. Das Ausmass und die Auswirkung von Rückkopplungseffekten verursacht durch prognosebedingte Verhaltensänderungen der Strassenbenützer sind allerdings offene Forschungspunkte. Insbesondere ist unklar, unter welchen Bedingungen die Prognosen die erwünschte Wirkung optimal erreichen. Allenfalls müssen gewisse Informationen mit Vorteil zurückgehalten werden, um ein Übersteuern des Systems zu verhindern. Weiter ist offen, in welchen Situationen aufgrund der Prognosen neue und gegebenenfalls erwünschte stabile Gleichgewichtszustände erreicht werden oder wann allenfalls Schwingungszustände zwischen Verkehrsaufkommen und Verkehrsprognose auftreten. Die Fragen können empirisch zum Teil in einem Testbetrieb des Systems adressiert werden. Für ein allgemeines Systemverständnis der Effekte wäre aber unter Umständen auch eine Simulationsstudie nützlich, die es erlauben würde, Szenarien des Verhaltens aufzuzeigen.
- In Zusammenhang mit den unterschiedlichen Prognosemethodiken, die in späteren Ausbaustufen realisiert werden sollen, gibt es zum Teil noch Forschungs- bzw. Entwicklungsbedarf, da die Methoden zum Teil noch nie in real funktionierenden Systemen eingesetzt wurden. Dies betrifft insbesondere
 - die Methodik der direkten Reisezeitprognose aufgrund von Streckendaten (FCD/FPD) (Etappe 2)
 - die Methodik zur Klassifikation von Staulängen und Staudauer (Etappe 3)
 - die Methodik des dynamischen prognosebasierten Reroutings für die individuelle Routenoptimierung (Etappe 3)
 - die Kalibrierung von simulationsbasierten Prognosen in Echtzeit (Etappe 4).

8.3 Empfehlungen

Aus dem Projekt lassen sich folgende Empfehlungen für den Einsatz eines Stauprognose-systems in der Schweiz ableiten:

- Es ist empfehlenswert, ein **Stauprognosesystem umzusetzen**. Angesichts der sehr hohen volkswirtschaftlichen Staukosten ist mit einem positiven Nutzen – Kosten – Verhältnis zu rechnen.
- Die Entwicklung eines **massgeschneiderten Systems für die Schweiz** erlaubt eine optimale Berücksichtigung der lokalen Verhältnisse als Vorteil gegenüber Standard-lösungen von internationalen Systemanbietern.
- Für das Systemkonzept empfiehlt sich ein **modulbasierter Ansatz mit ver-schiedenen Ausbaustufen**. Dadurch kann einerseits schnell ein zwar rudimen-täres, aber funktionierendes System realisiert werden und andererseits besteht für den Systemausbau eine Risikokontrolle bei grösstmöglicher Flexibilität. Der Modul-ansatz erlaubt es insbesondere, zur Zeit noch nicht erprobte oder bekannte Prognose-methoden zu einem späteren Zeitpunkt ins System zu integrieren.
- Von zentraler Bedeutung für ein Stauprognosesystem ist die **Datenverfügbarkeit**. Dies gilt für Verkehrs- und Umfelddaten, sowie für historische, aktuelle und künftige Daten. Die laufenden Anstrengungen zur Verbesserung der Verkehrsdatenerfassung sind zu intensivieren und noch stärker auf die Anforderungen eines Stauprognose-systems auszurichten.
- Die **Testanwendungen** bauen auf dem modularen Ansatz auf und sollten in erster Linie die 1. Etappe des Stauprognosesystems abdecken. Soweit möglich sollten auch Elemente späterer Etappen einbezogen werden (z.B. Einbezug von Streckendaten, Einbezug weiterer Einflussfaktoren, Einbezug HVS). Es bestehen verschiedene Möglichkeiten von Testanwendungen, welche in Zusammenarbeit mit dem ASTRA und den Kantonen zu konkretisieren sind.
- Die **Forschungslücken** sollten mit Anschlussprojekten und einem Testbetrieb **geschlossen werden**.

Anhänge

I	Anhänge State-of-the Art Stauprognoseverfahren und –systeme (Kapitel 2)	215
I.1	Ausführungen zu simulationsbasierten Methoden aus Kapitel 2.2.3	215
I.1.1	Submicro- and Microsimulations	215
I.1.2	Mesoscopic and Macroscopic Models	216
I.1.3	Running-queue models / hybrid simulators.....	217
I.2	Ausführungen zu statistischen Methoden aus Kapitel 2.2.4	218
I.2.1	Heuristic models.....	218
I.2.2	Historical averages.....	218
I.2.3	Random walk.....	218
I.2.4	Exponential Smoothing	219
I.2.5	Gaussian Maximum Likelihood	219
I.2.6	Parametric models/Time series analysis	219
I.2.7	General means of time series analysis	220
I.2.8	Traffic flow as ARIMA time series	220
I.3	Analyse- und Beurteilungsraster.....	227
I.3.1	Analyse- und Beurteilungsraster für Stauprognoseverfahren.....	227
I.3.2	Analyse- und Beurteilungsraster für Stauprognosesysteme.....	229
I.4	Tabellarische Übersicht Stauprognosesysteme.....	234
II	Anhänge Bedürfnisanalyse (Kapitel 3)	238
II.1	Interviewleitfaden Strassenbenbetreiber.....	238
II.2	Interviewleitfaden Strassenbenutzer	246
III	Anhänge Prognoseverfahren und Prognosevariablen (Kapitel 4).....	251
III.1	Traffic Data from Detectors (Kapitel 4.2)	251
III.1.1	Preprocessing Traffic Data from Detectors.....	251
III.1.2	Properties of single Detector Traffic Data	254
III.2	Multivariate Properties of Traffic Data (Kapitel 4.3).....	257
III.2.1	Clustering and Classification: Pattern Matching Methods	257
III.2.2	Influence of Weather	261
III.2.3	Methods to Detect Correlations and Causalities in (Traffic) Time Series	263
III.3	General Forecast Strategies and Quality (Kapitel 4.4)	267
III.3.1	Forecast Quantities	267
III.3.2	Concepts of Forecasting Traffic	269
III.3.3	Measures of Forecast Quality	271
III.4	Forecasting Univariate Time Series Models (Kapitel 4.5)	275
III.4.1	Simple Methods: Daily Average Forecast.....	275
III.4.2	Simple Methods: Pattern Forecast.....	275
III.4.3	Simple Methods: Moving Average	275
III.4.4	Simple Methods: Exponential Smoothing	276
III.4.5	ARMA	278
III.5	Univariate Model for Varying Forecast Horizons (Kapitel 4.6)	281
III.5.1	Varying Forecast Horizon: Seasonal ARIMA Model (SARIMA).....	281
III.6	Multivariate (linear) Time Series Models (Kapitel 4.7)	283
III.6.1	AR(I)MAX	283
III.6.2	Vector ARIMA.....	285
III.6.3	State Space Models	285
III.7	Travel Time Prediction with Neural Networks – Procedure (Kapitel 4.8)	286
IV	Anhänge Datenverfügbarkeit und –bereitstellung (Kapitel 5).....	291
IV.1	Datenerfassungssystembeschreibungs- und -beurteilungsblatt (Vorlage).....	291
V	Anhänge Systemkonzept für Verkehrs- und Stauprognosesystem (Kapitel 6).....	294
V.1	Rechenzeit und Speicherbedarf – Abschätzung für Maximalausbau.....	294
V.2	Resultate Basisprognose an einem Beispiel	296
V.3	Ausfallsicherheit des Systems	299
V.4	Datenbank-Varianten	301

VI	Anhänge Beurteilung Konzept Verkehrs- und Stauprognosesystem (Kapitel 7)...	306
VI.1	Beurteilungsraster für das Systemkonzept und Mindestanforderungen	306
VI.2	Beurteilungsblätter	307

I Anhänge State-of-the Art Stauprognoseverfahren und –systeme (Kapitel 2)

I.1 Ausführungen zu simulationsbasierten Methoden aus Kapitel 2.2.3

Essentially four subcategories of simulation methods exist, and they are commonly categorized according to the level of detail how traffic is simulated.

I.1.1 Submicro- and Microsimulations

Submicro- and microsimulation model traffic at the level of individual cars and their interaction, or even at the level of behavioral patterns of individual drivers. That means that in such simulations each individual car is simulated as an independent entity that follows a set of rules. Historically, a main topic of research in this field was the reproduction of well-known traffic phenomena such as shockwave propagation as well as jam emergence and dissolution. Nowadays, microsimulations are able to reproduce and forecast traffic jams with relatively high accuracy. They are increasingly often used to simulate new road network or to try out different signalization scenarios. The proposed methods in this field can be classified according to the model used for the interaction between the cars and the rules each car follows:

- **Car-follower models:** Originally invented by Reuschel [*Reuschel, 1950*] and Pipes [*Pipes, 1953*], the main idea of these models is that the distance to the car in front should be proportional to the current velocity. These models are further split into longitudinal models, where the dynamics of acceleration and deceleration are modeled, and lane-switching models, where rules for changing lanes are included. Most current simulation software is based on a combination of longitudinal and switching models to accurately reproduce the driving behavior. A relatively new and promising model of this type is the intelligent driver model (IDM, see, e.g. [*Treiber, 2010*]), which is characterized by an acceleration equation of the form

$$\dot{v} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \delta v)}{s} \right)^2 \right]$$

in which a is the acceleration, v_0 the target speed and s^* the target distance to the car in front. When calibrated to existing data, the IDM is able to well reproduce various fundamental diagrams. Since car follower models are characterized by coupled differential equations, they allow arbitrary spatial and temporal resolution. For their realistic simulation, however, the underlying differential equations have to be discretized in space and time. To minimize computational cost, typically the largest time step ensuring stability of the time integration routine is chosen.

- **Cellular automata:** Cellular automata (CA) describe the dynamics of traffic by a typically small set of discrete spatial and temporal variables. Space is discretized into a lattice of cells, where each cell can either be occupied by a car or empty at a given instance in time. Similar to iterated maps, time is incremented by a fixed amount Δt . Cellular automata models are often used as an efficient way to discretize car follower models. In addition, they typically include a stochastic term to model variability of individual driver's behavior. A well-known CA of this type is the Nagel-Schreckenberg model [*Nagel, 1992*], which includes a discrete equation for the update of the velocity similar to the IDM, but features a random delay term that affects how fast the velocity v_α of vehicle α is adapted to the target speed:

$$v_\alpha(t+1) = \begin{cases} \max(v_\alpha^*(t+1) - 1, 0) & \text{with probability } p \\ v_\alpha^*(t+1) & \text{otherwise} \end{cases}$$

In the above equation, v_α^* is the deterministic velocity for the next time step, which follows a similar law as the IDM. The Nagel-Schreckenberg model is employed in the freely available Transims traffic simulator. In an ETH study, researchers were able to

simulate the entire highway network of Switzerland with Transims [Raney, 2002]. According to the report, current computers are able to simulate the traffic situation in real time, and are even fast enough to make short-term prognoses. Transims is also used successfully for the traffic forecast in the Northrhine Westfalia, Germany, highway network. According to user feedback, the predictions are highly accurate – this is to be expected from a simulation that is well-calibrated to input data.

A similar way of discretizing driver models lies in the concept of coupled map lattices. Their usage for traffic simulations is, however, not very widespread and we therefore refrain from a separate discussion of these methods.

From the above description, it is clear that car follower models are continuous in space, time and velocity, whereas the same quantities are of discrete nature in cellular automata. Consequently, CAs offer conceptually simpler and easier numerical implementations than the continuous models. Often, CA have a performance advantage over car follower models, in particular when traffic on multiple lanes has to be simulated [Treiber, 2010]. On the downpart, however, the model parameters in CAs typically do not have a practical meaning or take on unrealistic values due to the discretization scheme. Furthermore, without the addition of the stochastic term, the individual cars show a behavior with low robustness towards modification of the model parameters or initial conditions. Their use for traffic simulation is therefore limited to those applications, where the quantities of interest are of a more macroscopic nature. Therefore, CAs are well-applicable (and in fact are used) for large-scale traffic prognosis, but not, e.g., for the simulation of signalization optimization at road crossings.

I.1.2 Mesoscopic and Macroscopic Models

Microsimulation approaches are considering single cars. Though this is a physically intuitive approach, it rapidly grows too costly for computation as the number of cars increases (for example, see [Raney, 2002] for computation to processor speed). Mesoscopic models trade a reduction in computation cost against increasing mathematical complexity. They concatenate single cars into groups of cars and describe the motion of a single car within such a group statistically. Instead of simulating a single car with its specific velocity (like in the microscopic models), the focus now lies on a group of cars, where the velocities of the single cars are not explicitly given, but follow some (to be determined) statistical distribution. This is illustrated in Abbildung (Anhang) 1.

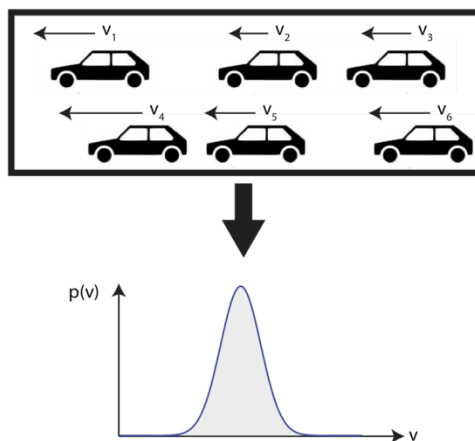


Abbildung (Anhang) 1 Mesoscopic models: From single cars with velocities v_i to velocity distribution functions $p(v)$

The statistical distribution, call it “ f ” describes the velocity structure (“ v ”) within the groups of cars. Its shape is determined through physically motivated ideas from the microscopic single car viewpoint. The mesoscopic statistical distribution evolves within time (“ t ”) and changes in space (“ x ”) according to a partial differential equation such as the one given below. This equation consists of a transport term (the car movements without interactions, on the left of the equality sign) and an interaction term (derived from a microscopic

car following model),

$$\partial_t f(x, t, v) + v \cdot \partial_x f(x, t, v) = \text{Interaction}[f, x, t](v).$$

Even though the computational complexity is reduced in the mesoscopic approach as compared to single car simulations, the mesoscopic models are typically not directly used. Their main purpose is to derive an even more coarse class of models, the macroscopic models. There, the statistical distribution “ f ”, describing a group of cars is not resolved, but just used as a mathematical basis to derive another set of partial differential equations, so called conservation laws or flow equations. These macroscopic equations describe the flow of cars, mainly in terms of car densities and car velocity fields (varying in space and time). For an illustration, see Abbildung (Anhang) 2.

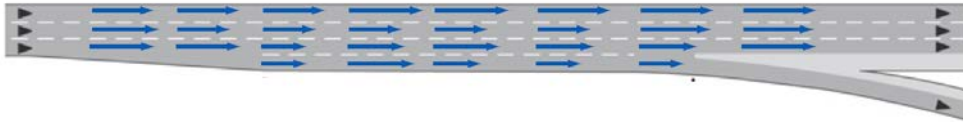


Abbildung (Anhang) 2 Illustration of the macroscopic car velocity field on a highway segment.

These quantities will not depend on the velocity structures (“ v ”), but on space (“ x ”) and time (“ t ”) only.

Also in this step, computational cost can be saved in trade of increasing (but still well manageable) mathematical complexity. Physically, the macroscopic model corresponds to the same class of equations used to describe fluid and gaseous flows, however with different interactions terms, since car drivers behave differently than gas molecules (but the similarities are conceptionally striking) [Helbing, 2001]. Among this class of models is the famous Lighthill-Whitham-Richards model (LWR model), which relates traffic density ρ and flow Q_e in an equation of the form

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{dQ_e(\rho)}{d\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$$

The LWR model is rarely used in practical applications, but has seen numerous modifications in the past few decades. The modifications essentially try to balance model accuracy with computational complexity of the equations. To be more precise, in each of the model simplifications (microscopic to mesoscopic, mesoscopic to macroscopic), information is lost and with it the model accuracy decreases. One aim of past and present research in traffic modeling, as well as in corresponding physical fields (gas dynamics) is to optimize the trade-off between computational efficiency and model accuracy. With crude simplifications, the models will eventually exhibit behavior that is unrealistic, or will not resolve interesting effects. For a long time, macroscopic models have been in severe criticism concerning this problem (see [Daganzo, 1995]). The simple ones, operating only with car density (so called first order models such as the LWR model), are not precise enough for practical applications. More complicated ones, involving car density, car momentum or more variables (so called second or higher order models) produce effects that are not observed in reality. More recent publications overcome (parts of) these problems, inspired from ideas in fluid dynamics (see [Luspay, 2010; G. Liu, 1998]).

I.1.3 Running-queue models / hybrid simulators

The term “mesoscopic” is also used in less physically strict way for methods where ideas from micro- and macrosimulations are combined in a hybrid model. Among these methods, which are typically used in simulation packages for speed reasons, is DYNASMART [Mahmassani, 1998; Noh, 2009] and DynaMIT [Ben-Akiva, 1998; Park, 2008]. In both, individual cars are modeled, but on a macroscopic level using simplified flow dynamics. To separate free flowing traffic from congested parts, every road link is split into a so-called running part and a queue part. The running part is the part of the link where vehicles are not yet delayed by the queue spillback at the downstream node. For more information about this model we refer to the book “Fundamentals of Traffic Simulation” [Barcelo, 2010]. A similar idea could in principle also be applied to the Swiss highway

network. A typical problem faced in such situations is that the traffic situation depends sensitively on the in- and outflow conditions via the highway ramps. A possible solution could therefore be to use a hybrid approach where the ramps are simulated using microsimulation, while the highway network employs simplified flow dynamics as long as no congested segments exist.

Conceptually interesting is the approach of the software package AIMSUN [Ratrouf, 2009; Barcelo, 2010] which is a hybrid (or better: multiresolution) simulation of traffic on all length scales, the microscopic, the mesoscopic and the macroscopic – depending on the level of detail that is needed. For the mesoscopic model, AIMSUN does not integrate the model equations in time as typical simulators do, but follows a discrete event-driven scheme known, e.g. from logistics or granular media simulations: Here, the simulation clock moves between discrete events and there is no fixed time slice. An event could be a change in the number of vehicles on the network, a change in the status of traffic signals etc. Events can be scheduled (known in advance to occur at a particular time) or conditional (added to the event list dynamically during the simulation whenever some logical condition is satisfied). These events model the vehicle movements by using a simplification of the car-following, lane-changing models used in the microscopic simulator. A similar, multi-resolution software simulator well-known in Europe is VISSIM (<http://www.vissim.de>). Originally developed for in-town traffic simulation, it includes submicroscopic behavior modeling and includes the simulation of individual pedestrians, and interaction with the public transportation network (bus, train, tram etc.). In [Xiao, 2005] a qualitative analysis is given, showing that AIMSUN and VISSIM score similarly well for the prognosis of highway traffic conditions.

I.2 Ausführungen zu statistischen Methoden aus Kapitel 2.2.4

We will first review some rather “heuristic” methods, which have been in wide use, but are proven inappropriate in many situations for short term traffic flow predictions in realistic circumstances. Then we will discuss time series models for traffic forecast (ARIMA, GARCH), and their multivariate extensions. Finally, we will review non-parametric techniques (non-parametric regression), where a focus will be on neural networks.

I.2.1 Heuristic models

Most heuristic models are easy to implement, which is a clear advantage. They provide a first stage, crude prognosis based on past data. As such they can be used, but it becomes clear just from their simplicity that an accurate prognosis in a dynamic process is impossible.

I.2.2 Historical averages

The simplest way of “prediction” is historical averages

$$p_t = \frac{1}{n} (x_{t-1\text{year}} + x_{t-2\text{years}} + \dots + x_{t-n\text{years}}).$$

The prediction value p_t is just an average of the past values $x_{(t-\dots)}$. This method can (theoretically) be applied for any time interval (years, minutes etc.) and could be extended to a weighted average, by giving more weights to observations in the recent past. It may offer a first (and sometimes best) guess for long-term predictions, e.g. for some average traffic to be expected in one year, if there are many yet unknown influences.

I.2.3 Random walk

If there is a repeating traffic pattern, e.g. of period 365 time steps, one could think of the following model:

$$p_t = x_{t-1} + x_{t-365} - x_{t-364} + \varepsilon_t.$$

The increment $p_t - x_{(t-1)}$ is just the increment from the last observation with the same pattern, $x_{(t-365)} - x_{(t-364)}$ combined with some random change ε_t , which could be normally distributed (with mean value 0 and some variance). This is a simple special case of a (seasonal) ARIMA time series model. Such a random walk model could be considered for

long term predictions of e.g. daily traffic flow averages, but due to its simplicity not for precise short term forecasts. Often, random walk models are used as benchmarks for other models, which however is not a recommendable measure for quality. More information on random walk models can be found e.g. in [Ghosh, 2004]

I.2.4 Exponential Smoothing

Another very popular, fast, easy and crude way of prediction from time series data is exponential smoothing. There, the idea is that the recent observations are getting more weight than those in the far past (α being a parameter between 0 and 1):

$$y_t = \alpha[x_{t-1} + (1-\alpha)x_{t-2} + (1-\alpha)^2x_{t-3} + \dots] + (1-\alpha)^{t-1}x_0 = \alpha x_{t-1} + (1-\alpha)p_{t-1}$$

Also this model is a special case of the ARIMA class models and as such offers a reasonable first guess. It could be again applied for long term predictions, where a precise estimate is conceptionally impossible. Exponential smoothing was proposed in [de Rham et al. 2007] mainly because of its simplicity, not because of its quality and is typically used for data preprocessing. There are ways of improving exponential smoothing, see e.g. [Z. Li, 2008b].

I.2.5 Gaussian Maximum Likelihood

Gaussian maximum likelihood “estimates” the current traffic flow from past flow data and flow increments. Simple empirical means and standard deviations are used for that. This method is often used as a simple but rather poor benchmark. There are ideas of how to improve the method, but given the strong assumptions of normality in the data (typically traffic flow data will not be normally distributed due to many irregular situations), such attempts seem not very promising for the general purpose of traffic forecast. For details, see e.g. [Lin, 2001].

I.2.6 Parametric models/Time series analysis

The following models try to fit a structure with many parameters to given data. This fit can be done with various strategies. Typically, some maximum likelihood or least squares techniques are used for non-adaptive settings. There are possibilities to adapt the estimated model parameters to new data (e.g. Kalman filtering). Such adaptivity is crucial if data evolves to new patterns over time.

Statistically, traffic flow data are time series. There is a plethora of methods to analyse time series, starting from very simple (“heuristic”) techniques to mathematically sophisticated transforms to reveal “hidden” structures. We will overview the techniques and models concerning time series analysis, with a main focus on ARIMA and related models.

Generally, the idea will always be to massage time series data till it reveals interesting and forecast relevant structural properties. Concrete technical implementations are not (yet) part of this analysis.

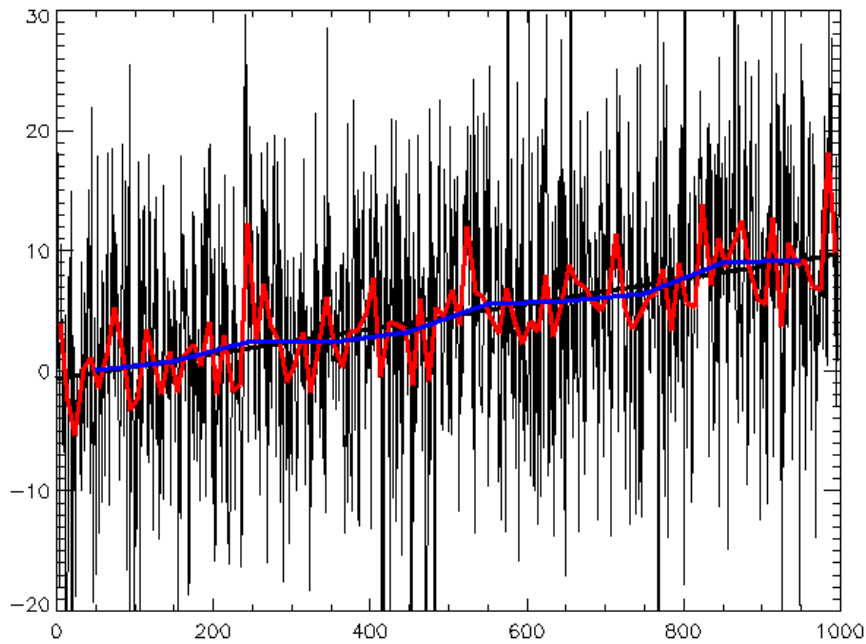


Abbildung (Anhang) 3 Time series (black) after some filtering (red), with trend line.

I.2.7 General means of time series analysis

The general aim is to structure seemingly chaotic data into manageable information. Very interesting are trend lines, possibly periodic underlying patterns, and correlation. The typical workflow is to start with given time series data, to identify trends and seasonality (through differencing) and then to analyse the autocorrelation function (by means of Fourier- or general wavelet analysis) to obtain a white noise process that lies on top of structural components [Brockwell, 2002]. A common method to reveal hidden patterns in a time series is Fourier (or state space) analysis. This is often praised as a powerful and complex mathematical tool. This is true for the case when the (random) fluctuations in a time series clearly separate (frequency wise) from the underlying pattern. Realistically, this is not the case for traffic flow data. In this case, more sophisticated wavelet methods need to be used.

I.2.8 Traffic flow as ARIMA time series

A class of broadly and successfully applied models in time series analysis are ARMA(p,q) processes,

$$y_t = a_1 x_{t-1} + \dots + a_p x_{t-p} + b_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + b_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t.$$

They consist of an autoregressive part, using p values from the past, $x_{(t-1)}, \dots, x_{(t-p)}$, combined with $q+1$ values of (identically normally distributed) random variables $[\varepsilon_t, \varepsilon_{(t-1)}, \dots, \varepsilon_{(t-q)}]$. The parameters $a_1, \dots, a_q, b_1, \dots, b_p$ have to be estimated from the data. In this form, the model is useless for traffic flow prediction, since it does not consider typical periodic patterns. In order to deal with these patterns, the model is extended to a SARI-MA(p,d,q)(P,D,Q)_S model, standing for seasonal autoregressive integrated moving average. This is a process on two (time) scales. It has a seasonal component (repeated with period S , e.g. one week in Abbildung (Anhang) 4.) with P seasonal autoregressive parts and Q moving average contributions. D and d stand for the differencing order, typically $D=d=1$, meaning that the differences between two times are modeled instead of the effective values. The parameters p and q describe the fluctuations on the small time scale (typically minutes). All the parameters (including their number!) have to be estimated from data. There are well documented techniques on doing this: information theory is used for the number of parameters, and then maximum likelihood estimation is done to obtain their specific values, see e.g. [Brockwell, 2002] The parameter estimation is a computationally challenging step.

In order to obtain reasonable results with (non-adaptive) ARIMA type models, the time series needs to be stationary after applying some (seasonal) differencing. This is the case in approximately regular traffic situations, examples of such situations are shown in Abbildung (Anhang) 4.

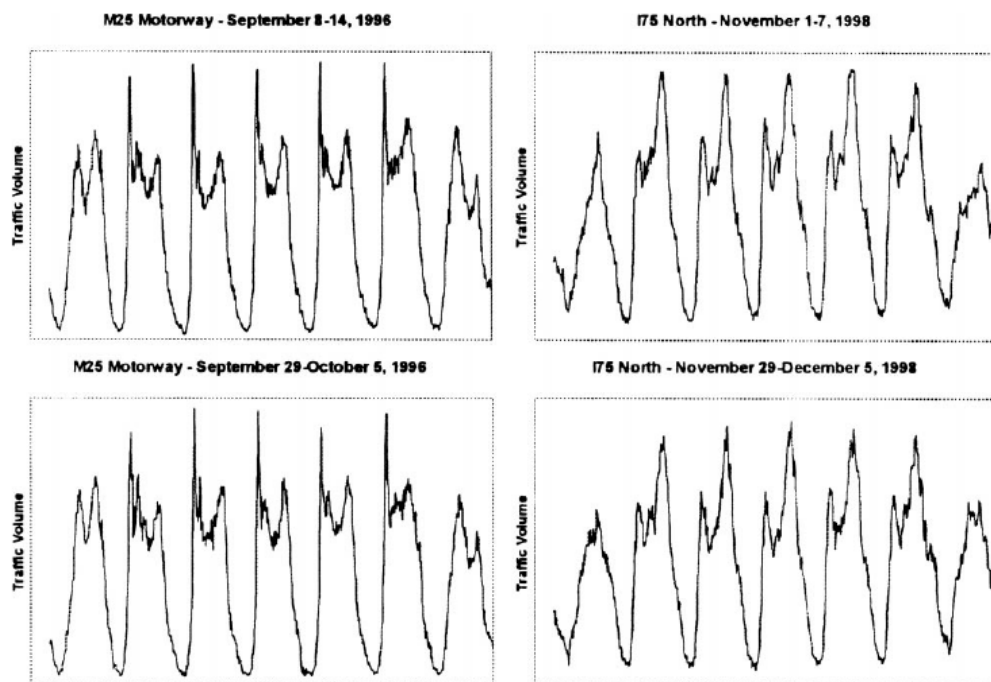


Abbildung (Anhang) 4 Example regular traffic situations

Realistic traffic data will not follow a precise stationarity pattern, the pattern will (slightly) change in time. Thus the ARIMA parameters have to be re-estimated after some time. It is computationally unfeasible and modelwise undesirable to do a complete re-estimation of the parameters. Typically the parameters will change only little. Filters (e.g. Kalman filters, recursive least squares filters), [Shekhar, 2007], can be used to update the parameters efficiently. With filtering we thus have an on-line adaptation of the time series model to find an optimized fit to newly obtained data.

ARIMA models are a hot topic in research, not only in traffic flow models. In a pure form, they have been applied to freeway traffic data [Williams, 2003]. Filtering techniques are nowadays a standard tool in time series analysis, with corresponding applications to traffic flows, see e.g. [Shekhar, 2007].

ARIMA with GARCH extension

Typically, traffic flows are heteroschedastic processes, meaning that the fluctuations around a mean pattern are stronger in some time windows than in others. ARIMA models can capture some heteroschedasticity if their parameters are regularly updated (with some filtering method, as mentioned before). There is another very broadly used class of models that is particularly designed for heteroschedastic processes, the GARCH(m,n) (Generalized Autoregressive Conditional Heteroschedastic) processes. In addition to the basic ARIMA model, they are also modeling the standard deviations of the updates as a stochastic process by extending the (identically distributed) random variable ε_t in the ARIMA process to $\varepsilon_t = \sqrt{h_t} e_t$, where now e_t is an identically distributed random variable (typically inversely normal) and

$$h_t = c_0 + c_1 \varepsilon_{t-1}^2 + \dots + c_m \varepsilon_{t-m}^2 + \dots + d_1 h_{t-1} + \dots + d_n h_{t-n}$$

is the corresponding process for the standard deviations in a GARCH(m,n) model. Further technical details can be found in [Shekhar, 2007] and [Brockwell, 2002]. There is no clear consent among researchers, whether the additional GARCH process yields an im-

provement in terms of forecast precision, compare [Guo, 2007] and [Chen, 2011]. This question can only be addressed in a case specific way. The performance comparison depends highly on the number of model parameters used and the sophistication in updating and estimation technique. Depending on the situation that should be modeled, the number of parameters used, and the quality of the data, a careful evaluation of the performance of the additional GARCH term is necessary. Abbildung (Anhang) 5 shows one possible workflow for the estimation and reestimation process with involvement of a GARCH process [Guo, 2007].

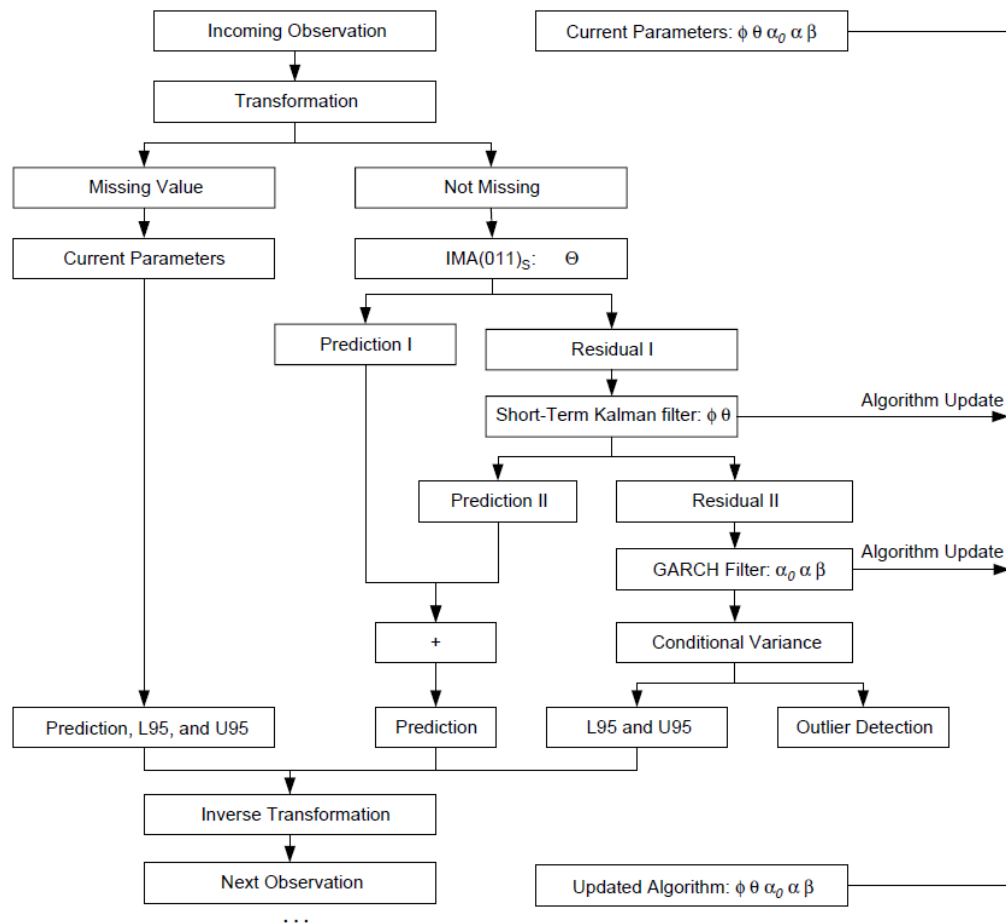


Abbildung (Anhang) 5 Workflow of the estimation, reestimation and prediction process as used in [“Data Collection Time Intervals for Stochastic Short-Term Traffic Flow Forecasting”, J. Guo, B. M. Williams, B. L. Smith]

Extended time series models

So far, we have only considered models building on univariate traffic data alone without considering external influence factors. Despite that all these factors are somehow represented in the shape of a univariate traffic data time series, it may be worthwhile to model them explicitly. Modelwise, this is an ineliminable difference: in the univariate single time series approach, we do not specify any structure of influence factors, but just try to “reproduce” all the patterns hidden in the data. With the extended models, parts of this structure is concretely constructed, giving more way to possible modeling errors, but severely optimizing the forecast precision in case of a good model choice. Essentially the following two extended time series models exist:

- **Vector ARIMA and Space Time ARIMA:** Vector ARIMA (VARIMA) models are considering several time series at once, with all their possible dependence structure. Instead of the parameters a_1, \dots, a_p and b_1, \dots, b_q , there are now matrices of parameters, indicating also the strength of interaction between pairs of time series. Such “pure”

vector ARIMA models suffer from a huge number of parameters, growing quadratically in the number of time series considered. Typically, the parameters p and q in the ARIMA model are chosen moderately small, reasonable models may include some 5 - 10 time series (see e.g. [Chandra, 2009]).

In order to reduce the number of parameters, we can make assumptions on the dependence structure of the time series, simplifying a lot of entries in the model matrix to zero. This reduction has to be done carefully and in dependence on the case it can have a very significant influence on the prediction quality. Ideally, this reduction makes the number of variables grow linearly in the number of combined time series, such that with this approach, more time series can be jointly analyzed. The price is a possibly mischievous model and interaction selection. Such partially fixed interaction modeling is called space-time ARIMA (STARIMA). For technical details, consider e.g. [Kamarianakis, 2005].

- **ARIMAX:** Often, there is some sort of multivariate trend in time series data. The traffic flow of tomorrow may be influenced by various combinations of weather, time of the year (holidays, weekday) etc. On the first sunny winterday after weeks of fog and rain, there will be more people driving to the mountains, especially if that is a Saturday or Sunday. Since such multivariate external factors can be rather numerous, it is not advisable to include them all into a VARIMA or STARIMA model (see above). Typically they are included into an ARIMA model through additional (linear or non-linear) trends. The impact of a combination of such trends has to be estimated with a regression technique (for example multivariate linear regression). This generally extends our forecast to

$$y_t = \text{function}(\text{VARIMA}(p,q), \text{external factors})$$

There is very active research going on about ARIMAX models, not only for traffic flow, see e.g. [Cools, 2009] or [Ghosh, 2009]. A very broad analysis of ARIMAX for a range of traffic simulations can be found in the [Lee, 2010]. Since such models offer a lot of flexibility, they can be adapted to many kinds of possible traffic flow scenarios. One very attractive model approach, currently also considered in [Horvitz, 2005], tries to predict traffic with special emphasis on traffic bottlenecks. With an ARIMAX approach, such bottlenecks can be taken into account as an extra "switch" variable for traffic flows at other locations.

Markov Chains

Markov Chains form one more class of stochastic processes. They assign probabilities to possible future traffic states Y , given some past and present (observed) states $X(t)$, $X(t-1)$, ..., $X(t-N+1)$. N is the order of the Markov chain, telling how many time steps in the past we want consider for the prediction Y . Key ingredient to Markov chains is the Bayesian Theorem, stating the probability of Y given X (posterior distribution) is equal to the joint probability of Y and X , divided by the probability of X . For these high dimensional distributions one needs a model assumption. Gaussian mixtures (meaning a combination of normal distributions) are used in [Sun, 2004], other models could also be considered. This is a disadvantage over ARIMA models that do not require modeling of the joint distributions. However, Markov chains also have a striking advantage over these models: posteriors are computed in terms of high dimensional integrals, where Monte Carlo methods can be used for numerical integration. These methods can easily and very naturally deal with missing or incomplete data.

Vector ARIMA and space time ARIMA extensions to multidimensional settings (VARIMA, STARIMA, e.g. for modeling several measurement sites at once) will either pose complexity problems or require sophisticated models for correlations between spatially separated measurements. The same is true for multidimensional Markov chain models: the estimation of e.g. Gaussian mixtures for high dimensional joint probabilities can become very challenging. In [Singliar, 2008], such high dimensional Markov models are used to approach the routing problem: given a traffic state at time t , we want to find the optimal route (in terms of time or a mixture of time and distance) to be taken to travel from space point a to point b . Since the traffic states will not remain constant over the travelling time and realistically form a very high dimensional structure (depending on the number of traf-

fic measurement sites between a and b), also the Markov models require sophistication concerning adaptivity and computability. But in comparison to other models, they exhibit the advantage of a very natural treatment of incomplete data.

Non-parametric models

The category of non-parametric methods comprises non-parametric regression, as well as a variety of methods that can be subsumed as machine learning methods (or methods of artificial intelligence). The term ‘non-parametric’ refers to the fact that these methods do not make any particular assumptions about the structure of the data. Hence the best data model has to be learnt from the data available.

With regard to traffic forecasting, the following classes of methods have been discussed in the literature:

- Non-parametric regression
- Clustering approaches
- Artificial neural networks (e.g. perceptrons and variants)
- Support vector machines
- Bayesian networks (which are treated in this section as a machine learning approach)

Non-parametric Regression

Non-parametric regression has been applied for traffic forecasting in [Clark, 2003; Kindzerske, 2007; Smith, 2000; Turochy, 2006; T. Zhang, 2010]. Its advantages are that, like all non-parametric models, it is based solely on the data with no assumptions or model applied. This means that a wide range of situations can be modeled. Non-parametric regression also tends to be quicker to compute than parametric methods. Non-parametric regression is based upon pattern recognition and recognizes the current state of the system in a “neighbourhood” of past similar states. These past states are then used to estimate the future values of the variables. The disadvantage is that, if similar past states are not present in the database, an informed forecast cannot be generated.

Clustering-based Approaches

Cluster Analysis aims to segment a dataset into groups of similar (or almost equivalent) data instances. If each cluster can be reliably represented by a prototype data, the data volume can be reduced drastically. This idea has been exploited in traffic forecasting. E.g. in [de Rham, 2007] the authors suggest to use cluster analysis for an ongoing segmentation of the database of daily variation curves DVC. A current DVC will then be compared to the cluster representatives only. This reduces the number of required comparisons drastically and renders short-term forecasts possible. The forecast is based on the prototype with the closest match to the current DVC. For the actual cluster analysis a plethora of approaches is available. In [de Rham, 2007] a hierarchical clustering was suggested and it was found that a restriction to a few dozens of clusters works better than a finer segmentation.

Cluster analysis is a smooth approach that, however, strongly depends on a strong pre- and postprocessing (see Abbildung (Anhang) 6).

A drawback of a cluster analysis, as proposed in [de Rham, 2007] arises when spatio-temporal correlations play a major role in the data. This information is not exploited by the approach. Therefore it could be a promising future approach to combine clustering methods and other approaches (that take spatial information into account) in a hybrid method.

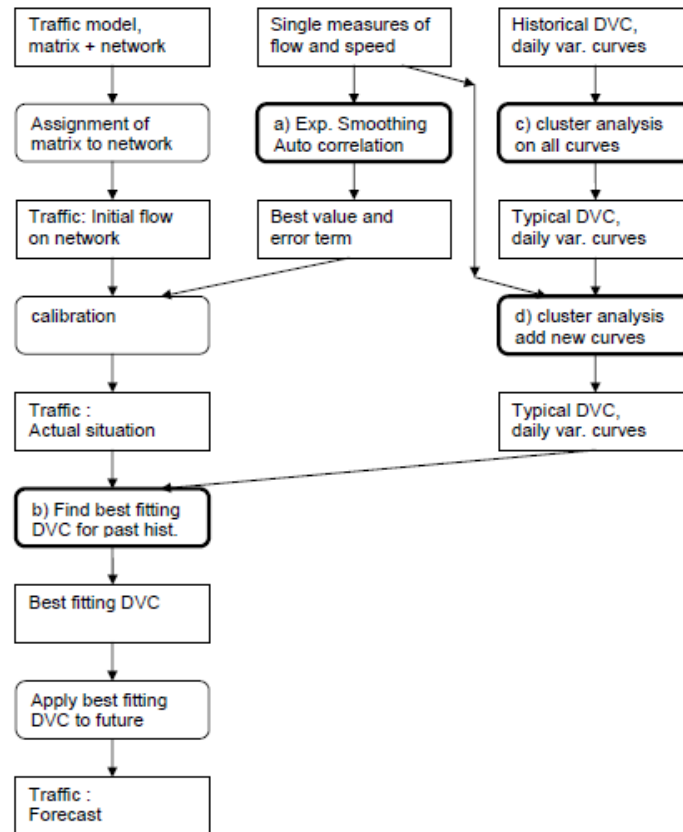


Abbildung (Anhang) 6 Embedding of cluster analysis into a series of pre- and postprocessing steps, according to the approach proposed in [de Rham, 2007]

Artificial Neural Networks (AANs)

AANs are data-driven self-adaptive methods that learn from [G. Zhang, 1998]. Thus AANs are well suited for problems whose solutions require knowledge that is difficult to specify but for which there are enough data available. As opposed to traditional parametric approaches in time series forecasting (such as ARIMA, Box—Jenkins), AANs are non-linear. Thus they are a more general and flexible modeling tool for forecasting.

For an explanatory or causal forecasting problem, the inputs to an ANN are usually the independent or predictor variables. The functional relationship estimated by the ANN can be written as

$$y_t = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

where y_t is the forecast value at time t as a function of n variables x_1, \dots, x_n (past observations). Neural network methods that are often used in traffic forecasting are the multi-layer perceptron [W. Zheng, 2006; Gilmore, 1995], radial-basis multi-layer perceptron [W. Zheng, 2006], time delayed neural networks [Yasdi, 1999] and recurrent neural networks [Dia, 2001]. [W. Zheng, 2006; Vlahogianni, 2005] develop hybrid methods which combine the multi-layer perceptron and the radial-basis multi-layer perceptron.

Neural networks can approximate almost any function, regardless of its degree of nonlinearity and without prior knowledge of its functional form. Neural networks are easy to implement and to understand and can be used for quick calculations (online methods). They could be used as a benchmarking method to be compared with new proposed techniques.

Support Vector Machines (SVMs)

Support vector machines (SVM) are described in [Cortes, 1995] as new learning machines for two-group classification problems. They exhibit very good performance in several

evaluation studies where they are compared to other classical algorithms. Technically, SVM consist of a non-probabilistic binary linear classifier which separates one class of examples from another. A related method is Support Vector Regression (SVR). There, the idea is to embed given data into a higher dimensional “feature” space, in which an analysis can be done more easily and computationally very fast (details see [Vanajakshi, 2007]). SVM and related ideas have been applied to traffic forecasting in [Vanajakshi, 2007], [X. Li, 2008] and [Wu, 2004] and even an online version was evaluated in [Castro-Neto, 2009]. With slight modifications in the optimization problem (so called “Least Square SVM”, combinations with wavelet state space analysis), accuracy can be increased with similar computational requirements (see [Y. Zhang, 2009], [Z. Liu, 2005]).

In [Hong, 2006], SVR is combined with the “tabu” search algorithms (SVRTS) to predict monthly highway traffic and is shown to provide better forecasting than SARIMA (see section I.1.11). Such comparisons however always depend strongly on the situation they are applied to. In [Qi, 2011], SVMs are used with time-space decomposition as a way to enable modelling of systems with non-uniformly distributed dynamics in space.

Bayesian Networks

In recent years, Bayesian networks have come up as a promising approach for traffic flow modeling and forecasting. These approaches come along with two potential strengths [Sun, 2006]. First, they can deal with incomplete data. Second, they can model a whole network rather than a single point. From the Bayesian network point of view, the input-output relation is represented by a probability distribution. The underlying structure is a network of interdependent spatial and temporal components. Traffic forecasting amounts to an inference problem in this network, yielding output probabilities.

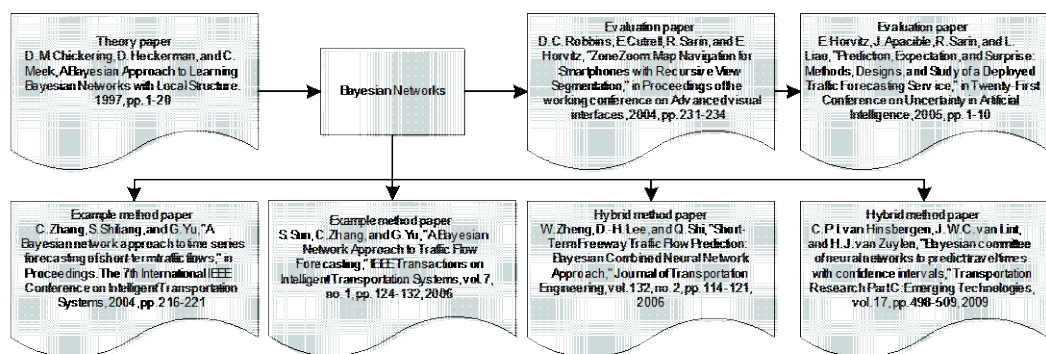


Abbildung (Anhang) 7 Some example papers using Bayesian networks

The diagram in Abbildung (Anhang) 7 shows some example papers which use Bayesian networks for traffic forecasting. The method used by INRIX and licensed by Microsoft and Google is described in [Chickering, 1997] and is evaluated in [Robbins, 2004] and [Horvitz, 2005]. Another two example papers which use Bayesian networks are [Sun, 2006] and [C. Zhang, 2004] and two hybrid methods, which have previously been mentioned are [W. Zheng, 2006] and [van Hinsbergen, 2009].

Hybrid approaches

Traffic flow is a process that exhibits very diverse properties: “regular” traffic is a (more or less) free flow of cars, whereas irregular traffic (very dense traffic, traffic jams) obeys completely different rules. The major approaches, simulation based methods and statistical methods, build upon different input data and yield not directly comparable output. For a prediction of travel time, statistical methods alone will not do, since they just capture traffic states. What happens in between these (typically spatially separated) states needs to be inferred. On the other hand, simulation based methods are very data intensive or require inflow and outflow information that needs to be obtained from a different (e.g. statistical) model. Therefore, it seems natural to choose a “hybrid” method to address the traveling time computation. Most of the current research focuses on improvement of pure methods alone, only few publications deal with the combination of methods.

One interesting publication, [Van Der Voort, 1996] deals with the calibration of ARIMA models. If that calibration is done once using available training data, the time series forecast will suffer due to non-stationarity of traffic flows. Kalman filtering offers on-line adaptivity to newly obtained data, but has problems if abrupt changes are happening (e.g. transition from free flow to very dense flow due to a construction site). For that purpose, some different traffic situation data is analysed and with non-parametric methods, current data states can be identified with one of the past states. For each of the past states there is a precalibrated ARIMA model that can be switched on to model a rapid change in conditions. This principle could easily be extended with a Kalman filter to further refine the appropriate ARIMA model to slightly different realizations of past states.

Another hybrid method that looks promising for the purpose of travel time prediction on Swiss highways was developed in [Singliar, 2008]. There, a macroscopic flow model is combined with a statistical model (some variation of a Bayesian network). The statistical model is used to predict inflow states, which are then propagated in space and time by the macroscopic flow model. This offers an effective and sophisticated way of predicting traveling time. In the same publication, this hybrid model is also used for optimizing traveling routes in terms of travel time.

A conceptually interesting hybrid approach is presented by [Furtlehner, 2007]. The authors suggest an approach inspired by statistical physics and employ the belief propagation algorithm for the statistical inference of traffic states on the basis of probe vehicles (e.g., floating phone data). While the approach provides an interesting methodology that may help deepen the understanding of the inference problem that needs to be solved, its applicability to the real world problem is uncertain.

I.3 Analyse- und Beurteilungsraster

I.3.1 Analyse- und Beurteilungsraster für Stauprognoseverfahren

Name des Dokuments	M1-MX
Name des Verfahrens / der Methode	
Basisinformationen zum Verfahren/Methode	
Entwickler	<ul style="list-style-type: none"> • Von wem wurde das Verfahren/Methode entwickelt bzw. weiterentwickelt? • Verweis auf Referenzen (Nachname + Jahr)
Zeitpunkt der Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Wann erfolgte die Entwicklung?
Einsatz der Methode (Status des Einsatzes)	<ul style="list-style-type: none"> • Regulärer online Betrieb (Angabe der Stauprognosesysteme) • Prototypischer Betrieb (Angabe der Stauprognosesysteme) • Off-line Betrieb (Präzisierung des Einsatzes und der Datenherkunft) • Theoretische Studie mit artifiziellen Daten
Anwendungszweck	<ul style="list-style-type: none"> • Welches sind die wichtigsten Anwendungszwecke des Verfahrens/Methode im Verkehr (Analyse, Prognosen)? • Welches sind die wichtigsten Anwendungszwecke des Verfahrens/Methode allgemein (Analyse, Prognosen)? • Auf welche Bedürfnisse wurde das Verfahren/Methode ausgelegt?
Abgrenzung des Untersuchungsgegenstandes	<ul style="list-style-type: none"> • Ziele der zugrundeliegenden Forschungsarbeit • Räumliche Abgrenzung (Querschnitt oder Netz, mögliche Netze, Grösse des Netzabschnittes, welche Strassenklassen?)

	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitliche Abgrenzung (Zeithorizont der Analysen/Prognosen: Minuten, Stunden, Tage, Wochen, Monate?) • Inhaltliche Abgrenzung (online/offline Betrieb,...) • Welche allfälligen Anwendungsgrenzen hinsichtlich Anwendungen im Verkehrsbereich sind zu beachten?
Methodenelemente und Eigenschaften	
Welche Elemente weist das Verfahren/ die Methode auf?	<ul style="list-style-type: none"> • Elemente und ihre Funktionalitäten <ul style="list-style-type: none"> • Berechnungsablauf • Algorithmen • Schnittstellen • Interoperabilität / Standardisierung • Was ist speziell am Verfahren / an der Methode (besonders innovativ etc.)?
Beschreibung der Kernalgorithmen der Methode des Verfahrens/Methode	<ul style="list-style-type: none"> • Mathematisch • Schematisch / Pseudocode
Formale Performance der Algorithmen	<ul style="list-style-type: none"> • Zeitkomplexität • Speicherbedarf
Welche Einflussgrößen können für die Stauprognose berücksichtigt werden?	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Einflussgrößen werden berücksichtigt? (Datum, Verkehrsaufkommen, Witterung, Grossanlässe, Unfälle, Baustellen bestehend/geplant, Ferienkalender, regionale/nationale/internationale Feiertage etc.)
Inputgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Welchen Inputgrößen werden vom Verfahren/Methode benötigt? (historische, aktuelle; künftige) • Von welchen Verkehrsträgern stammen die Inputgrößen? (Strasse inkl. Typ, Bahn, Luftverkehr,...) • Welche räumliche und zeitliche Auflösung haben die Inputgrößen? (Abschnitt, km-Raster, Querschnittsbezug, Belegungsgrad z.B. von Parkieranlagen, Warteräumen,...) • Welchen Inputgrößen könnten theoretisch vom Verfahren/Methode zusätzlich berücksichtigt werden?
Outputgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Outputgrößen werden vom Verfahren/Methode ausgegeben? • Welche Zuverlässigkeit haben diese Outputgrößen? • Können Wahrscheinlichkeiten oder Prognosegenauigkeiten angegeben werden? • Wie räumlich differenziert werden die ausgegeben? • In welchen Abständen können die Prognosegrößen aktualisiert werden?
Grafische Darstellung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Welchen Outputgrößen werden wie dargestellt? (bitte Tabellen, Grafiken beilegen)
Software / Programmiersprache	<ul style="list-style-type: none"> • In welchen Programmierumgebungen wurden die Algorithmen bisher entwickelt? • Welche Programmierumgebung wäre allenfalls vorteilhaft für eine Eigenimplementation?
Weiterentwicklungen	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterer Forschungsbedarf
Erfahrungen und Beurteilung	
Erfahrungen	<ul style="list-style-type: none"> • Welche konkreten Erfahrungen liegen bei der Anwendung vor? • Welche positiven Erfahrungen sind erwähnenswert? • Welche Verbesserungspotentiale konnten identifiziert werden? • Wie erfolgt die Wirkungskontrolle?

Vergleiche mit anderen Methoden	<ul style="list-style-type: none"> Gibt es Vergleichsstudien mit anderen Verfahren/Methoden (Wenn ja: Angaben zu den Vergleichen machen) Welche anderen Verfahren/Methoden sind verwandt?
Stärken des Verfahren/Methode	<ul style="list-style-type: none"> Welches sind die wichtigsten Stärken und wieso?
Schwächen des Verfahren/Methode	<ul style="list-style-type: none"> Welches sind die wichtigsten Schwächen und wieso?
Umsetzungsaufwand	<ul style="list-style-type: none"> Komplexität Datenbedarf Datenverfügbarkeit? Übertragbarkeit Risiken bei Umsetzung
Grundlagen, Informationen, Kontakt	
Dokumente und Referenzen	<p>Für die Analyse und Beurteilung verwendete Unterlagen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Titel, Verfasser, Jahr bei Publikationen Internet-Seiten Interviewpartner Etc.
Kontaktperson	Name, Firma, Adresse, Telefon und Mail der Kontaktperson (falls persönlich bekannt)
Ersteller des Analyse- und Beurteilungsfornulars	Name, Firma, Adresse, Telefon und Mail der für das Analyse- und Beurteilungsfornular verantwortlichen Person
Datum	Aktuelles Datum der letzten Überarbeitung

I.3.2 Analyse- und Beurteilungsraster für Stauprognosesysteme

Name des Dokuments	S1 bis SXX
Systembezeichnung/ Projektbezeichnung	Systembezeichnung oder Projektbezeichnung
Basisinformationen zum System/Projekt	
Systemhersteller, Systemlieferant, Projektverfasser	Firmen, Land, Ort (Adressen)
Einsatzland, -ort	In welchem/welchen Land/Ländern wird das System eingesetzt?

Status des Systems	<ul style="list-style-type: none"> • In Betrieb • Prototyp • In Planung • Forschung
Inbetriebnahme	<ul style="list-style-type: none"> • Wann erfolgte die Inbetriebnahme? • Erfolgte die Inbetriebnahme vollständig oder nur teilweise? • Wann ist eine Inbetriebnahme vorgesehen?
Anwendungszweck	<ul style="list-style-type: none"> • Welches sind die wichtigsten Anwendungszwecke? (Verkehrsmanagement, Nachfragesteuerung, Verkehrsinformation etc.)? • Auf welche Bedürfnisse wurde das System ausgelegt? • Welche Einschränkungen sind zu beachten?
Räumliche Abdeckung	<ul style="list-style-type: none"> • Welchen geografischen Raum deckt das System ab? (Stadt, Region Land etc.) • Wie gross ist das abgedeckte Strassennetz? • Welche Strassenklassen umfasst dieses?
Systemelemente und Eigenschaften	
Welche Elemente weist das Stauprognose-system auf?	<p>Elemente und ihre Funktionalitäten</p> <ul style="list-style-type: none"> • Technisch • Organisatorisch • Betrieblich • Interoperabilität / Standardisierung • Was ist speziell am System (besonders innovativ etc.)?
Prognosefähigkeit und –horizont	<ul style="list-style-type: none"> • Ist das System prognosefähig? • Wenn ja, für welche Prognosezeiträume? (Minuten, Stunden, Tage, Wochen, Monate?)
Prognoseverfahren und –methoden?	<ul style="list-style-type: none"> • Welches Prognoseverfahren / Welche Prognoseverfahren kommen zum Einsatz? (statische, dynamische etc.) • Welche Methoden, Algorithmen werden eingesetzt?
Welche Einflussgrössen wurden für die Stauprognose berücksichtigt?	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Einflussgrössen werden berücksichtigt? (Datum, Verkehrsaufkommen, Witterung, Grossanlässe, Unfälle, Baustellen bestehend/geplant, Ferienkalender, regionale/nationale/internationale Feiertage etc.)
Quellen von Verkehrsdaten	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Verkehrsdaten aus welchen Verkehrsquellen werden genutzt?

Inputgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Welchen Inputgrößen werden vom System benötigt? (historische, aktuelle; künftige) • Von welchen Verkehrsträgern stammen die Inputgrößen? (Strasse inkl. Typ, Bahn, Luftverkehr,...) • Welche räumliche und zeitliche Auflösung haben die Inputgrößen? (Abschnitt, km-Raster, Querschnittsbezug, Belegungsgrad z.B. von Parkieranlagen, Warteräumen,...)
Outputgrößen	<ul style="list-style-type: none"> • Welchen Outputgrößen werden vom System ausgegeben? • Welche Genauigkeit/Zuverlässigkeit haben diese Outputgrößen? • Können für die Outputgrößen Wahrscheinlichkeiten angegeben werden? • Wie räumlich differenziert werden die ausgegeben? • In welchen Abständen werden die Prognosegrößen aktualisiert?
Grafische Darstellung der Ergebnisse	<ul style="list-style-type: none"> • Welchen Outputgrößen werden wie dargestellt? (bitte Tabellen, Grafiken beilegen)
Verbreitungskanäle	<ul style="list-style-type: none"> • Wie (Radio, Internet etc.) und mit welchem zeitlichen Vorlauf werden die Prognoseergebnisse kommuniziert?
Schnittstellen	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Schnittstellen bestehen zu Datenerfassungssystemen? • Welche Schnittstellen bestehen zum Verkehrsmanagement? • Welche allfälligen weiteren Schnittstellen bestehen?
Software	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Software-Tools kommen zum Einsatz? (z.B. für dynamisches Data Mining, für Ganglinienbibliotheken etc.)
Hardware	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Hardware kommt zum Einsatz? • Welche spezifischen Anforderungen muss die Hardware erfüllen?
Weiterentwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Ist eine Weiterentwicklung des Systems geplant? Wenn ja in welche Richtung? • Was sind die Pläne in der Zukunft?
Organisation und Institutionelles	
Betreiber- und Geschäftsmodell	<p>Betreiber- und Geschäftsmodell Rolle der involvierten Partner Wer hatte den Lead bei der Planung, Umsetzung und Betrieb?</p>
Finanzierung	<ul style="list-style-type: none"> • Wie erfolgte die Finanzierung (Konzept, Einführung und Betrieb)? • Welches Finanzierungsmodell wurde gewählt?
Rechtliches	<ul style="list-style-type: none"> • Relevante Rechtsgrundlagen • Vertragliche Regelungen (Vereinbarungen, Abkommen etc.)
Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Mussten spezielle Rahmenbedingungen berücksichtigt werden? Wenn ja, welche?

Erfahrungen und Beurteilung	
Erfahrungen	<ul style="list-style-type: none"> • Welche konkreten Erfahrungen liegen bei der Anwendung vor? • Welche positiven Erfahrungen sind erwähnenswert? • Welche Verbesserungspotentiale konnten identifiziert werden? • Wie erfolgt die Wirkungskontrolle?
Vergleiche mit anderen Systemen	<ul style="list-style-type: none"> • Gibt es Vergleichsstudien mit anderen Systemen? • Welche anderen Systeme sind von der Konzeption her verwandt?
Stärken des Stauprognosesystems	<ul style="list-style-type: none"> • Welches sind die wichtigsten Stärken und wieso?
Schwächen des Stauprognosesystems	<ul style="list-style-type: none"> • Welches sind die wichtigsten Schwächen und wieso?
Nutzen des Systems	<ul style="list-style-type: none"> • Welches sind die Nutzen des Systems (qualitativ, quantitativ) für welche Nutzergruppen (Strassennetzbetreiber, Strassenbenutzer, weitere)
Kosten des Systems	<ul style="list-style-type: none"> • Welches sind die Kosten des Systems? (Investitionen, Betrieb)
Erfolgsfaktoren	<ul style="list-style-type: none"> • Welches sind die wichtigsten Erfolgsfaktoren für das Konzept/Design? • Welches sind die wichtigsten Erfolgsfaktoren für die Inbetriebnahme? • Welches sind die wichtigsten Erfolgsfaktoren für einen reibungslosen Betrieb?
Hindernisse	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Hindernisse zeigten sich bei der Planung, Umsetzung und im Betrieb? Wie wurden die Hindernisse reduziert? Wenn ja, wie? • Welche Risiken sind zu berücksichtigen?
Übertragbarkeit auf die Schweiz	<ul style="list-style-type: none"> • Welche allf. Anwendungsgrenzen sind zu beachten? • Kann das Stauprognosesystem auf die Bedingungen der Schweiz bzw. die Einsatzbedingungen auf Nationalstrassen übertragen werden? • Wenn nein, warum nicht? • Wenn ja, was wäre in der Schweiz speziell zu beachten bzw. allf. Einschränkungen? • Welche Rahmenbedingungen wären allenfalls anzupassen?
Grundlagen, Informationen, Kontakt	
Dokumente und Referenzen	<p>Für die Analyse und Beurteilung verwendete Unterlagen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Titel, Verfasser, Jahr bei Publikationen • Internet-Seiten • Interviewpartner

	<ul style="list-style-type: none">• Etc.
Kontaktperson	Name, Firma, Adresse, Telefon und Mail der Kontaktperson
Ersteller des Analyse- und Beurteilungsformulars	Name, Firma, Adresse, Telefon und Mail der für das Analyse- und Beurteilungsformular verantwortlichen Person
Datum	Aktuelles Datum der letzten Überarbeitung

I.4 **Tabellarische Übersicht Stauprognosesysteme**

(Tabelle auf drei Seiten verteilt zur besseren Lesbarkeit)

System	Basisinformationen				
	Entwickler/Hersteller	Status	Inbetriebnahme	Anwendungszweck	Räumliche Abdeckung
Capitals	INRETS (heute IFSTTAR) (FR)	Prototyp (1995-97)	keine	Verkehrsinformationen für Strassennutzer, Input Verkehrsmanagement	Autobahn Paris-Strassbourg und Ring um Paris
AdaptiCast	Adapticon B.V. (NL)	In Betrieb	seit 2010, Integration in Verkehrsmanagement in Testphase	Reisezeitprognose (für PW und LW), Input für Verkehrsmanagement	Holland, Chicago, Boston, Dallas und Seattle
INRIX/anwb	INRIX (USA), INRIX Europe (Germany)	In Betrieb	seit 2010/2011 in Europa	Reisezeitprognose für die Reiseplanung, Routenplanung	Weltweit: 500'000 Strassen-km Europa: 50'000 Strassen- km (6 Länder, Stand 2011)
TRIPCAST	Modelit (NL)	In Betrieb	seit 2008	Reisezeitprognose, Routenplanung (PW, LW)	Strassennetz Niederlande
TomTom (HD Traffic, IQ-Routes, Routeplanner)	TomTom International B.V. (NL)	In Betrieb	seit 2007	Dynamische Verkehrsinformationen (Reisezeitinfo), Routennavigation	In zahlreichen europäischen Ländern sowie Ländern in Übersee
National Traffic Model, OPTIMA	Mygistics (USA, Canada) in Zusammenarbeit mit PTV	Prototyp, Testphase	Ja	Verkehrsinformationen für die Reiseplanung und das Verkehrsmanagement	Chicago (USA) , Edmonton (CA)
TTVMS	TiS (UK)	In Betrieb	seit 2007	Reisezeitprognose, Verkehrsinformationen	England (Autobahnen und Hauptstrassennetz, 8000 km)
iPerform	Iteris (USA)	Pilotprojekt	seit 2011	Verkehrsflussprognose für Strassennetzbetreiber	Las Vegas
OLSIM (OnLine Traffic Simulation)	Universität Duisburg-Essen	In Betrieb	seit 2003	Verkehrsinformationen für die Reiseplanung (PW und LW)	Bundesland Nordrhein-Westfalen (2250 km Autobahnen)
Verkehrslage in Hessen	Hessisches Landesamt für Strassen- und Verkehrswesen	In Betrieb	Reisezeitservice seit 2010	Verkehrsinformationen	Bundesland Hessen (alle Autobahnen)
MONET	PTV und Siemens	In Betrieb	seit 2002, seit 2004 mit FCD (Modernisierung geplant)	Verkehrsinformationen für Verkehrssteuerung (heute) nicht genau genug	Berlin
Google Maps	Google Inc.	In Betrieb	Seit 2008 sind Echtzeit-Verkehrsinfos in Google-Maps integriert. Seit Juli 2011 sind diese auch für Europa verfügbar.	Verkehrsinformationen für die Reiseplanung	<ul style="list-style-type: none"> • weltweit, sofern Verkehrsdaten verfügbar sind • Europa: Deutschland, Österreich, Schweiz, Grossbritannien, Niederlande, Spanien, Polen, Belgien, Tschechische Republik, Irland, Israel, Luxemburg, Slowakei

	Systemelemente und Eigenschaften						
System	Funktionalitäten	Prognosehorizont	Prognoseverfahren und -methoden	Berücksichtigte Einflussgrößen	Input	Output	Ergebnisdarstellung
Capitals	Verkehrsaufkommensprognose, Verkehrszustandsprognose	Minuten, Stunden, Tage, Wochen, Monate	Statistische Prognosemethode, Abbildung des Zusammenhangs zwischen Angebot und Nachfrage, Abschätzung der Reisezeit aufgrund Verkehrsbelastung und Verkehrsfluss für einzelne Strassensegmente und Aufsummierung (verwendete Ansätze und Algorithmen nicht publiziert)	Datum, hist. Verkehrsaufkommen, Wetter, Anlässe, Unfälle, Baustellen, Ferienkalender	vgl. Einflussgrößen, hist. Reisezeiten	Mittlere Verkehrsbelastung, Verkehrsfluss, Reisezeiten	Diagramme
AdaptiCast	Reisezeitprognose, Schnittstelle zu Verkehrsmanagementsystemen	Minuten, Stunden, Tage, Wochen, Monate	Nichtlineares wahrscheinlichkeitstheoretische statistische Prognosemethode, Dynamisches Data Mining (Data Mining für das Identifizieren von Mustern in statischen Daten, Zeitreihenanalysen für dynamische Daten) (Details nicht publiziert)	Datum, Zeit, Wetter, Wetterprognosen, Ferienkalender, Baustellen, Ereignisinformationen	vgl. Einflussgrößen	Reisezeitenverteilung und Wahrscheinlichkeiten, Reisegeschwindigkeiten, (PW, LW)	Karten, Diagramme
INRIX/anwb	Reisegeschwindigkeitsprognose, auch Reisezeiten sowie voraussichtliche Ankunftszeit	Minuten, Stunden, Tage, Wochen, Monate	Statistisches Verfahren, Basierend auf statischen und dynamischen Daten (<i>Details nicht publiziert, vertraulich</i>)	Verkehrsaufkommen, Ferienkalender und Feiertage, Wetter, Unfälle, Baustellen, Grossanlässe	vgl. Einflussgrößen (versch. Quellen für Verkehrsdaten inkl. FCD)	Reisegeschwindigkeiten (auf 50m genau), Reisezeiten, geschätzte Ankunftszeit	Karten
TRIPCAST	Reisezeitprognose für Personen- und Lastwagen	Minuten bis Monate	Kombination von simulationsgestütztem und statistischen Verfahren, Tripcast simuliert eine grosse Anzahl von Fahrten und prognostiziert die Fahrzeiten mit Zuverlässigkeitsintervallen (Nutzung von statischen und dynamischen Daten)	Datum, Zeit, Wetter, Ferienkalender, Lichtverhältnisse (noch nicht Baustellen)	vgl. Einflussgrößen, historische und aktuelle Daten, Wetterprognosen	Reisezeiten mit Zuverlässigkeiten, Routenempfehlung, Verkehrszustand für diese Route	Karten, Diagramme
TomTom (HD Traffic, IQ-Routes, Routeplanner)	Reisezeitprognose, Dynamische Routenplanung	Minuten bis Monate	Statistisches Prognoseverfahren, Basierend auf statischen und dynamischen Daten (struktureller Stau ist hergeleitet aus historischen Daten, aktuelle Situation aus FCD und Handys (<i>Keine Detailangaben</i>))	Verkehrsaufkommen, Datum, Zeit	historische und aktuelle Verkehrsdaten (FCD, Handy, etc.) nach Zeitpunkt	Reisezeit, schnellste Route, Reisegeschwindigkeiten	Karten
National Traffic Model, OPTIMA	1) Verkehrsmodell (das im Hintergrund permanent läuft, automatischer Daten Input) 2) Reisezeitprognose	Minuten bis Wochen (für Verkehrsmanagement bis zu einer Stunde genügend)	Makro-Simulation mit einem dynamisierten Verkehrsmodell (automatischer Dateninput aus Verkehrsmonitoring). Nicht nur der Verkehrsfluss wird abgebildet sondern auch Fahrzeuge (jedoch noch keine Mikrosimulation).	Verkehrsaufkommen, Ereignisse, Baustellen	Verkehrsdaten (Sensoren, GPS, LSA), Unfall/Ereignisdaten, Baustellen	Verkehrsvolumen, Reisezeiten, Staulängen, Reisezeitverluste,	Karten, Diagramme
TTVMS	1) Reisezeitermittlung 2) Verkehrsinformation 3) Ereigniserkennung	0 bis 90 Minuten	Statistische Prognosemethode: Auf der Basis von Verkehrsfluss und Geschwindigkeiten (erfasst durch Videokameras, Automat. Nummernschilderkennung) werden aktuelle Reisezeiten ermittelt und prognostiziert. (Verwendung historischer und aktueller Verkehrsdaten)	Verkehrsaufkommen nach Zeit	Verkehrsdaten (Videokameras mit automat. Nr. Erkennung)	Geschwindigkeit, Verkehrsfluss, Reisezeit,	Diagramme
iPerform	Verkehrsflussprognose (Dichte, Geschwindigkeit)	Anfrage noch offen	Statistisches Prognoseverfahren: Das System vergleicht historische Daten mit den aktuellen Bedingungen sowie auch künftige Informationen (Wetter, Grossanlässe, Baustellen) und prognostiziert den Verkehrsfluss (keine näheren Angaben erhältlich)	Verkehrsaufkommen, Wetter, Baustellen, Grossanlässe	vgl. Einflussgrößen (hist. akt., künftig)	Verkehrsfluss, -dichte	Karte,
OLSIM (OnLine Traffic Simulation)	On Line Verkehrssimulation, Prognose der künftigen Verkehrslage, Stau und Fahrzeiten	Zeithorizonte: 30 Minuten, 60 Minuten, Langzeitprognose für maximal 1 Woche	Mikrosimulation des Verkehrsflusses (zellulare Automaten) auf der Basis von aktuellen Verkehrsdaten (aus automatischen Zählstellen) und weiteren Daten. Die Messdaten werden kontinuierlich in eine Datenbank geschrieben. Die Langzeitprognose beruht allein auf historischen Daten.	Verkehrsaufkommen, Datum, Uhrzeit, Ferienkalender und Feiertage, Baustellen, Unfälle, Sperrungen, Grossanlässe	vgl. Einflussgrößen	aktuelle Verkehrslage, Verkehrsdichte, Reisezeiten	Karte
Verkehrslage in Hessen	Verkehrslageprognose, Baustellenprognose, Reisezeitprognose	Zeithorizonte: 30 Minuten, 60 Minuten	Statistisches Verfahren: Herleitung des Verkehrsflusses aus Geschwindigkeitsinformationen von Fahrzeugen (Kerner'sche Drei-Phasen-Verkehrstheorie für Autobahnen), ASDA/FOTO Simulationsmodell (Ergänzungen klären)	Datum, Uhrzeit, Verkehrsaufkommen, Baustellen	vgl. Einflussgrößen	aktuelle Verkehrslage, Verkehrslage in 30 und 60 Minuten, Reisezeitverzögerungen	Karte, Listen
MONET	Verkehrmodell, Verkehrsprognose	Zeithorizonte: 30 Minuten	Statisches Prognoseverfahren (Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstrassennetzen)	Verkehrsdaten (automatische Zählstellen, FCD), Verkehrsmeldungen zu Störungen	vgl. Einflussgrößen	Verkehrsstärke, Reisezeit, Verkehrsbelastung	Karte
Google Maps	Verkehrsprognose	kein eigentlicher Horizont, für mittleren Wochentag und Tageszeit	Statistisches Verfahren	k.A.	Verkehr, Datum und Zeit	Verkehrsbelastung und Reisezeit	Karte

	Erfahrungen und Beurteilung			
System	Erfahrungen	Stärken	Schwächen	Übertragbarkeit auf die Schweiz
Capitals	Gute Übereinstimmung von Prognosewerten mit Messwerten, Wichtigster Einfluss hat Kalendertag, vor Wetter und vor Anlässen, je länger die Historie, desto besser die Prognosewerte	Gute Prognosresultate für Situationen ohne Störungen	Ungenügende Resultate bei speziellen Ereignissen, , Keine definitive Inbetriebnahme	Ja
Adaptl/Cast	Im Rahmen eines unabhängigen Systemvergleichs schnitt das System bezüglich Qualität und Zuverlässigkeit der Prognose sehr gut ab, Gewinner eines Innovationspreises in Holland	Hohe Prognosequalität, Flexibilität in Bezug auf die Inputdaten, Angabe von Wahrscheinlichkeiten, Schnittstelle zu Verkehrsmanagement Systemen, Differenzierung von Lastwagen und Personewagen, hohe Automatisierung der Berechnung	Hoher Datenbedarf (Quantität und Qualität)	Ja
INRIX/anwb	Grundsätzlich positive Nutzerreaktionen, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Flächenabdeckung und Verbreitung, Ambitionen für Weiterentwicklung	Stark abnehmende Qualität der Prognosen auf dem untergeordneten Strassennetz, Geschwindigkeitsangabe für Strassennutzer wenig relevant, starke Abstützung auf historische Daten, teilweise rückläufige Verkäufe bei Navigationsgeräten	Ja (bereits verfügbar)
TRIPCAST	Positive Reaktionen der Nutzer, Zunehmende Anzahl von Drittnutzern der Prognosen, Gewinner von zwei Preisen bei Reisezeitprognose-Wettbewerben in Holland	Grosse Anzahl von Einflussfaktoren kann berücksichtigt werden, Hohe Prognosequalität, Angabe von Zuverlässigkeitsintervallen, Differenzierung Lastwagen und Personewagen	Keine speziellen Schwächen angegeben, vermutlich auch hoher Datenbedarf	Ja
TomTom (HD Traffic, IQ-Routes, Routeplanner)	Starke Verbreitung, positive Nutzerreaktionen, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Hohe Qualität der aktuellen Verkehrslage, Verfügbarkeit/Zugriff auf FCD, Verbesserungspotential mit zunehmender Verbreitung von FCD	Keine Berücksichtigung von Wetterprognosen, Grossanlässen, Baustellen und Unfällen (nur Nutzung von historischen Daten)	Ja (HD Traffic in Schweiz verfügbar)
National Traffic Model, OPTIMA	Zuverlässigkeit der Prognose über 90%, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Schnittstellen zu Signalsteuerungen, Schnittstelle zum Verkehrsmanagement	Wetter und Grossanlässe für Prognose nicht berücksichtigt, beschränkte Genauigkeit für das untergeordnete Strassennetz	Ja
TTVMS	Hohe Zuverlässigkeit der Reisezeiten (Mittlere Abweichungen geringer 1 Min.), Positive Nutzerreaktionen, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	relativ einfaches System, Zuverlässigkeit	Schlechte Abdeckung von Ereignissen, hoher Infrastrukturbedarf (Automatische Nummernschilderkennung), Beschränkung auf Autobahnen	Ja (wenn entsprechende Videokameras, ANPR)
iPerform	Noch keine Erfahrungen vorhanden (Pilotprojekt), es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Berücksichtigung von künftigem Wetter, Baustellen und Anlässen, Szenarienanalyse möglich (Baustellenplanung)	Datenbedarf	Ja
OLSIM (OnLine Traffic SIMulation)	Starke Nutzung Informationsdienst, in 85% der Fälle auch in der Spitzzeit zuverlässig, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Langjährige Erfahrung, Weiterentwicklung aufgrund der gemachten Erfahrungen, Zuverlässigkeit der Prognose, Hohe Abbildungstiefe, Berücksichtigung von Ereignissen	Datenbedarf, Geplante Betriebsübergabe benötigt Zusatzaufwand	Ja
Verkehrslage in Hessen	Keine Angabe von Informationen zu Erfahrungen, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Kurze Aktualisierungsintervalle	Keine Mittel- und Langfristprognosen, beschränkte Berücksichtigung von Ereignissen	Ja
MONET	Gutes Gesamtbild der Verkehrslage, es besteht kein unabhängiger Systemvergleich	Langjährige Erfahrung, Gesamtbild Verkehrslage, Flexibilität bezüglich der Quellen von Verkehrsdaten	Keine Rückstauprognosen, Zuverlässigkeit heute zu gering als Input für Verkehrsmanagement-Massnahmen	Ja
Google Maps	Positive Nutzerreaktionen	Verbreitung und räumliche Abdeckung	Keine Berücksichtigung von Wetterprognosen, Grossanlässen, Baustellen und Unfällen (nur Nutzung von historischen Daten), Keine Berücksichtigung des Kalendertages	Ja (bereits verfügbar)

II Anhänge Bedürfnisanalyse (Kapitel 3)

II.1 Interviewleitfaden Strassenbenbetreiber

Projekt Stauprognoseverfahren und -systeme

Interviewleitfaden für die Bedürfnisanalyse: Strassenbetreiber

Endversion 8.2.2012 MSR/Koy/PHI

Vorbemerkungen

Die Bedürfnisanalyse hat den Fokus auf den Möglichkeiten und dem Output des Stauprognose-systems.

Definition Stauprognosesystem: Ein Stauprognosesystem macht gestützt auf historische und aktuelle gemessene und berechnete Kenngrössen zum Verkehr und zu relevanten Einflussfaktoren (Wetter, Witterung, Baustellen, Ferienkalender etc.) Vorhersagen zur zu einem bestimmten Zeitpunkt herrschenden Stausituation. (eigene Definition)

Es wurden folgende Fragenbereiche identifiziert:

- Teil I: Output (Ergebnisse aus einem Stauprognosesystem):
 - Output Kenngrössen aus dem Stauprognosesystem
 - Differenzierung der Kenngrössen aus dem Stauprognosesystem (Zeit, Raum, Fahrzeugklassen etc.)
 - Aktualisierung (Zeitintervall)
 - Qualität/Zuverlässigkeit der ausgegebenen Kenngrössen
 - Darstellung des Outputs
 - Verbreitung des Outputs
- Teil II: Input (Eingangsgrössen für ein Stauprognosesystem):
 - Einflussgrössen für die Stauprognose
 - Verkehrsdaten
 - Umfelddaten (Wetter, Unfälle etc.)
- Teil III: System (System für die Ermittlung von Stauprognosen):
 - Bedürfnisse bezüglich Schnittstellen zu bestehenden/geplanten Systemen
 - Weitere Bedürfnisse bezüglich System
- Teil IV: Weiteres
 - Weitere Aspekte/Anforderungen

Der Interviewleitfaden wird im Idealfall 10 bis 14 Tage vor dem Interview verschickt zur Vorbereitung und Minimierung der Interviewdauer. In Absprache auch kürzere Vorbereitungszeit möglich.

1. Output aus Stauprognosesystemen

Nr	Frage	Antwort
		<i>Neben Antwort sind Begründungen/Erklärungen wichtig</i>
1	Für welche Anwendungszwecke würden Sie Resultate aus	<input type="checkbox"/> <i>Verkehrsinformation</i>

Stauprognosesystemen nutzen?

- Reise- und Routenplanung
- Verkehrsmanagement
- Baustellen-/Unterhaltsplanung
- Strassennetzplanung
- Verkehrsmonitoring
- Andere:
- Andere:
- Andere:

Begründung/Erklärung:

.....

.....

.....

Bei mehreren Anwendungszwecken: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit? (1=wichtigste)

.....

.....

.....

2a Welche Kenngrößen aus Stauprognosesystemen benötigen Sie für die Verkehrsinformation?

- Reisezeiten
- Reisezeitverluste
- Reisegeschwindigkeit
- Staulängen
- Verkehrsstärke /-fluss/ -dichte (Querschnitt)
- Auslastung
- Verkehrsbelastung (Strecke)
- Verkehrszustand (Netzteil)
- Verkehrslage (Netz)
- Verkehrsqualität (LOS, Qualitätsstufen nach SN)
- Andere:
- Andere:
- Andere:
- Andere:

Begründung/Erklärung:

.....

.....

.....

.....

.....

Bei mehreren Kenngrößen: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit? (1=wichtigste)

.....

.....

.....

.....

2b Welche Kenngrößen aus Stauprognosesystemen benötigen Sie für die Reise- und Routenplanung?

- Reisezeiten
- Reisezeitverluste
- Reisegeschwindigkeit
- Staulängen
- Verkehrsstärke /-fluss/ -dichte (Querschnitt)
- Auslastung
- Verkehrsbelastung (Strecke)
- Verkehrszustand (Netzteil)
- Verkehrslage (Netz)

- Verkehrsqualität (LOS, Qualitätsstufen nach SN)
- Andere:
- Andere:
- Andere:
- Andere:

Begründung/Erklärung:

.....

.....

.....

Bei mehreren Kenngrößen: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit?
(1=wichtigste)

.....

.....

.....

.....

2c Welche Kenngrößen aus Stau-
prognosesystemen benötigen
Sie für das Ver-
kehrsmanagement?

- Reisezeiten
- Reisezeitverluste
- Reisegeschwindigkeit
- Staulängen
- Verkehrsstärke /-fluss/ -dichte (Querschnitt)
- Auslastung
- Verkehrsbelastung (Strecke)
- Verkehrszustand (Netzteil)
- Verkehrslage (Netz)
- Verkehrsqualität (LOS, Qualitätsstufen nach SN)
- Andere:
- Andere:
- Andere:
- Andere:

Begründung/Erklärung:

.....

.....

.....

Bei mehreren Kenngrößen: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit?
(1=wichtigste)

.....

.....

.....

.....

2d Welche Kenngrößen aus Stau-
prognosesystemen benötigen
Sie für die Baustellen-
/Unterhaltsplanung?

- Reisezeiten
- Reisezeitverluste
- Reisegeschwindigkeit
- Staulängen
- Verkehrsstärke /-fluss/ -dichte (Querschnitt)
- Auslastung
- Verkehrsbelastung (Strecke)
- Verkehrszustand (Netzteil)
- Verkehrslage (Netz)
- Verkehrsqualität (LOS, Qualitätsstufen nach SN)
- Andere:

- Andere:
- Andere:
- Andere:

Begründung/Erklärung:

.....

.....

.....

Bei mehreren Kenngrößen: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit?
(1=wichtigste)

.....

.....

2e Welche Kenngrößen aus Stau-
prognosesystemen benötigen
Sie für die Stras-
sennetzplanung?
(lokal, regional, national)

- Reisezeiten
- Reisezeitverluste
- Reisegeschwindigkeit
- Staulängen
- Verkehrsstärke /-fluss/ -dichte (Querschnitt)
- Auslastung
- Verkehrsbelastung (Strecke)
- Verkehrszustand (Netzteil)
- Verkehrslage (Netz)
- Verkehrsqualität (LOS, Qualitätsstufen nach SN)
- Andere:
- Andere:
- Andere:
- Andere:

Begründung/Erklärung:

.....

.....

.....

Bei mehreren Kenngrößen: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit?
(1=wichtigste)

.....

.....

.....

2f Welche Kenngrößen aus Stau-
prognosesystemen benötigen
Sie für das Ver-
kehrsmonitoring?
(Verkehrsmonitoring = Ver-
kehrsbeobachtung und
-überwachung)

- Reisezeiten
- Reisezeitverluste
- Reisegeschwindigkeit
- Staulängen
- Verkehrsstärke /-fluss/ -dichte (Querschnitt)
- Auslastung
- Verkehrsbelastung (Strecke)
- Verkehrszustand (Netzteil)
- Verkehrslage (Netz)
- Verkehrsqualität (LOS, Qualitätsstufen nach SN)
- Andere:
- Andere:
- Andere:

Andere:

Begründung/Erklärung:

.....
.....
.....

*Bei mehreren Kenngrößen: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit?
(1=wichtigste)*

.....
.....
.....

3 Für welchen Prognosehorizont oder welche Prognosehorizonte benötigen Sie die Kennwerte?

Minuten bis Stunden

Stunden bis Tage

Tage bis Wochen

Wochen bis Monate

Andere:

Begründung/Erklärung:

.....
.....
.....

Gibt es Unterschiede bei den Staukenngrößen? Wenn ja, welche?

.....
.....

4 Welche räumliche Abdeckung müsste das System haben?

Stadt/Region

Kanton

Schweiz

Schweiz und Nachbarländer

Europa

Andere:

Begründung/Erklärung:

.....
.....

5 Welche Strassenklassen sollten abgedeckt sein?

Autobahnen

Hauptverkehrsstrassen

Sammelstrassen

Erschliessungsstrassen

Andere:

Begründung/Erklärung:

.....
.....
.....
.....

6 Welche Fahrzeugklassen sollten beim Output berücksichtigt werden (Reisezeiten, Staulängen etc.)

Personenwagen
 Lastwagen
 Andere:

Begründung/Erklärung:
.....
.....

7 In welchem Zeitintervall benötigen Sie eine Aktualisierung

.....
.....
.....

Begründung/Erklärung:
.....
.....
.....

Gibt es Unterschiede bei den Staukenngrossen? Wenn ja, welche?
.....
.....

8 a) Welche Zuverlässigkeit / Qualität sollten die Output-Kenngrossen aufweisen? (im Sinne von Standardabweichungen)

.....
.....
.....

b) In wievielen von 100 Fällen dürfte eine Prognose falsch sein, damit sie diese als zuverlässig beurteilen?

Begründung/Erklärung:
.....
.....
.....

Gibt es Unterschiede bei den Staukenngrossen? Wenn ja, welche?
.....
.....

9 Wie sollten die Output-Kenngrossen dargestellt werden?

Karten
 Grafiken
 Tabellen
 Einzelwerte
 Differenzbetrachtungen mit/ohne Stau
 Andere:
 Andere:
 Andere:

Begründung/Erklärung:
.....
.....
.....

- 10 Über welches Medium sollten die Stauprognoseergebnisse verbreitet werden?
- Radio
 - Telefon/Mobiltelefon
 - Internet
 - On Board Unit im Fahrzeug
 - Andere:
 - Andere:
 - Andere:
- Begründung/Erklärung:

2. Input Stauprognosesysteme

Nr	Frage	Antwort
		<i>Neben Antwort sind Begründungen/Erklärungen wichtig</i>
11	Welches sind die wichtigsten Einflussfaktoren die aus Ihrer Sicht berücksichtigt werden sollten??	<p><i>Aufzählung plus andere, ev. Differenzierung Ist- Zustand und Prognose</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Momentaner Verkehr <input type="checkbox"/> Ferienkalender <input type="checkbox"/> Wetter/Witterung <input type="checkbox"/> Baustellen <input type="checkbox"/> Grossanlässe <input type="checkbox"/> Netzstruktur und -eigenschaften <input type="checkbox"/> Unfälle <input type="checkbox"/> Andere: <input type="checkbox"/> Andere: <input type="checkbox"/> Andere: <p>Begründung/Erklärung: </p> <p><i>Bei mehreren Einflussfaktoren: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit? (1=wichtigste)</i> </p>
12	Welches sind die wichtigsten Verkehrsdaten die aus Ihrer Sicht berücksichtigt werden sollten?	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Automatische Verkehrszähl Daten (Induktion) <input type="checkbox"/> Automatische Verkehrszähl Daten (Infrarot, Laser, Ultraschall, Radar- und Mikrowellen) <input type="checkbox"/> Videokameras mit digitaler Bildauswertung <input type="checkbox"/> Automatische Nummernschilderkennung <input type="checkbox"/> Floating Car Data <input type="checkbox"/> Floating Phone Data <input type="checkbox"/> Luftbilder <input type="checkbox"/> Nachfragematrizen aus Verkehrsmodellen <input type="checkbox"/> Verkehrsmeldungen <input type="checkbox"/> Andere: <input type="checkbox"/> Andere:

Andere:

Andere:

Begründung/Erklärung:

.....
.....
.....

Bei mehreren Kenngrößen: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit?
(1=wichtigste)

.....
.....
.....
.....

2b Welche Kenngrößen aus Stau-
prognoseystemen benötigen
Sie für die Reise- und Routen-
planung?

Reisezeiten

Reisezeitverluste

Reisegeschwindigkeit

Staulängen

Verkehrsstärke /-fluss/ -dichte (Querschnitt)

Auslastung

Verkehrsbelastung (Strecke)

Verkehrszustand (Netzteil)

Verkehrslage (Netz)

Verkehrsqualität (LOS, Qualitätsstufen nach SN)

Andere:

Andere:

Andere:

Andere:

Begründung/Erklärung:

.....
.....
.....

Bei mehreren Kenngrößen: Wie ist die Rangfolge nach Wichtigkeit?
(1=wichtigste)

.....
.....
.....
.....

3 Für welchen Prognosehorizont
oder welche Prognosehorizonte
benötigen Sie die Kennwerte?

Minuten bis Stunden

Stunden bis Tage

Tage bis Wochen

Wochen bis Monate

Andere:

Begründung/Erklärung:

.....
.....
.....
.....

Gibt es Unterschiede bei den Staukenngößen? Wenn ja, welche?

.....
.....
.....

.....

9 Wie sollten die Output-
 kenngrossen dargestellt wer-
 den?

- Karten
- Grafiken
- Tabellen
- Einzelwerte
- Differenzbetrachtungen mit/ohne Stau
- Andere:
- Andere:
- Andere:

Begründung/Erklärung:

.....

10 Über welches Medium sollten
 die Stauprognoseergebnisse
 verbreitet werden?

- Radio
- Telefon/Mobiltelefon
- Internet
- On Board Unit im Fahrzeug
- Andere:
- Andere:
- Andere:

Begründung/Erklärung:

.....

2. Weiteres

Nr	Frage	Antwort
		<i>Neben Antwort sind Begründungen/Erklärungen wichtig</i>

11 Welche Anforderungen stellen
 Sie an Stauprognosesysteme?

.....

Begründung/Erklärung:

.....

III Anhänge Prognoseverfahren und Prognosevariablen (Kapitel 4)

III.1 Traffic Data from Detectors (Kapitel 4.2)

III.1.1 Preprocessing Traffic Data from Detectors

Description of Data Properties

Swiss highway traffic detectors currently consist of two induction loops, allowing a direct measurement of the vehicle velocity and length. The loop detector data, as provided by cnlab (www.cnlab.ch), contains measurements of single cars (in the following called an 'event') without time aggregation. For each car that passes over the detector, the following data is recorded (Tabelle 24, Chapter 4.2, for details of the precise data structure and some examples see [ZHAW/Rapp, 2012c]).

A remarkable and internationally rather unique property of the ASTRA loop detector data is the fact that the raw single car event data are available, without any preprocessing such as time averaging, occurring (too early) at the detector level. This is advantageous since the type of data processing depends heavily of the intended use (see below), and any preprocessing at the detector level would severely hamper the correct use of the data later. In fact, there exists a growing number of scientific literature dealing with the problem of recovering the original, unprocessed data from aggregated detector data, see, e.g. [van Lint, 2010]

Handling Detector Measurement Errors

Unfortunately, it is unavoidable that detectors produce erroneous measurements. In the ASTRA loop detector data, these events are characterized either by completely missing data (entire event was not recorded) or by missing values for certain quantities, e.g. for the velocity of a vehicle. This case is indicated in the ASTRA detector data by events with an **N/A entry** (not available) for the missing quantity. For the derivation of macroscopic traffic quantities, it is, understandably, important to identify both situations, entirely missing records and partially missing values, before any further calculations are made.

Clearly, detecting entirely missing data from detector data files is impossible without further knowledge of the traffic situation at nearby detectors. A number of approaches exist to either detect from other detectors or directly incorporate missing records into a traffic information/prognosis tools, see e.g. [van Lint, 2005]. Most of these methods rely on some sort of artificial intelligence such as Bayesian networks or neural networks, which either try to guess the missing records or entirely switch off spurious input from such detectors. In the current work, we do not focus on such methods but instead choose sample data where no obvious missing data occurred. Consequently, the only measurement errors that have to be accounted for are N/A entries which mostly occurred for velocity measurements. Instead of using well-known, but rather involving techniques to guess the missing values, we employed the naïve approach and substituted the missing velocity values with the allowed speed limit. This approach leads, in general, to an overestimation of the velocity since the vehicle speed probably was not higher than the limit, but could well have been lower, for instance if a congestion occurred. We believe, however, that this effect is negligible since in the congestion case a large number of measurements per aggregation time are available, such that our "wrong guess" would have little statistical influence.

Deriving relevant Quantities from Raw Data

From the measurement of a single car we cannot make any statement about the traffic situation on the road. With regard to loop detector data, two steps must be made to arrive at useful statistical quantities that reflect the traffic on a road segment: First, traffic is a macroscopic phenomenon, requiring the transformation of single car measurements into macroscopic quantities such as density or flow. In other words, from the measurements of a few detectors, we wish to estimate the macroscopic, spatially extended traffic variables

on the entire road segment between the detectors. Second, we need enough statistics for these macroscopic quantities. This amounts to a time averaging of single car measurements over a short time span, called the aggregation time T_A (typical aggregation intervals range from 15 seconds up to 15 minutes). The entire process, time averaging and transformation of single car data into macroscopic traffic variables is in this report referred to as **traffic data aggregation**.

The most fundamental macroscopic traffic variables are **local speed, density and flow** (also referred to as **traffic volume**). By local we mean that they depend on the spatial position x on the segment. They are defined as follows:

- **Local traffic flow q (Verkehrsfluss, Traffic Volume)**

$$q(x) = \frac{\Delta N(x)}{T_A}$$

where $\Delta N(x)$ is the number of vehicles passing the cross Chapter at position x in the aggregation time interval T_A .

- **Local traffic density ρ (Verkehrsdichte):**

Traffic density denotes the spatial density, i.e. the amount of cars per length of the road at a given location x . It can be obtained from the local traffic flow $Q(x)$ and the current velocity $v(x)$ at that location:

$$\rho(x) = \frac{q(x)}{v(x)}$$

- **Local mean velocity v :**

The local velocity $v(x)$ is the average velocity at position x of vehicles in the aggregation interval, and therefore corresponds to the well-known arithmetic average

$$v(x) = \frac{1}{N_C} \sum_{i=1}^{N_C} v_i(x)$$

where N_C is the number of cars passing the location x in the aggregation time interval T_A and $v_i(x)$ is their individual velocity.

- **Local harmonic velocity mean \tilde{v} :**

The harmonic velocity mean is defined as

$$\overline{v(x)} = \frac{N_C}{\sum_{i=1}^{N_C} \frac{1}{v_i(x)}}$$

The difference between the local harmonic velocity mean and the local mean velocity $v(x)$ is that the harmonic mean provides a velocity averaging not in time, but in space.

Difference between Local Mean Velocity and Local Harmonic Velocity Mean

There is a subtle but extremely important difference in the two velocity definitions above. It can be rigorously shown that the two definitions do not yield the same value in general, that is, the local mean velocity is systematically larger than the harmonic mean. Physically, the difference between the two is the following: The harmonic velocity mean corresponds to the average speed over a given road segment. The local mean velocity, in contrast, corresponds to the average velocity within a given time interval. Abbildung (Anhang) 8 illustrates the difference. Consequently, it depends on the type of application which of the two velocity means has to be used. For instance, for the reconstruction of travel times between road segments from detector data it is absolutely crucial to use the harmonic mean, which represents the average velocity on that particular segment. The arithmetic mean would systematically overestimate velocities such that the travel times would be underestimated.

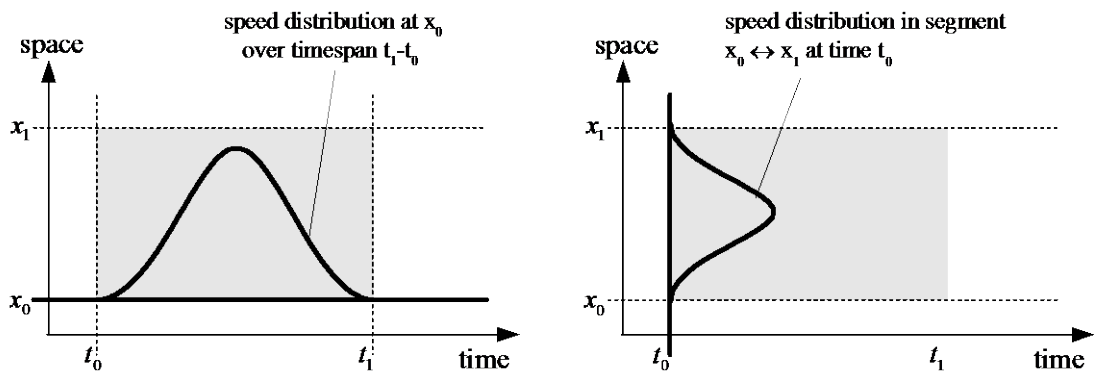


Abbildung (Anhang) 8 Illustration of the conceptual difference between averaging speed over a given time interval (left) and averaging speed over a road segment. The two distributions in general do not coincide

Apparently, according to literature [van Lint, 2010]), this subtle difference in averaging is not very well known, such that many detector installations in countries outside Switzerland perform the arithmetic velocity averaging at the detector site to reduce the amount of data. This renders the data inadequate for travel time reconstruction and forecasting. Thanks to the fact that ASTRA detectors record each individual event, the correct averaging method can be applied straightforwardly and allows a much broader use for analysis and forecasting applications.

Optimal Choice of Aggregation Time T_A

An important question concerns the choice of the aggregation interval T_A , since this has an effect on the quality of the statistics, and consequently, could affect the forecasting precision. The vehicle velocities, in particular, undergo large fluctuations which often occur during the night.

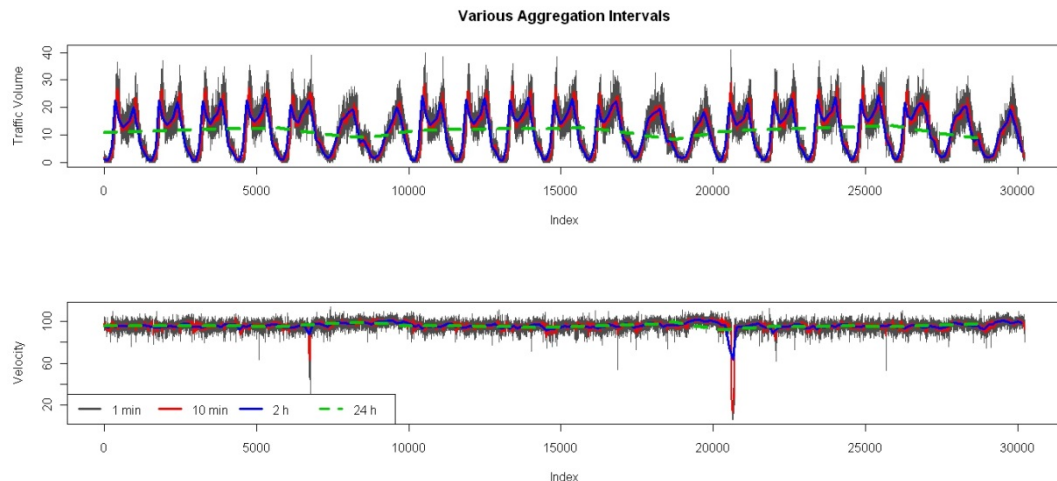


Abbildung (Anhang) 9 Various aggregation intervals leading to different degree of resolution. Short aggregation intervals lead to highly volatile data, longer intervals smoothen the short scale variations until even daily patterns are smeared out

Using 30 seconds or 1 minute aggregation intervals then leads to strong fluctuations of the local mean velocity v , as illustrated in Abbildung (Anhang) 9. This is problematic: The data suggest that vehicles do not travel according to the speed limit, but it is difficult to assess if this is due to an actual congestion or simply because a few vehicles drove at reduced speed for unknown reasons. If, on the other hand, if the chosen aggregation time is too large (e.g. 15min), features such as short velocity drops are smeared out in the aggregation process. Additionally, the onset of a traffic jam is in the worst case only reflected in the data after 15 minutes. It is therefore not clear, from looking at the data, which

aggregation interval leads to best forecasting performance. For this reason, we aggregated all detector data with different aggregation times (e.g. 30s, 1min, 2min, 3min, 5min, 10min, and 15min) in order to later compare the influence of the aggregation time.

In particular for small aggregation times, the obtained statistics during the night time would be very bad since there are simply not enough vehicles (or even none) that were recorded in the aggregation interval. To solve this remaining problem, we adaptively changed the aggregation time in the following manner:

Whenever the **number of events** in the aggregation time T_A was **below 5**, we increased the aggregation time, used for the calculation of the velocities, in multiples of T_A **until more than 5 vehicles were measured. This procedure results in a time series with equidistant measurements with a guaranteed quality of statistics.**

Travel Time Reconstruction

To reconstruct travel times between two points along a route, various techniques exist:

- **Video number plate identification:** Using vehicle identification by means of automatic license plate recognition, the precise travel time between two video stations can be calculated very easily. If the plate identification works well enough, highly accurate travel time reconstructions can be made. Due to the high complexity in requirements (video stations, license plate identification software), this method, although promising, is not yet in widespread use.
- **Floating car/cell data:** Using floating car data, travel times can be directly measured, and the average travel time is easily derived. For good statistics, however, a large percentage of cars would need to be equipped with the floating car data devices.

Travel time estimation from detector data: Loop detectors are in widespread use in the Swiss highway network. In contrast to the other two methods travel time reconstruction is more involved, since detectors only provide vehicle data at certain points along a given route. A pattern matching approach can be used to identify groups of cars, such as the method proposed by [Steiner, 2008]. Although their method seems to provide very precise travel time reconstructions, the method is relatively complicated as it needs tuning of additional, road segment specific parameters. An alternative, statistical approach interpolates travel times via the so-called piecewise linear speed-based trajectory algorithms (PLSB algorithm)

In the current work, only detector data was available. We chose to use the PLSB algorithm to reconstruct travel times from the detector data. PLSB was developed by van Lint in [van Lint, 2005] in 2005. Essentially, the algorithm uses the harmonic velocity mean as an approximation of the average speed in the detector upstream section. The travel time is then reconstructed by “placing” a virtual vehicle at the beginning of the road segment and integration of its trajectory, until it reaches the end of a segment. The time for this passage is then (statistically) the average travel time. The method is straightforwardly applied to longer road sections with multiple detector stations in between. The quality of the reconstruction is not limited by the road segment length, but depends on the density of detectors at typical congestion sites. For the test cases considered here, which consist of road segments with reasonably good detector coverage, the PLSB algorithm is therefore expected to yield good enough results. Details of the method are described in [van Lint, 2005].

III.1.2 Properties of single Detector Traffic Data

Stationarity of Traffic Time Series

A time series is stationary (or more precisely can be made stationary) if we can define time intervals, after which the series looks again “essentially the same” (mathematical definition see [Brockwell, 2002]). If we manage to transform a time series into a stationary series, the choice of models to represent the series is severely narrowed, essentially

down to the class of ARIMA models¹⁵. This requirement is usually not met for traffic data (see Chapter 4.2)

The non-stationarity of the time series can be analyzed in more detail: by subtracting a (deterministic) underlying pattern. Finding this pattern is a non-trivial question that is addressed mainly in Chapter 4.5. For a first glance, we just subtract the average daily patterns (e.g. Monday, Tuesday, ..., Sunday) from the data. The result is shown in Abbildung (Anhang) 10. This picture is rather instructive because it clearly shows that average daily patterns do not capture all the deterministic behavior of the time series:

- the strength of the fluctuations follows an additional possibly daily pattern
- the pattern is clearly violated at singular events
- the remaining time series is therefore not stationary¹⁶

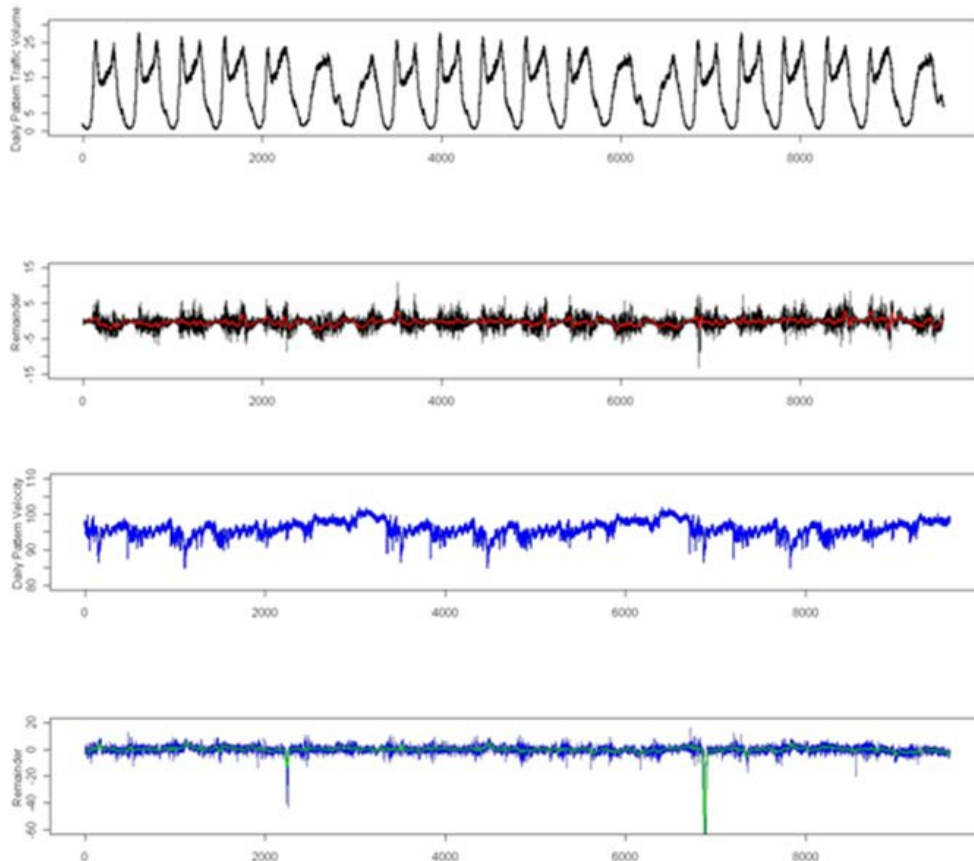


Abbildung (Anhang) 10 Traffic Volume average daily pattern and remainder (top) and Velocity average daily pattern with remainder (bottom). The average patterns do not capture all the (deterministic) behavior. 3 minute aggregation intervals are used on data from detector AG14

Deterministic Pattern and White Noise

The goal of classical time series analysis is to fit a model to a time series, such that deterministic structures are explained and remaining stochastic differences between model and reality are just a white noise error series¹⁷ (possibly with estimated error distribution).

¹⁵ This stationary series can be modeled through a deterministic part based upon past values and on top of that a stochastic part. That stochastic part can be modeled with an ARIMA model (Wold decomposition, see [Brockwell, 2002]).

¹⁶ There are statistical tests to assess stationarity of a time series, see [Brockwell, 2002].

¹⁷ A white noise process can be defined more mathematically through the lack of correlation. Typically, a slightly stronger concept of Gaussian white noise is used, where the process just consists of independent, normally distributed errors.

Succeeding with this means that a model explains all of the hidden structure and remaining errors cannot be reduced further.

For forecasting we then use:

- the model to predict an expected value of the time series
- the error series to predict confidence bands for the forecast.

In contrast to the white noise, typical traffic series show massive dips and patterned volatility¹⁸. It becomes evident from data analysis that approaches trying to describe traffic as a regular underlying pattern covered with uncorrelated white noise cannot work. Such approaches are however often taken as (low level) benchmarks for more sophisticated approaches (see e.g. [Williams, 2003]).

Linearity

Another crucial assumption for applying standard models to traffic time series is linearity. Linearity means that the value at time t can be represented as a linear combination of past values and a noise term. This is a very restricting form since most of the processes we observe are (highly) non-linear. Due to the non-global-stationarity, we cannot hope for global linearity. This is illustrated in Abbildung (Anhang) 11.

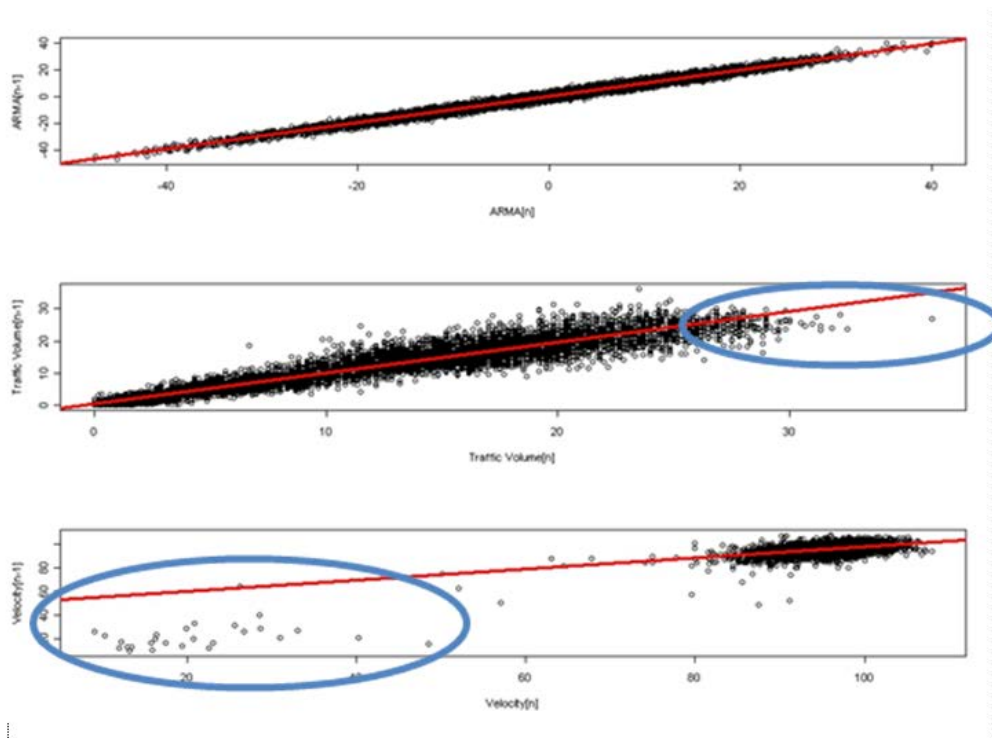


Abbildung (Anhang) 11 Assessing linearity. In a linear model, here an ARMA(2,2) model (top), the relation between sequent values is linear. Traffic time series (exemplified through the Traffic Volume at detector AG1411 (middle) and the corresponding velocities (bottom) exhibit partially linear behavior in the regular regime. In jamming situations (blue ellipses: low velocities, high traffic volume), the time series becomes non-linear.

In Chapter 4.5 we will analyze how linear models fit to parts of traffic time series. Due to the absence of global linearity, such models will not capture the full time series, but will have to be locally adjusted.

Comparison between Velocity and Traffic Volume

It is visible from e.g. Abbildung (Anhang) 10 that velocity as well as density follow, to an extent, a daily pattern. This pattern is followed by density with a small variation, whereas

¹⁸ There are mathematical tests for white noise (see [Brockwell 2002]).

the variation in velocity is rather high. How concretely velocity and traffic volume are linked is not obvious. A linear correlation analysis is shown in Abbildung (Anhang) 12, where we see that depending on the time lag, the correlation behavior changes. Everything outside the horizontal blue lines can be considered a significant correlation. A correlation test at lag 0 (meaning that we compare velocities and traffic volumes always at the same times) yields a highly significant correlation with value -0.15 . It must be said here that such a correlation analysis does not work well for traffic data due to

- the non-linear behavior of the single time series
- the non-regular interaction between velocity and traffic volume

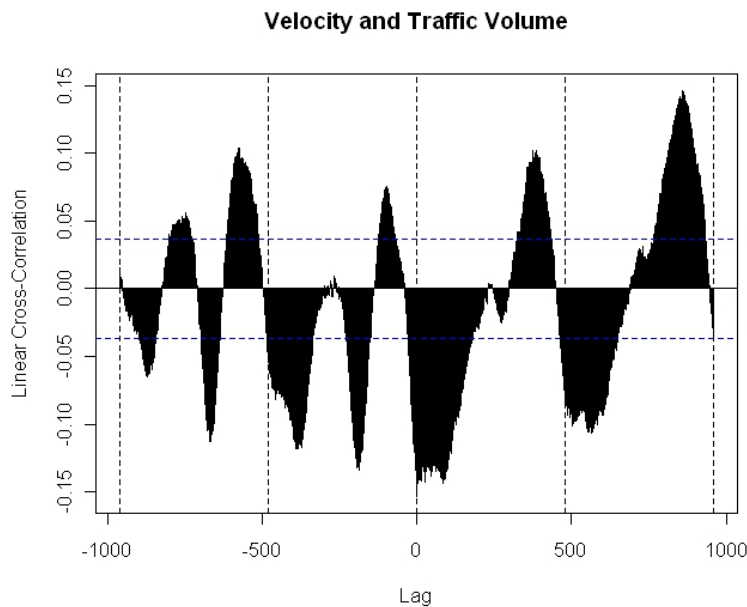


Abbildung (Anhang) 12 Linear cross correlation between velocity and traffic volume with maximal lag of 2 days (vertical lines correspond to days). 3 minute aggregation of data from detector AG1411

The non-regular interaction between velocity and traffic volume can be best observed from the fundamental diagram in Abbildung 24 (main text).

III.2 Multivariate Properties of Traffic Data (Kapitel 4.3)

III.2.1 Clustering and Classification: Pattern Matching Methods

One of the most widespread approaches for traffic forecast is based on pattern matching (see Chapter 2.2.4). For this, the historical (daily) time variation curves of each detector are stored in a database and used as a reference. The actual time variation curve is compared to these reference curves and the most similar curve(s) are used for predictions. This problem is a classification task for which many different classifiers have been proposed. The prototypical process is depicted in Abbildung (Anhang) 13. As the corresponding reference database would rapidly increase in size, the data is usually prestructured and compressed by clustering algorithms and forecasts are based on cluster representatives.

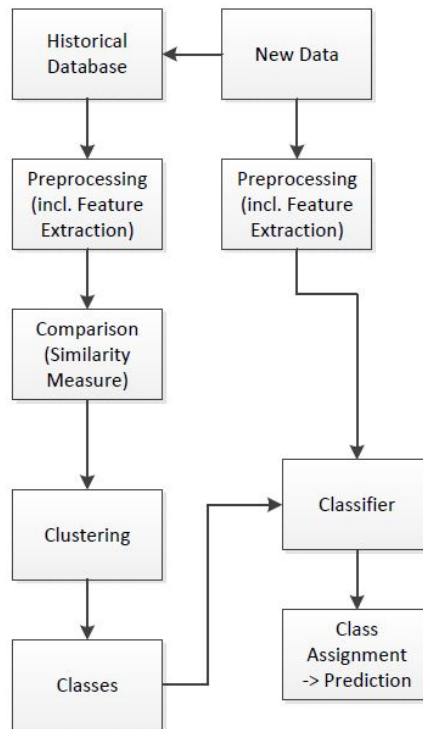


Abbildung (Anhang) 13 Logic of clustering-based predictions by pattern matching.

For a modern high-performance forecast system we do not consider the pattern matching approach alone as sufficiently powerful. We however believe that it will be useful in many respects:

- Preprocessing the data by pattern matching methods will increase the efficiency of short-term forecasting methods
- Pattern matching can be used to detect special or unknown traffic situations
- Pattern matching might be used for long-term forecasting (more than a few hours) as it presumably is the best method in this situation.

Experiments

We performed a couple of tests to evaluate the potential of pattern matching methods for traffic data preprocessing. The analysis is confined to standard methods and algorithms. The corresponding results already reveal a clear structure to the traffic data. We thus expect that more elaborate (i.e. situation-adapted) methods will depict a structural picture of an even higher resolution. Some remarks regarding the Tabelle 51:

Tabelle 51 Methods used

Method / Step	Explanation	Remarks
Distance measure / Similarity measure	The distance measure determines the similarity of two time series / time variation curves	So far we only used the Euclidian distance applied to the full daily variation curves (for the traffic density). There is a lot of room for improvements and fine-tuning in this step (such as using more elaborated distance measures, including other information etc.)
Principal Component Analysis PCA	Linear dimensionality reduction technique	PCA was only used for visualization purposes so far. It might also be used for preprocessing (feature extraction).
Clustering	Algorithms for data grouping	We only tested standard methods: Hierarchical methods (single linkage, Ward's method, centroid method) and k-means. There is again room for improvements in this step.
Evaluation	Evaluation of the performance of different methods	Generally difficult since no reference solution exists. The analysis so far was evaluated by visual inspection and a plausibility check.

Example

On the following pages the clustering results for one example are illustrated. Some Details about the data (Tabelle 52):

Tabelle 52 Data used for clustering example

Detector	Umf. Winterthur (CH093)
Time series content	15 min sum of count data
length	182 days (26 weeks)
season	16/01/2011 – 16/07/2011

The following Abbildung (Anhang) 14 depicts three different views of a PCA, using the first 3 principal components. One can clearly distinguish three clusters, approximately corresponding to Sundays, Saturdays and work days as a further clustering analysis will show.

K-means clustering:

The following Tabelle 53 contains a typical result from a clustering analysis with the k-means algorithm (for k=5). The numbers in the matrix reflect the cluster numbers. The order of the numbering is arbitrary. The clusters reflect the weekly day pattern, confirming the day of the week is an important factor for traffic forecasting.

Tabelle 53 Clustering results (K-means algorithm). The table contains the labels of the clusters

Week	Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday
1	4	1	1	1	1	3	4
2	4	1	1	1	3	5	2
3	4	1	1	1	1	5	2
4	4	1	1	1	3	5	2
5	4	1	1	1	1	5	2
6	4	1	1	1	3	5	2
7	4	1	1	3	3	5	2
8	4	1	1	3	3	5	2
9	4	1	1	3	3	5	2
10	4	1	1	3	3	5	2
11	4	1	4	3	3	5	2
12	4	1	1	3	3	5	2
13	4	1	3	3	3	5	2
14	4	1	3	5	5	2	2
15	4	4	1	3	3	5	2
16	4	1	1	3	3	5	2
17	2	1	3	3	3	5	2
18	4	1	3	3	3	5	2
19	4	1	3	3	3	5	2

20	4	1	3	5	2	2	2
21	4	1	1	3	3	5	2
22	4	4	3	3	3	5	2
23	4	1	3	5	3	5	2
24	2	1	3	3	3	5	2
25	4	1	2	3	5	5	2
26	4	1	3	3	3	3	2

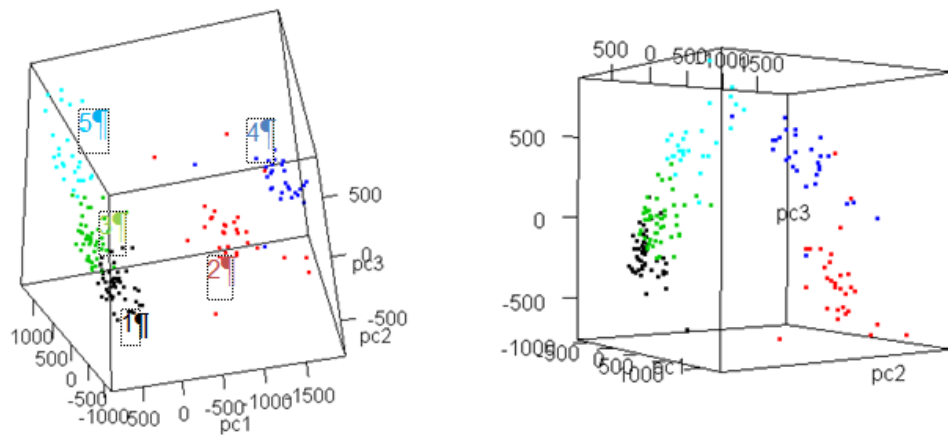


Abbildung (Anhang) 14 PCA representation of the clusters found by k-means ($k=5$). The colours correspond to Table 25

Hierarchical Clustering:

While the results obtained by Ward's clustering (Abbildung (Anhang) 15) are similar to k-means, the centroid gives a slightly different clustering as the Sunday cluster is split again. From a methodological point of view, these results show that clustering does not obtain a clear-cut solution. The choice of the method has to be made in accordance with the requirements of further data processing.

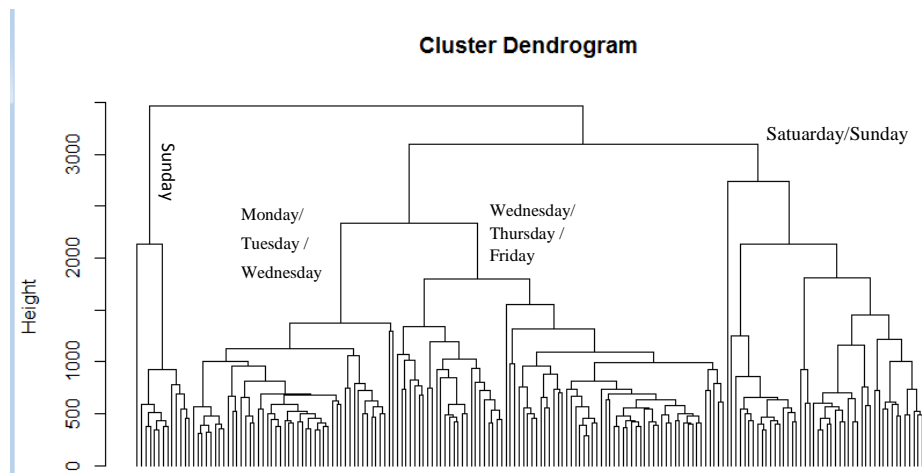


Abbildung (Anhang) 15 Dendrogram for centroid hierarchical (Ward's) clustering

III.2.2 Influence of Weather

It is suspected that rainfall / weather in general has an impact on road capacities, showing through changing shapes of the fundamental diagram (velocities vs. traffic volume). In this chapter we use classical statistical testing to support this suspicion. Similar heuristic methods can be applied to other influence factors to get a first idea of their impact.

Used Data

Daily rainfall (mm), sunshine (min), snow (cm) and temperature (°C) values were downloaded from the IDAWEB website for the selected 6 months (<https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/system/stationList.do>) for the Zürich/Kloten weather station. This was found to be the closest weather station to the selected detectors (Winterthur area) which measured all the required values. The daily rainfall values can be seen in Abbildung (Anhang) 16. It was decided to look at the effect of rainfall as a first step.

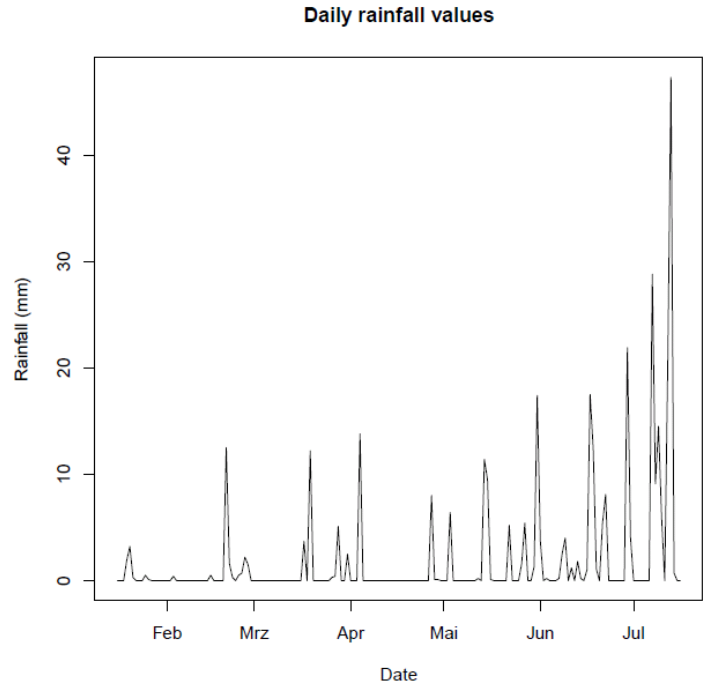


Abbildung (Anhang) 16 Daily Rainfall from weather station Zürich/Kloten

Classification Results

In Abbildung (Anhang) 17 we show the fundamental diagrams of dry, wet and very wet days. The difference between dry and wet/very wet is optically recognizable. To support the visual intuition, Wilcoxon tests have been used to asses, whether the medians of the velocities in the three situations are significantly different. The results show a significant difference between dry and wet ($p < 0.001$), as well as between dry and very wet ($p < 0.001$), but none between wet and very wet ($p = 0.6$).

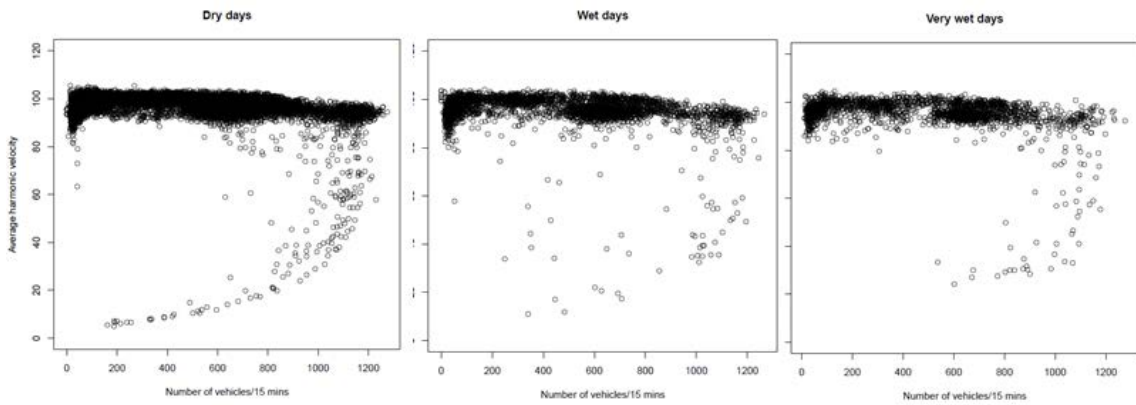


Abbildung (Anhang) 17 Fundamental diagrams for dry, wet and very wet days. A slight difference can be seen optically, but it is not clear, whether the weather is the only effect causing it.

It is important to mention that an analysis such as above does not directly lead to an improvement of prediction algorithms. Clustering of weather situations is a more sophisticated way of correlating weather data to observed traffic data, but also with this, a direct improvement of prediction is not yet given. It is an important question to be dealt with in a system, how such results can be beneficially included into the prediction algorithms (see also chapter 4.5

III.2.3 Methods to Detect Correlations and Causalities in (Traffic) Time Series

Predicting road traffic, and traffic jams in particular, constitutes a complex problem. To large parts, the difficulty is that there is no complete model that describes “traffic” including all its contributing influence factors. For instance, we can imagine that weather conditions change the probability for traffic jams, but it is not clear in what way and if this influence is at all relevant in the plethora of other influencing factors such as sports events, workday rush hour etc. Naively, one is tempted to simply include as many factors as possible. This, however, critically increases the necessary computing power to fit a model. It also does not necessarily lead to better forecasting and can sometimes even lead to worse forecasts. If we include n influence factors the prediction model becomes increasingly hard, and - due to the lack of enough validation data - possibly leads to completely wrong prediction models. It is therefore, in general, advisable to first identify and include only the most relevant influence factors.

Identifying relevant influence factors is itself a hard task due to the lack of a proper experimental system. We simply cannot probe traffic evolution without weather influence vs. traffic evolution with weather influence for real traffic. It is therefore next to impossible to arrive at an accurate physical (first principle) model for real traffic that includes external factors such as weather influences. Instead of physical modeling, statistical methods from time series analysis typically have to be used. The basic task then is to consider two or more time series, and evaluate if there is any statistical evidence that the time series are related in one way or another. This is still a hard task, illustrated in *Abbildung (Anhang) 18* Two time series $x(t)$ and $z(t)$, where $z(t)$ is given as a function of $x(t)$. Even in this simple functional relationship, no relationship between the time series is evident without a closer analysis. In the example shown, there is a simple functional relationship between $z(t)$ and $x(t)$. Due to the randomness of $x(t)$ the functional dependence, however, is not recognizable anymore, and elaborate methods have to be used to detect it.

There are essentially three conceptually different approaches used for identifying relationships between time series, see *Tabelle 54*:

Tabelle 54 Conceptually different approaches used for identifying relationships between time series

Method	Description
Linear regression / correlation analysis	Assumes that there is a linear relationship between two time series with a certain delay (“lag”), and then tests the confidence of this assumption. Can be used in simple cases where the linear relationship is justified, but fails to identify arbitrary nonlinear relationships or situations with multiple lags. Usually no causality can be derived.
Granger causality	Granger causality considers the identification of relations as a prediction problem: If we can better predict time series A by inclusion of time series B, then we say that B has an influence on A. Granger causality is an improvement over linear regression by incorporating causality measures. It still assumes a linear relationship between the two time series under consideration
Transfer entropy	Information-theoretic approach without any model assumption, i.e. works for arbitrary nonlinearities in the coupling between the time series. Transfer entropy is a relatively new method which looks promising, but also poses some computational challenges.

It should be noted here that a number of authors choose a fourth way to identify relations between time series. The idea is to use any statistical prediction method (ARIMA, neural networks etc.) and then test if the predictive power of the model increases when a second time series is taken into account. In our opinion, this approach alone is not optimal since a difference in the predictive power could simply be due to a bad statistical prediction model or bad fitting of the involved model parameters, and hence in general does not allow any conclusion regarding relevance of an influence factor.

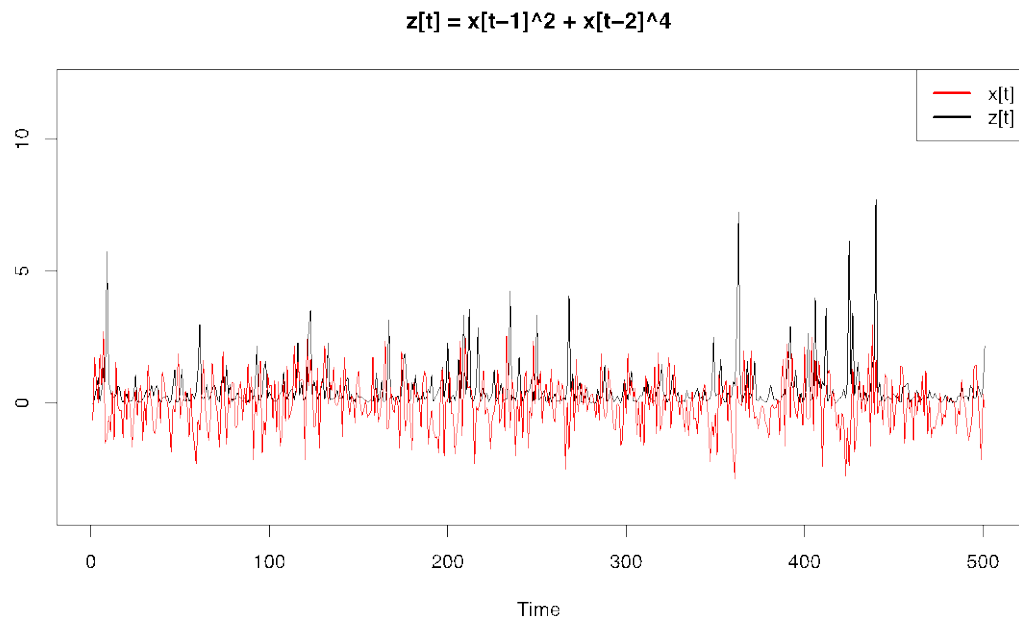


Abbildung (Anhang) 18 Two time series $x(t)$ and $z(t)$, where $z(t)$ is given as a function of $x(t)$. Even in this simple functional relationship, no relationship between the time series is evident without a closer analysis

In the following we will quickly outline the characteristics, i.e. advantages and drawbacks, of the three methods. A more detailed discussion can be found in [ZHAW/Rapp, 2012c].

Note: In order not to confuse different concepts, we will use the following notation (Tabelle 55):

Tabelle 55 correlation and causality - concepts

Term	Description
Relationship between time series A and B	Denotes any general relationship between two time series, no matter the statistical nature.
Correlations between two time series	Describes traditional correlations between two time series by means of standard correlation analysis. No information about causality is contained.
Causality between time series	Refers to a causal relationship between two time series, i.e. time series A causes in some way or another the future of time series B. This measure is asymmetric, that is, if A causes B, then usually B does not cause A. As such, causality provides a means to measure the flow of information.

Linear Correlation Analysis

Linear correlation analysis tests whether there is a significant linear relation between two time series at different lags. Hereby, typically some stationarity is assumed. Linear correlation is assessed through a “cross correlation function”, exemplified in Abbildung (Anhang) 12. In this example, the strongest correlation can be found around lag zero, which is intuitively expected for velocity and traffic volume.

The concept of linear correlation clearly breaks down if the dependence of the time series is non-linear. This is the case for velocity and traffic volume (regular flows and congestion situations impose different relations between velocities and traffic volumes). This break down is observable through the unexplainable fluctuations in correlation in Abbildung (Anhang) 12. The pattern repeats itself on a daily basis (480 lags), but the fluctuations within a day are artefacts of non-linearity.

Examples where linear correlations work well or fail can be found in [ZHAW/Rapp, 2012c].

Granger Causality

Granger causality is a statistical test for determining whether a time series is useful in forecasting another. One says that a time series A Granger causes another time series B if it can be shown - by means of statistical tests on different lagged versions of A and B - that time series A contains useful information for predicting time series B. Clearly, Granger causality provides more information than a standard correlation analysis, since it reveals the direction of information flow.

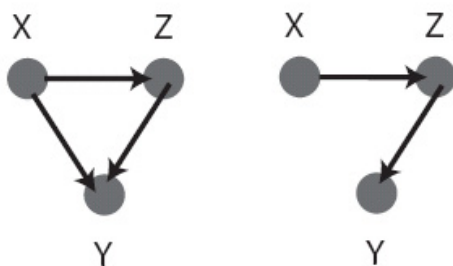
Granger causality is a model-based method to test causalities. Its mathematical foundation lies in linear regression analysis with the following basic idea: Suppose that the stationary time series B is modeled by a linear autoregressive model (see Chapter 2.2.4) that contains p lagged values of the stationary time series A:

$$A(t) = \sum_{j=1}^p a_{1j}A(t-j) + \sum_{j=1}^p a_{2j}B(t-j) + E(t)$$

This means that the time series A is modeled by historic values of itself (first term) plus historic values of B (second term) and a noise term (last term). The idea is then to statistically test if the coefficients a_{2j} are significantly different from zero, which would indicate that A is better modeled by taking B into account. By reversing the role of A and B, the causality can be tested in the reverse direction.

Granger causality has the following important properties:

- **Linearity:** In the above form, Granger causality can only give information about linear causalities between time series A and B, since it is based on a linear model. There are nonlinear extensions, but they are usually difficult to use in practice and their statistical properties are less well understood.
- **Stationarity:** Both time series need to be stationary, since the employed regression models require stationarity. An extension to non-stationary cases is, however, possible using the usual moving window approaches (see e.g. [Hesse, 2003]).
- **Bivariate:** In the above formulation, only the causality between two time series is assessed. If we have $N > 2$ time series, it is tempting to perform pairwise bivariate Granger causality tests as described above. This, however, often gives misleading results. For instance, the two situations below between time series X, Y, and Z cannot be separated using pairwise tests:



For $N > 2$ time series, a multivariate extension of Granger causality should be used. The procedure here is roughly the following: One says that X_1 Granger causes Z, if lagged observations of X_1 help predict Z when lagged observations of all other time series X_2, \dots, X_N are also taken into account. This multivariate Granger causality is successfully used, e.g., in neuroscience for the analysis of EEG data, and could be readily applied to traffic data (see, e.g. [Ding, 2006]).

Of the above limitations, the linearity assumption is the most problematic one. Granger causality often fails to detect the causality in the non-linear case (examples can be found in [ZHAW/Rapp, 2012c]).

Information Theory Methods & Transfer Entropy

The main drawback of Granger causality is the linear model assumption. Even though nonlinear extensions exist, it would be, in general, advantageous to use model-free approaches which do not a-priori assume any underlying functional form of the time series or the relationship between them. There is an entire class of such methods and they all consider causality detection as a problem of information theory. The basic idea in these “information theoretic” approaches is the following. Suppose we have a stationary time series X . Irrespective of the underlying model, a basic concept of information theory starts from the idea that one needs N abstract symbols x_i to code the signal – N can be arbitrary large and we also do not need to know the underlying model. The *entropy* associated with this coding is the well-known Shannon entropy S , given by

$$S(X) = - \sum_{i=1}^N p(x_i) \log(p(x_i))$$

where $p(x_i)$ is the probability that symbol x_i is encountered in the series. Roughly speaking, the Shannon entropy provides the following interpretation: High valued Shannon entropy means that the uncertainty in predicting the next symbol is large, while small entropy means that it is rather easy to predict the next symbol. The Shannon entropy is easily extended by a second time series Y by using the joint probability functions $p(x_i, y_i)$ in the above expression, yielding the Shannon entropy $S(X, Y)$ (extensions to more time series are straightforward).

From the theoretical basis of the Shannon entropy $S(X, Y)$ of two time series, a number of ideas have been derived to assess causality in between X and Y . A common one is the concept of mutual information, which measures the deviation of $S(X, Y)$ from the entropy of X and Y as independent processes. Consequently, a non-zero mutual information means that some information is shared between the two time series X and Y . The higher this value, the more a prediction will benefit from taking the other time series into account.

While theoretically simple and appealing, mutual information is only a measure for shared information and does not contain any information about the causal relationship. A number of attempts have been proposed to incorporate causality into the mutual information concept, the most promising and theoretically convincing one being the transfer entropy method of Schreiber (see [Schreiber, 2000]). The underlying idea is to measure information flow from previous values of the time series to the next value, formally expressed by

$$T_{Y \rightarrow X} = \sum_{x_{n+1}, x_n, y_n} p(x_{n+1}, x_n, y_n) \log(p(x_{n+1} | x_n, y_n) / p(x_{n+1} | x_n))$$

The above expression essentially measures how much is gained in predicting x_{n+1} from past values x_n and y_n compared to a prediction without the values y_n . This idea sounds similar to the concept of Granger causality, but does not assume any underlying coupling model between X and Y . Instead, the transfer entropy only requires a measurement of the various probabilities from existing data. As such, the method is very attractive and has been used in contexts ranging from EEG analysis, music analysis or climate research. It is also important to note that it is straightforward to extend the transfer entropy concept to multiple time series without conceptual difficulties.

The transfer entropy method has two essential drawbacks, in our opinion:

- **Estimation of joint probabilities & coarse graining:** A general problem is the estimation of the joint probabilities $p(\dots)$ that are needed in the sum above and have to be estimated from (limited) experimental data. The more additional time series are taken into account, the more difficult it is to estimate them from the existing data. Additionally, for processes with continuous values x_n and y_n , a coarse graining has to be made to arrive at estimates of $p(\dots)$. Unfortunately, the obtained results can vary depending on the coarse graining process, with the precise details not yet clearly understood.
- **Curse of dimensionality:** The transfer entropy above requires (theoretically) to sum over all infinitely many previous values of the time series X and Y , requiring, in fact, the estimation of infinite dimensional joint probabilities. This property of transfer en-

trophy became known as the curse of dimensionality. It can be argued that there must exist a certain lag beyond which there is no coupling, thus effectively reducing the problem to finite dimensions. The determination of this cutoff-lag, however, is non-trivial. A number of approaches have been used so far to estimate the cutoff-lag with varying success, and typically require careful tuning for specific applications. One of the newest and promising method has recently been proposed by the group of J. Kurths in 2012 (see [Runge, 2012]). In their approach, the curse of dimensionality is elegantly circumvented by combining the problem with a graph-theoretical approach.

- **Interpretation of results:** The transfer entropy returns a single number characterizing the strength of coupling in units of entropy. This measure is difficult to interpret, since it does not have a distinctive meaning like a correlation coefficient, significance level etc. Instead, it can be only regarded as a relative measure, as will be seen also in the examples considered.

The following examples can be found in Zwischenbericht AP3/4 [ZHAW/Rapp, 2012c]:

1. **Linear relationship:** A simple linear coupling, which can also be detected using Granger causality or correlation analysis.
2. **Nonlinear bivariate relationship:** The nonlinear relationship between two time series is detected when compared to other unrelated time series.
3. **Nonlinear multivariate relationship:** Multiple time series coupled in a nonlinear fashion are considered and it is shown that the transfer entropy method is able to recover the causality relations.
4. **Nonlinear multivariate relationship variable coupling strength:** A multivariate nonlinear coupling is considered where two time series influence the third one, and it is analyzed how the transfer entropy changes as the coupling parameters are varied.

III.3 General Forecast Strategies and Quality (Kapitel 4.4)

III.3.1 Forecast Quantities

The following Tabelle 56 summarizes properties of possible quantities which can be used as input to forecast methods or that can be forecasted themselves.

Tabelle 56 Properties of possible quantities

Quantity	Availability	Predictability	Usability
Traffic Volume	directly through detectors	uni-/multivariate time series	only in combination with other data; no direct information on travel time
Velocity	directly through detectors	uni-/multivariate time series	information on travel time can be derived
Travel Time	derived from velocities (future: floating car data)	uni-/multivariate time series, neural network with velocity data	desirable output of forecast system.
Jam	derived from detectors; unclear how to quantify	clustering method, neural network, uni-/multivariate time series	for drivers psychology; to assess the appropriate choice of models / model parameters
Traffic Mixture	derived from detectors (possibly from origin destination patterns)	uni-/multivariate time series, possibly from origin destination pat-	no direct influence; may be useful in choice of models / model parameters

		terns	
Origin-Destination Matrix	requires a lot of external statistical data	from past origin-destination patterns, paired with external data (weather, holidays...)	clear forecast of road use. Does not directly yield information on travel time.
External factors (weather, calendar etc.)	depends on factor	external forecasts (weather) or deterministic (calendar etc.)	needs clarification (see also Chapter 6).

Traffic Volume

Traffic volume is the most “regular” quantity to forecast (see e.g. Abbildung (Anhang) 9). It is the easiest quantity to directly derive from detector data. Daily patterns are repeated rather accurately, except for some jamming situations, and some extended fluctuations. There are models (e.g. Seasonal ARIMA, Chapter 4.6) that capture the pattern rather well. Due to the dominance of the pattern, this is already a big part of the actual forecast.

Traffic volume is an interesting quantity as it can be used to assess origin-destination patterns, to evaluate road capacity and, in combination with velocity, to predict the formation of jams. However we cannot make any direct predictions of travel time from the traffic volume alone.

Velocity

Velocity data is “less regular” than traffic volume. The derivation of the time series can be done from detector measurements and an appropriate averaging approach (see Chapter III.1). Daily patterns are observable, but they do not dominate as strongly over the fluctuations as in traffic volume. Jamming situations cause a strong dip and models typically perform worse with prediction than for traffic volume (see again Abbildung (Anhang) 9).

The velocity is an interesting quantity as it can be used to derive travelling time (see Chapter 4.8). For the prediction of jamming situations, additional quantities (e.g. traffic volume) are required.

Travel Times

Travel time is a useful quantity to forecast. Data on travelling time could be obtained from floating car data, if available. Alternatively, traveling times can be indirectly assessed through velocity data from a combination of relevant detectors and their distances. For each origin destination pair, a single time series of travel time has to be obtained. Travel time inherently contains a forecast of the traffic development during the journey of interest. This forecast can be made explicitly with predicted velocities at the detectors along a given route or implicitly by training a prediction of travel time based on the current traffic situation with implicit extrapolation to future traffic development (see also Chapter 4.8). A third option is to apply some univariate time series model to the time series of travel time, without taking into account any specific velocity information from detectors along the route.

Jam

Traffic jams are difficult to quantify. Typically, an ordinal scale of varying classifications is used (see e.g. [Thianniwet, 2009]). Nevertheless, it can be of (psychological) relevance to a driver to not just know a traveling time, but also to know whether or not they are going to hit a jam. Also for the direct prediction of travel times, the dynamics of jams occurring, propagating and dissolving can be important since driver behavior may be completely different than under free-flow conditions, thus changing the properties of velocity forecast models.

One way of “quantifying” traffic jams is through the fundamental diagram of velocity and

traffic volume, as shown in Abbildung (Anhang) 12. There, the distinction between 3 regimes is done in a very simple way through the velocity alone (regular: velocity >80km/h, congestion 80>velocity>30, jam 30>velocity).

Traffic jam prediction is more difficult. The prediction of traffic jam categories could help improve the prediction accuracy of the forecasts through clever selection of models appropriate to the respective traffic situation.

Traffic Mixture

Traffic mixture could be an important trigger for the choice of models or model parameters. It can be directly accessed through detector data. Forecasting it is more difficult. There are two possibilities: a direct one is through floating car data or an estimation of the origin destination patterns of trucks, cars etc. A second method could be to predict the time series of traffic decomposition based on external inputs (holidays, weekdays, season etc.).

So far, we have looked at the harmonic mean velocities for cars/motorbikes as compared with that for all other (heavier) vehicles for some example detector data. The velocities of cars/motorbikes were found, in general, to be slightly higher than those of other vehicles.

Origin-Destination Matrix

The origin-destination matrix contains information on how many cars are driving from A to B. It is a dynamic quantity, so for realistic forecasts, it will have to be reacquired after a certain time interval, depending most likely on season, holiday calendar, weather etc. A single estimation of such an origin-destination matrix is already a challenge: it requires a huge amount of statistical data that is not directly obtainable from presently available sources. There are approaches to model origin-destination patterns, which are in use in Nordrhein-Westfalen, see [Pottmeier, 2004].

The origin-destination patterns could be very helpful in mid- to long-term prognosis (several hours to days / weeks / months) and would lead to a clear idea of road capacity and future traffic situations. One could also argue that these patterns are already inside the density data of the detectors, and thus are oblivious as inputs to traffic prediction. For short term prognosis, this is certainly something to consider. For mid- to long-term prognosis it will have to be tested, how well a system without origin destination patterns can perform. A lot of literature and application techniques concerning origin-destination matrices can be found in [Abrahamsson, 1998].

III.3.2 Concepts of Forecasting Traffic

In this subchapter general forecast strategies are described. Four such strategies are summarized in Tabelle 27 in the main text. In practice they can be combined with preprocessing model such as pattern recognition (clustering) approaches.

Description of the four strategies:

Univariate time series models focus e.g. on prediction of velocity or traffic volume at just one detector site. Univariate means that there is no (spatial) net structure behind the forecast. External factors (weather, calendar etc.) can be included, theoretically also data from other detectors could be used, but without back-interaction of the forecasted site to these. Conceptionally, a travel time can be estimated from the single predictions, but would require a combination of forecasts that are necessarily based upon different and adaptively changing forecast horizons. Due to this complication, an estimation of travel time through a univariate time series approach is not the first choice. But if it is about predicting an onset of traffic jams or about "instantly" changing some road properties (speed limits) due to expected traffic volume, these methods will provide a reasonable tool. Details are described in Chapter 4.5 and 4.6.

Multivariate time series are based upon a spatial net of various detector sites, interacting with each other. Predictions are done for all connected sites at once, external factors (weather, calendar) can be included. Again, as in the univariate case, travel time estimation is possible with this set-up, but not the primary strength. Various forecast horizons would have to be adaptively combined. Also with this strategy, the main use will be very short time forecasts of e.g. traffic volume or velocities to either predict onsets of jams or

to induce immediate measures (resetting speed limits etc.). Details are described in Chapter 4.7.

Direct travel time estimation: travel times can be estimated “directly” out of velocity data from different detectors. In this strategy, we will not forecast velocities at single detector sites to reconstruct travel times, but directly train an intelligent algorithm to predict travel times from current measured velocities. This strategy builds upon implicit forecasts of the actual traffic situation that are continuously updated on-trip. Details are described in Chapter 4.8.

Simulation models are usually applied to very long term traffic forecast (strategic planning etc.), see e.g. <http://senozon.com/de/> and require complex data input. The same methods can be applied to short term forecasts, typically of short road segments where e.g. a traffic jam is about to form or dissolve. In such settings, the data requirements are manageable. In contrary to statistical methods, simulations use physical concepts to predicted traffic.

Different Strategies for Various Prognosis Horizons

The first three methods (uni-/multivariate time series, direct travel time prediction) are particularly well suited for very short-term forecasts. How can the prognosis horizon be extended?

Let us first consider one single site and try to predict the traffic at that site some time into the future. The simplest strategy to extend the forecast horizon is to use longer aggregation intervals for velocities / traffic volume as sketched in Abbildung (Anhang) 19. It becomes clear in this picture that the longer the aggregation intervals, the smaller the resolution of fluctuations. First some short time fluctuations on top of the daily pattern disappear (e.g. short congestions or jams). Then the daily pattern itself is lost, after that the weekly pattern, and so on.

So there is a limit for extending the aggregation times to predict useful traffic patterns. Conceptionally it is also evident that irregular events occurring out of a current traffic situation (e.g. “spontaneous” congestions) cannot be predicted too far into the future. To capture such situations, a very precise knowledge of future traffic states is necessary, which is clearly unobtainable for longer prognosis horizons.

A different category is regular jams or traffic situations that occur due to external factors (e.g. Easter jam at Gotthard). Such traffic situations cannot be predicted without knowledge of these factors and of site specific properties (e.g. road capacity).

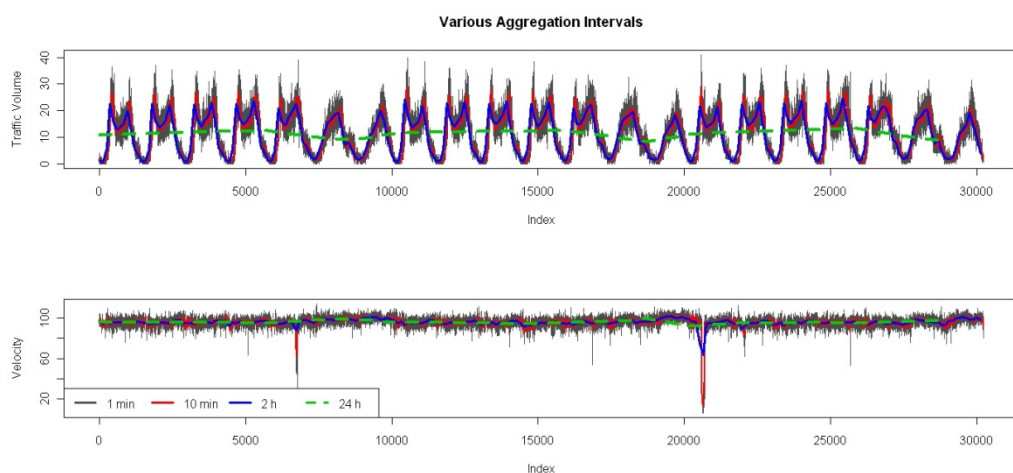


Abbildung (Anhang) 19 Data from detector AG1411 over 3 weeks, various aggregation intervals. Single events (e.g. the jam at data point 21000) are only resolved on fine enough scales

We can distinguish the following challenges concerning prognosis horizon at one particular site:

- **0 to approx. 30 minutes:** tested algorithms have been proven to be extremely accurate
- **30 minutes to approx. 1 day:** a hard challenge. The current traffic state has some influence, but external factors start playing an increasingly important role.
- **days to weeks / months:** the current traffic state has no influence anymore. External factors and general (site specific) patterns play the key roles.

The prognosis in horizons of 30 minutes to approximately 1 day is intuitively the most challenging. The transition between influence of the current traffic state and external factors needs to be understood and implemented using an algorithm. The demands concerning accuracy are typically high since the prognosis is “not too far into the future”. Abbildung (Anhang) 20 summarizes these statements.

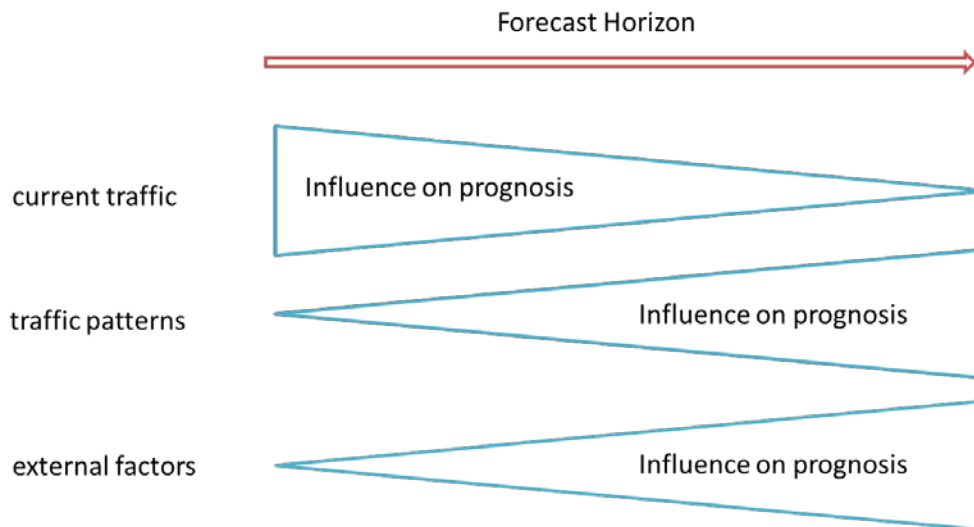


Abbildung (Anhang) 20 The influences of current traffic, traffic patterns and external factors vary strongly with the forecast horizon

A different question on prediction horizons is the dependence of the accuracy upon the length of a trip, leading through several detector sites. These difficulties are also an issue for horizons in the middle range (1-2 hours). Very short trips are not difficult to predict since the relevant traffic information is almost known or well predictable. Very long trips (several hours) are again rather unproblematic as there is a lot of time to average away possible prediction errors at single sites – if we hit congestion in the beginning of the trip, we may be a bit faster for the rest of the trip, compensating for the initial loss of travel time.

From all these arguments, it is obvious that different methods will have to be used for different prognosis horizons (be it at one site into the future or for trips of various lengths).

Optimal Combinations of Forecast Methods

The different strategies presented so far can also be combined to optimize forecast quality. Such combinations of methods and strategies have been already implemented in other areas of forecasting (finance, logistics) and have been proven to be rather successful. In order to determine an optimal combination of forecast methods, reasonable quality measurements for the predictions need to be defined. Examples of such measures are given in Chapter 4.4. Combined strategies based upon such measures will be discussed in more detail in Chapter 6.5.

III.3.3 Measures of Forecast Quality

There are various measures of assessing the quality of a forecast method or of comparing two different methods. Reductions of quality analysis to “single number” comparisons (e.g. Mean Average Percentage Error) offer easy decisions but typically simplify the relevant questions too much. Complete qualitative assessments (behavior, patterns, imple-

mentability etc.) capture important aspects of a method but do not yield “clear” arguments for a decision. In this section we will review some of the most prominent quality measures, stating their respective advantages and drawbacks.

Distribution of Residuals

A residual is defined as the difference between a predicted and an observed value. Residual analysis is one of the most frequently used tools in statistics to assess whether a model qualitatively fits the given data and to what expected precision. Residuals are very interesting for stationary data, where the distribution in dependence of time can be neglected. Traffic data is typically instationary, so with a residual analysis, the time-dependence is not taken into account.

A typical plot to look at is the histogram of residual, as shown in Abbildung (Anhang) 21. For this plot, the residuals are counted into “bins” (e.g. all residuals between 0 and 0.1, 0.1 and 0.2 etc. are counted). The bin centers are shown on the x-axis. The y-axis shows the percentage of observed residuals that fall into the respective bin. A zero residual means that observed and predicted values are the same, the larger the residuals, the higher the deviation. Therefore, histograms with a prominent peak at zero indicate high chances for small deviations, whereas long and fat tailed shapes indicate high probabilities for large deviations. In Abbildung (Anhang) 21, the smallest deviations are achieved with the green 10 or 15 minute parameter choice (the method behind this plot is travel time forecast based upon Artificial Neural Networks, see Chapter 4.8).

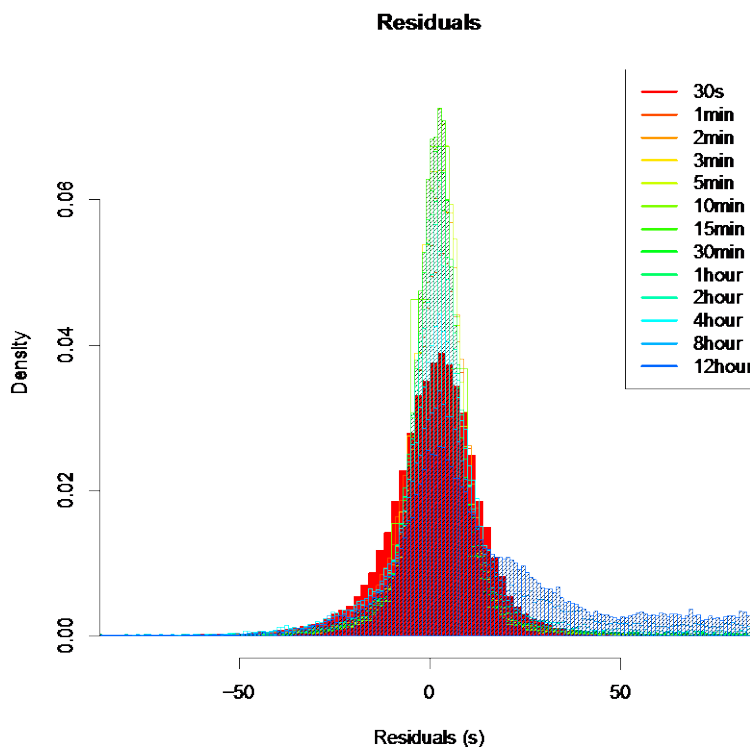


Abbildung (Anhang) 21 Histogram of Residuals for various parameters. The larger and more prominent the spread, the more likely one observes large residuals, i.e. large deviations between predicted and measured values

A histogram of residuals reveals information not only on some “average” quantity like the MAPE (see below), but reveals information about an error distribution (and with that information about chances for large deviations).

Still, a residual histogram can be problematic. If we are looking at very long forecast periods, there will be times with almost precise predictions (e.g. during nights, velocities are predicted extremely accurately). These periods will make the distribution of residuals very peaked around zero, large deviations, e.g. in rarely occurring traffic jams, will not be seen

in such a histogram plot. It is therefore essential that a residual analysis focusses on the aspects of prediction that we are indeed interested in (e.g. onset of traffic jam, regular rush hour jam, regular traffic flow etc.).

Mean Average Percentage Error (MAPE)

The Mean Average Percentage Error (MAPE) is a commonly used measure to assess forecast quality in terms of a single number. It is computed as the absolute difference of predicted and forecasted values in ratio to the observed values:

$$100 \frac{|\text{observed} - \text{predicted}|}{|\text{predicted}|} \%$$

The MAPE shares the disadvantages of residual histograms, as described before (stationarity, scaling). Additional disadvantages are:

- no estimation of chances of high deviations
- high dependence on the number of predictions used for averaging
- unbalanced: overpredictions and underpredictions by the same amounts do not yield the same MAPE

It is essential that a selection of forecast method does not just depend on MAPE. If a classifier for combinations of various forecast methods is programmed, the MAPE can be one of several indicators, completing an evaluation.

The MAPE is not the only measure of average deviations. Due to its deficiencies, corrections have been proposed (balanced MAPE etc.). Another approach is not to take absolute differences, but squares of differences, leading to the mean squared error (MSE), another prominent measure of accuracy, exhibiting nice mathematical properties under assumptions that are not satisfied in traffic data (normal distribution, stationarity).

We will not review all other possible “one-number” measures of quality. An extensive list with advantages and disadvantages can be found in standard literature (e.g. [Hyndman, 2005]).

Quantiles and Confidence Intervals

Confidence intervals and quantiles offer a pointwise assessment of forecast accuracy. An e.g. 95% confidence interval for a predictions is an interval around a predicted value that contains the (to be) measured value with probability 95%. Confidence intervals can be constructed through knowledge of an underlying model (typically the normal distribution, not well suitable for traffic data) or from quantiles of observed data (how large an interval has to be to cover deviations from predictions in exactly 95% of all cases observed so far).

We see a typical picture of confidence intervals in Abbildung (Anhang) 22:

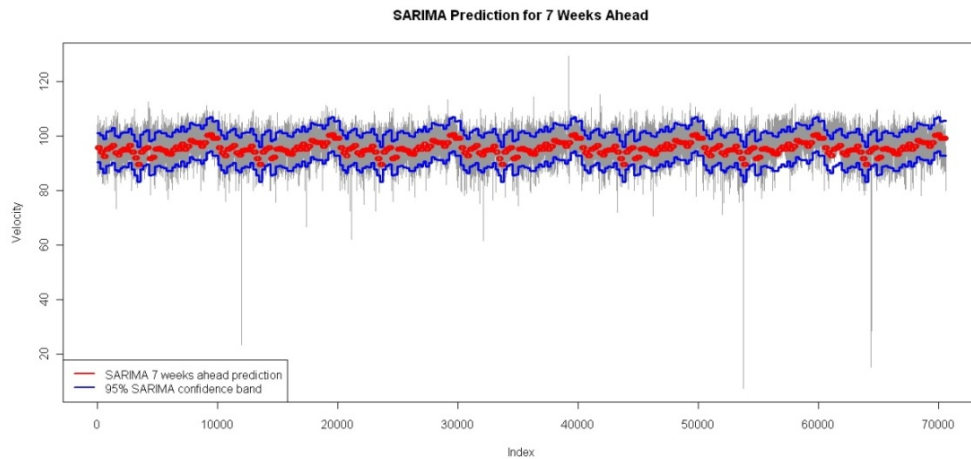


Abbildung (Anhang) 22 Example of prediction (red) and 95% confidence bands (blue).

Confidence intervals do not tell how likely large deviations are, but they give an idea of forecast precision: the larger the confidence interval the less precise a prediction is. In this sense, the (average?) width of confidence intervals can be another measure for the prediction quality of a forecast method, with again similar deficiencies as for the residuals and the MAPE.

Confidence intervals are one way to reason why multistep forecasts can be problematic: the errors propagate from step to step, and each step, new uncertainty is added to the already existing one. This yields to the typical “feathercurve” shape (see Zwischenbericht AP3/4 [ZHAW/Rapp, 2012c]).

Optical Assessment

Optical assessment of forecast methods, despite its simplicity, is a very important way of judging quality. While MAPE or residuals can yield information about some overall quality of forecast, they cannot “explain” why a method seems to be “better” than another one in some given settings.

In Abbildung (Anhang) 23 we consider the example of a moving average prediction. MAPE, residual analysis, confidence intervals etc. would not reveal the very clear behavior of this approach: it is always behind the trend. Therefore such a method is not suitable for an onset or offset of a jam, but may perform very well for regular traffic flow, smoothing out irrelevant variance in the data.

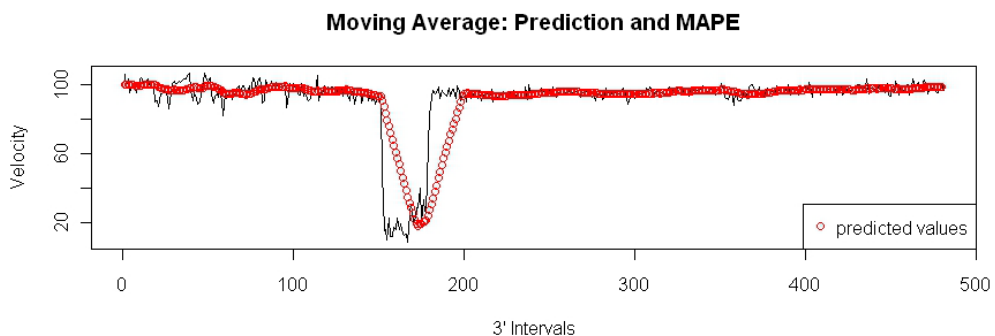


Abbildung (Anhang) 23 Example of a moving average prediction. It can be clearly seen that this method is always behind the trend

One can think of many other situations, where only optical inspections lead to a reasonable qualification of a method for various settings. Unfortunately it is extremely difficult to teach a program to do such optical inspections. This is a clear indicator that pre-

processing data will be a very promising idea to optimize predictions (see Chapter 4.2, 4.3, 4.4 and 4.9) – with appropriate preprocessing, the optimal prediction method for the actual situation can be determined more easily.

III.4 Forecasting Univariate Time Series Models (Kapitel 4.5)

III.4.1 Simple Methods: Daily Average Forecast

The first, extremely simple prediction of velocities is just the daily average velocity. Other intervals (hourly, weekly, monthly etc.) are equally simple. Abbildung (Anhang) 24 illustrates the performance of this strategy. Whereas the MAPE for a regular flow situation is acceptable (daily mean 2.4%, maximally 20%), it is clear that for highly varying velocities (e.g. days with jam), this strategy fails (daily mean 27%, maximally around 800%). We will keep these results in mind when discussing more sophisticated forecast methods.

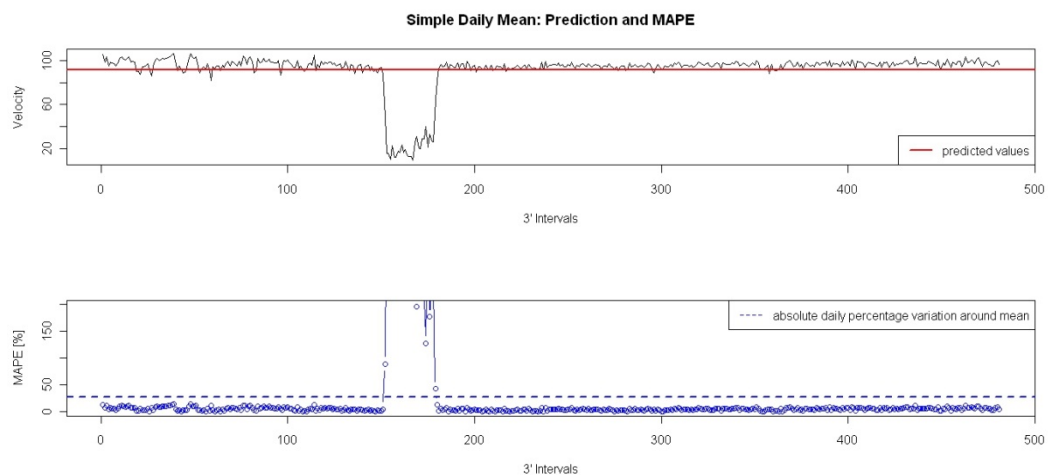


Abbildung (Anhang) 24 Trivial velocity forecast through daily mean (average Monday, irregular traffic situation) at detector AG1411 (compare Figure 6 1, right). MAPE between 0 and 800%, with a mean of 27%

III.4.2 Simple Methods: Pattern Forecast

Pattern forecast is not just averaging over one day, but reconstructs an average daily pattern over several weeks. Such pattern forecast can serve as a basis for long term prognosis (with a surprisingly good MAPE), but will not capture relevant data properties for reliable short term forecasts (irregular jam situations). Examples can be found in Zwischenbericht AP3/4 [ZHAW/Rapp, 2012c].

III.4.3 Simple Methods: Moving Average

A slightly more sophisticated prediction than with simple daily means can be achieved through moving averages. Here, the (one step) prediction is formed as a mean value of “n” past observations, “n” being between 2 and 150 in our examples (see Abbildung (Anhang) 25). Moving average predictions exhibit a (strong) “behind trend” behavior, which is due to the equally weighted averaging over past values. This behavior becomes problematic in irregular traffic situations: predictions will tend to be “behind” the actual data (Abbildung (Anhang) 23)

Moving Average predictions can be extended to multi-step predictions, however they become constant as the number of steps exceeds the number of past observations used for forecast. The errors in these multi step forecasts will form a feather curve (i.e. be strongly increasing in number of ahead steps)¹⁹.

¹⁹ Confidence bands for errors of multi-step ahead predictions can be obtained through “Monte Carlo” simulations. Such simulations have been done in the project, but are not highly relevant at this point.

Note that moving averages (or even more general so called “linear filters”) offer an excellent way to denoise time series, be it for fitting reasons, or just for visualization, without losing data points.

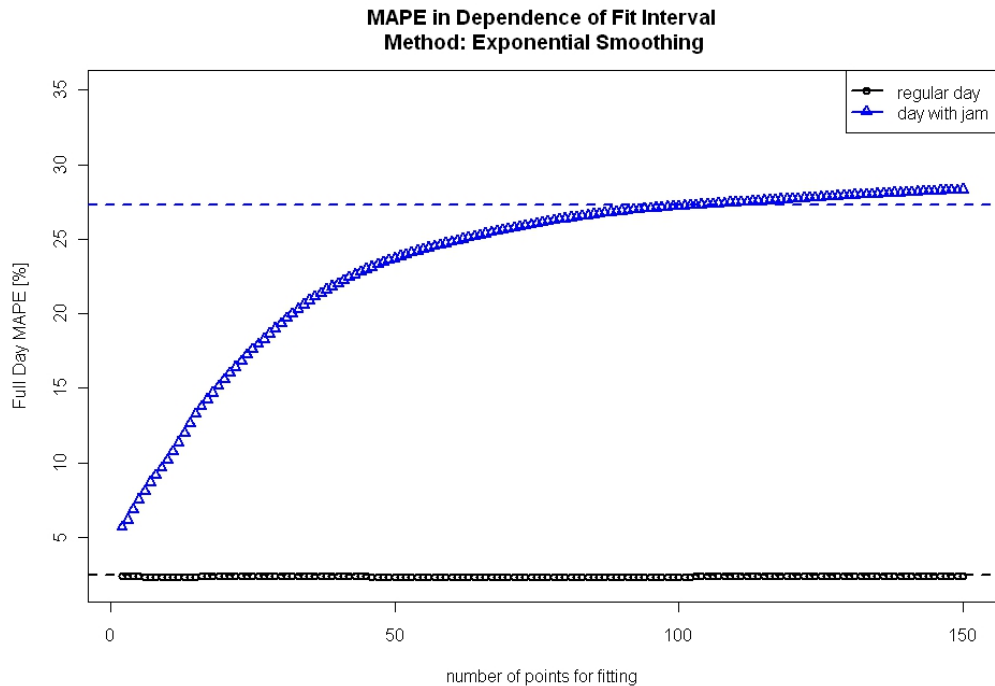


Abbildung (Anhang) 25 Daily MAPE for moving average fit (data: AG1411, 3' aggregation) in dependence of number of past observations used

III.4.4 Simple Methods: Exponential Smoothing

Exponential smoothing is conceptionally similar to moving average prediction, with the difference that the (infinitely many) past values are now only taken into account with exponentially decreasing weights. In other words, exponential smoothing focusses mainly on present values and “forgets” values the further in the past they are. Due to this exponential forgetting, it is enough to use 15 – 20 values for the one step prediction (and also for the parameter fit, see below). This exponential weighting overcomes the typical “behind trend” behavior of moving averages.

Exponential smoothing involves the fitting of one parameter. Since the time series cannot be considered stable, and the one-parameter fit is very cheap, we can refit this parameter in each new forecast situation. Details concerning this fitting strategy can be found in Ab-bildung (Anhang) 26.

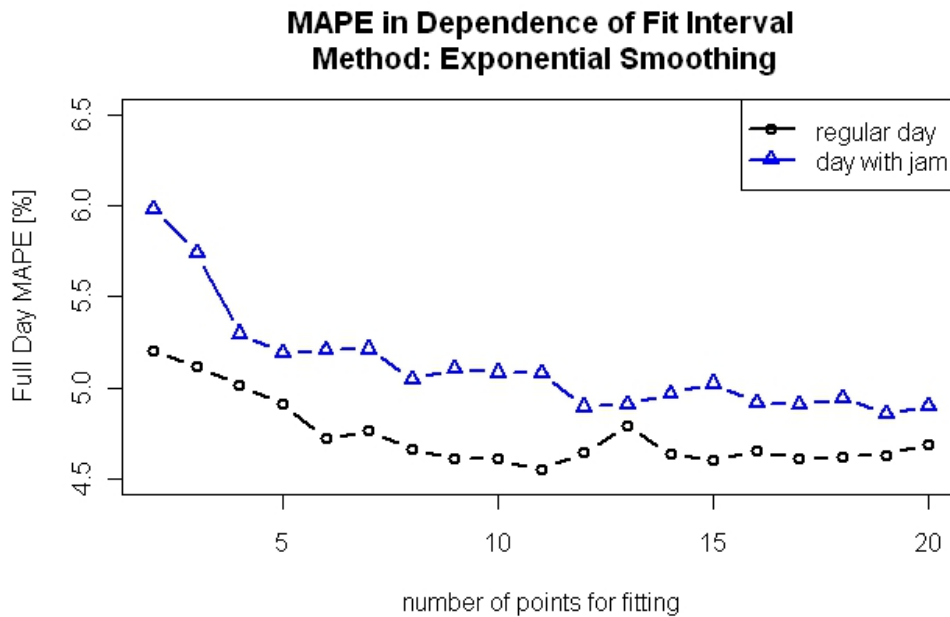


Abbildung (Anhang) 26 Daily MAPE for exponential smoothing (one step forecast) in dependence of the fit interval for the adaptive parameter fit. The graphic suggests that the MAPE stabilizes at a fit resulting from approximately 15 data points

Exponential smoothing can only be reasonably used for one step forecasts. Multi step forecasts would yield all the same expectation values as single step forecasts, but with correspondingly increased errors. For predictions further into the future, the aggregation intervals could be extended. Such an analysis is done for an ARMA model in Chapter 4.5.

The performance of one step ahead exponential smoothing predictions in the test scenario can be summarized as follows. If we have a very regular situation, it performs comparably to the simple daily mean forecast (Abbildung (Anhang) 27), but for less regular situations, it clearly outperforms this very simple approach (Abbildung (Anhang) 28). Note that exponential smoothing is one of the methods also mentioned and applied in [de Rahm, 2007].

A prominent drawback of exponential smoothing is the occurrence of “prediction artefacts” (i.e. unexpectedly wrong predictions). This is due to the strong weighting of very recent data that can be leading away from an effective trend.

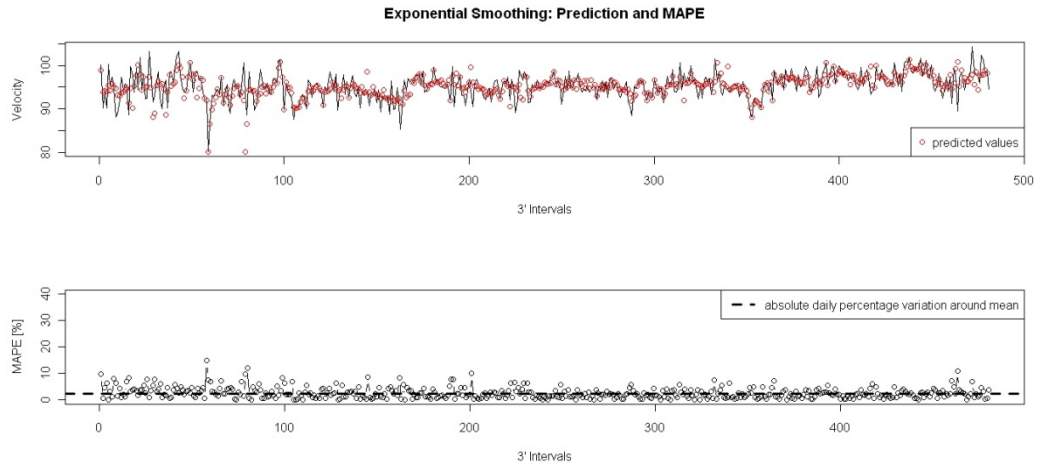


Abbildung (Anhang) 27 Exponential Smoothing with adaptive parameter fit to velocity in regular traffic situation at detector AG1411 (compare Figure 6 1, left). The MAPE of this forecast varies between 0 and 15%, with a daily mean of 2.5%

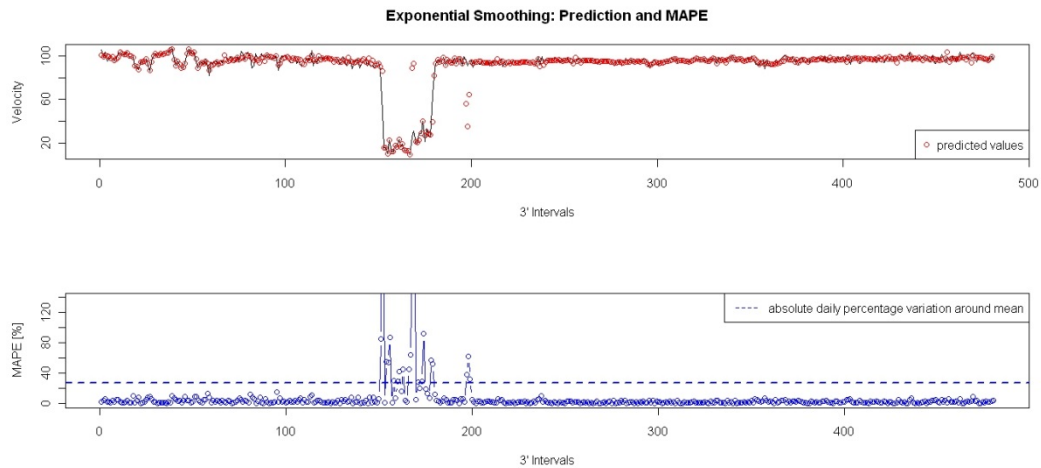


Abbildung (Anhang) 28 Exponential Smoothing with adaptive parameter fit to velocity in irregular traffic situation at detector AG1411. The MAPE of this forecast varies between 0 and 400%, with a daily mean of 6.5%.

III.4.5 ARMA

The class of ARMA models combines the concept of exponential smoothing (infinitely many past values) and moving averages (finitely many past values). The hope is that ARMA models can overcome the “behind trend” effect of moving average while still offering a more smooth prediction than exponential smoothing. ARMA models are typically used to model stationary, linear time series, which traffic series are not (see Chapter III.1). We are (smartly) abusing ARMA models by fitting them to a very short part of the time series and use that same part for prediction. In highly instationary situations (jams), this seems the only way to do reasonable short term predictions. For regular flows and more long term forecasts, longer time series should be used for fitting, and the ARMA model can be extended in such more regular cases (seasonal ARIMA, modeling seasonality).

ARMA models consist of more parameters than the models presented before and are also structurally more difficult to fit to data. In this stage, we are using a Maximum Likelihood strategy. Correspondingly, the computational time is higher for fitting, but still easily allowing adaptive refitting. In the examples at this stage, we are using very little data points to fit the model parameters (10 data points for 7 parameters). Increasing the num-

ber of data points used for fitting stabilizes the values of the model coefficients over a day, but makes the MAPE more variable (in terms of extreme values).

In terms of mathematical formulae, a general ARMA(p,q) model represents the data $X[t]$ at time “t” as

$$X_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i}$$

Where X_t is the time series, c is the offset, ε_t are white noise and θ_i and φ_i are the parameters of the model.

For the further analysis an ARMA(3,3) model was used.

Under either appropriate model assumptions or through “Monte Carlo” simulations, forecasts can be equipped with an estimated a-priori forecast error (not to be confused with the MAPE which is an a-posteriori error). This a-priori error can be computed from historic data, or it can be calculated using some model assumptions (typically Gaussian white noise errors). To exemplify this, Abbildung (Anhang) 31 shows the standard error of the forecast (assuming Gaussian white noise residuals) for the adaptively fitted ARMA model in a jam situation. If we compare Abbildung (Anhang) 30 (regular situation) to Abbildung (Anhang) 31, we clearly see that in situations with high MAPE, the predicted standard error is also higher. This means that the forecast method actually recognizes problematic situations in advance, such that a more accurate method (e.g. a simulative approach) can be chosen to comply with the upcoming traffic situation. Similar error computations (based on slightly different computational methods) can be applied to all the forecast algorithms so far presented²⁰.

Another informative picture is shown in Abbildung (Anhang) 32. There we plot the distribution of model coefficients that are adaptively chosen in the fitting and predicting process (regular traffic situation, compare Abbildung (Anhang) 29). These coefficients are highly variable. This is in accordance with earlier observations that our time series are far from stationary, even in the regular case. Due to the use of comparably little historic data (10 data points, corresponding to 30 minutes) for one fit-prediction step, there is also a “stochastic” source for this variability. This stochastic source can be reduced by enlarging the fit-interval, but with that, the forecast accuracy decreases, especially in irregular situations, that can build up within just minutes and where data older than 30 minutes will not have any impact at all.

In terms of implementation complexity, and with that also computational cost, the ARMA models are the most expensive ones. But visually they clearly offer the best predictions, in regular traffic, as well as in jamming situations. They are following unspectacular pattern fluctuations, as well as highly dramatic changes in data due to onsets of congestions / jams. The computational costs of adaptively fitted ARMA models can be lowered by using “Kalman Filtering”, a technique developed in the framework of state space models [Brockwell, 2002]. Another class of models that can deal with instationary time series (and certain aspects of non-linearity) are the GARCH models ([Brockwell, 2002]).

²⁰ At least for one step predictions. In multi-step predictions, the forecast errors turn large very quickly, such that reasonable distinctions between problematic situations and normal uncertainty in regular situations becomes less clear.

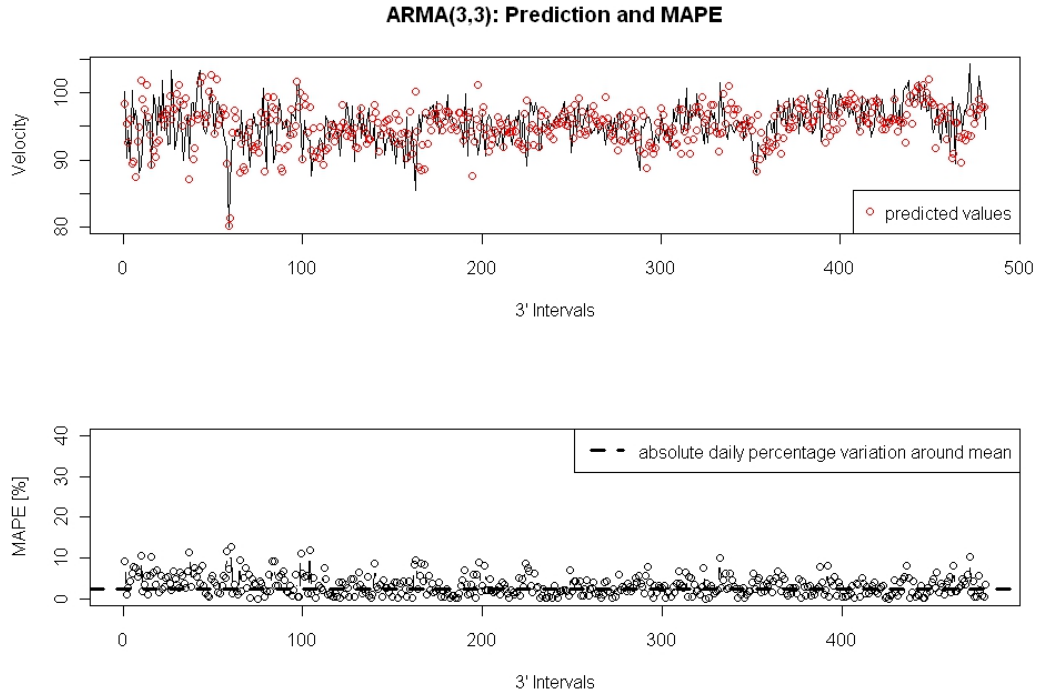


Abbildung (Anhang) 29 ARMA(3,3) with adaptive parameter fit (10 data points) to velocity in regular traffic situation at detector AG1411. The MAPE of this forecast varies between 0 and 10%, with a daily mean of 3.1%

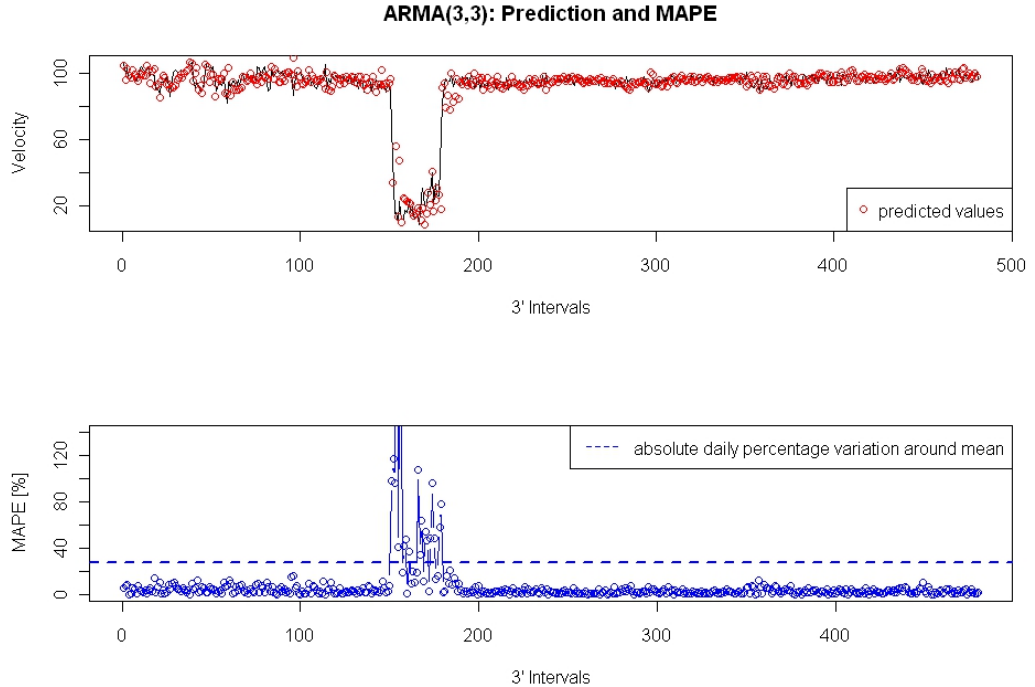


Abbildung (Anhang) 30 ARMA(3,3) with adaptive parameter fit (10 data points) to velocity in irregular traffic situation at detector AG1411. The MAPE of this forecast varies between 0 and 400%, with a daily mean of 7%

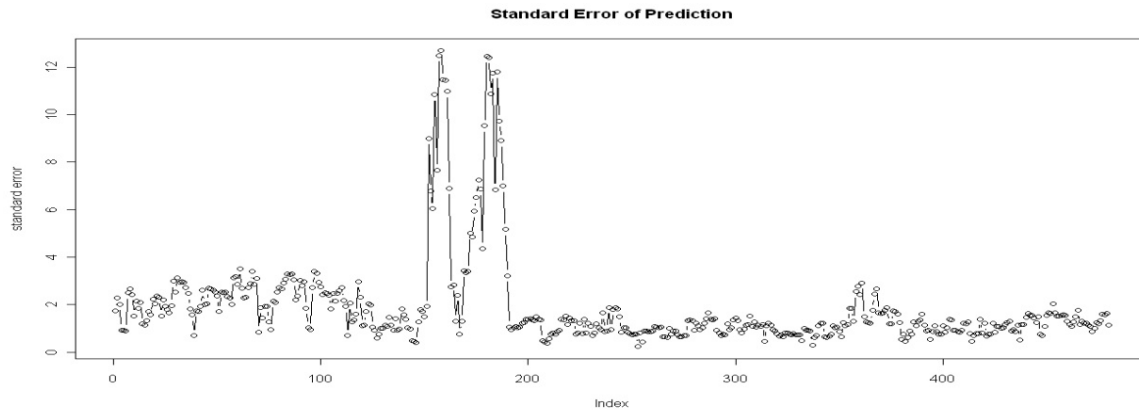


Abbildung (Anhang) 31 A-priori standard error of the ARMA forecast in the jam situation (compare to Abbildung 55). This is a prediction of the forecast uncertainty

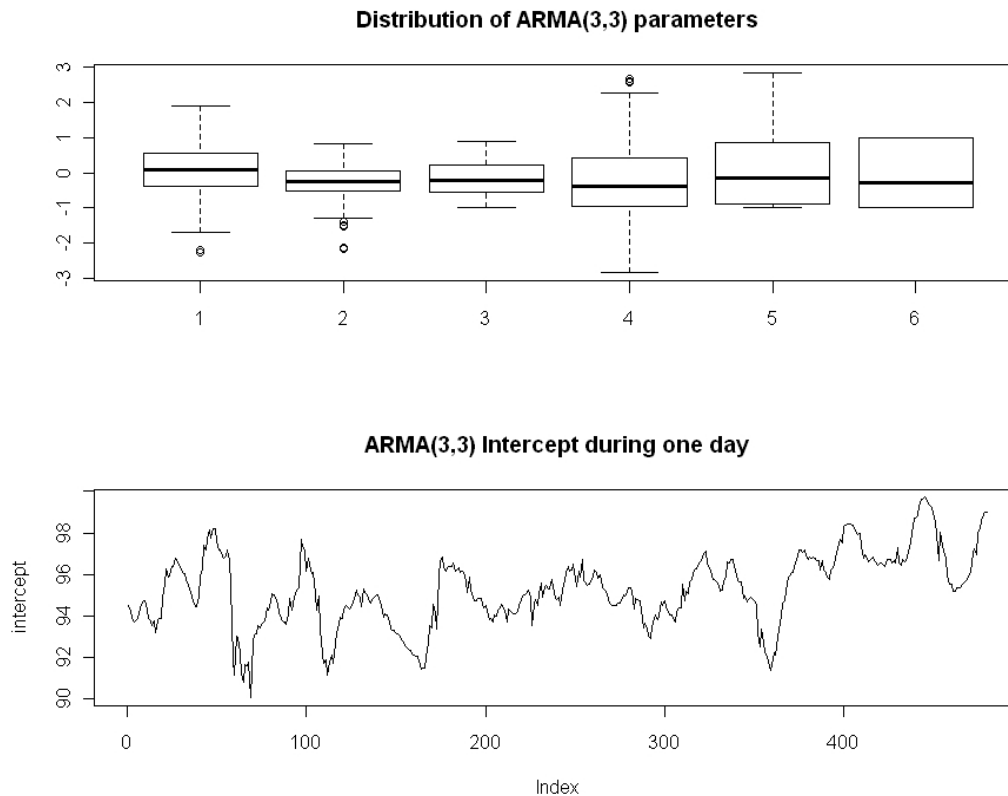


Abbildung (Anhang) 32 Distribution of the coefficients in the ARMA(3,3) model over one regular day (top) and variation of the intercept (bottom). The distribution for jamming situation looks similar, but the intercept is correspondingly lower (not shown)

III.5 Univariate Model for Varying Forecast Horizons (Kapitel 4.6)

III.5.1 Varying Forecast Horizon: Seasonal ARIMA Model (SARIMA)

In extension to regular ARMA models, seasonal ARIMA models incorporate information about seasonality patterns in the data. Conceptionally, seasonal ARIMA models are very similar to ARMA models, due to additional seasonality information they just need a few more parameters than the regular ARMA models. The "I" in ARIMA stands for "integrated", meaning that not the time series itself is used for forecast, but increments be-

tween the values. This way, patterns can enter the model: for seasonal ARIMA, we do not take increments between subsequent data, but between weekly lagged data, meaning that the value at “t + 1” depends on the value at “t”, but also on the value at “t – 1 week”. Seasonal ARIMA models are suitable as basis for long term forecasts (days / weeks / months) and can be extended to include external factors for more accurate modeling. Abbildung (Anhang) 22 shows an example of seasonal ARIMA forecasts (with 95% confidence bands) for 7 weeks ahead predictions.²¹

Of course, irregular events cannot be predicted 7 weeks in advance based upon just the current traffic situations and seasonal patterns. But the seasonal ARIMA model could be enriched with external factors that could predict some critical traffic situations (Easter jam at Gotthard etc.).

Interestingly, the seasonal ARIMA model does not just perform well by means of optical inspection. The chosen ARIMA(3,0,3)(0,1,1) also fits the data very well in terms of statistics. This is shown and explained in Abbildung (Anhang) 33.

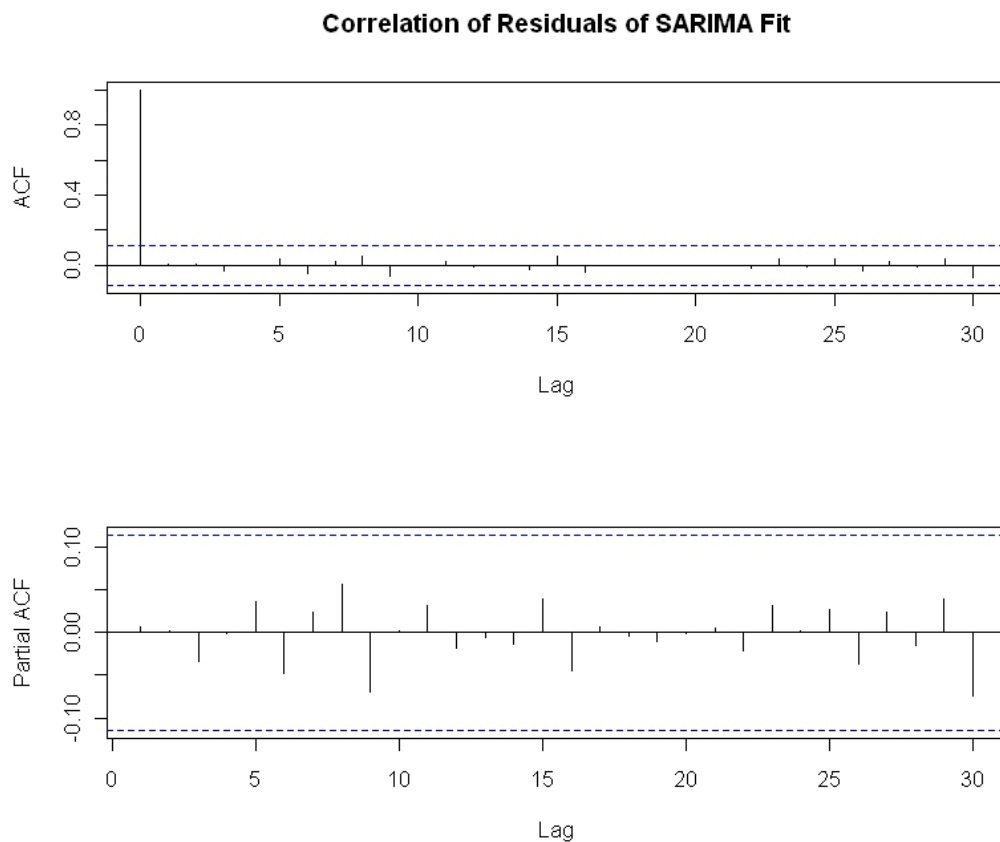


Abbildung (Anhang) 33 Autocorrelation (top) and partial autocorrelation (bottom) of residuals of seasonal ARIMA fit. The values are well inside the 95% confidence bands of the white noise assumption, therefore the Seasonal ARIMA(3,0,3)(0,1,1) model captures the relevant behavior of a 4 hourly aggregated velocity time series of AG1411 with high significance.

A comparison of forecast errors of the SARIMA(3,0,3)(0,1,1) and a 4h aggregated regular ARMA model is given in Zwischenbericht AP3/4 [ZHAW/Rapp, 2012c]. The SARIMA model has lower chances for high deviations than the regular ARMA model. This is due to the capturing of seasonal patterns in the SARIMA model, which is not inherent to the reg-

²¹ Seasonal ARIMA(3,0,3)(0,1,1) 7 weeks ahead prediction with SARIMA confidence band (95%), based on fit to 7 prior weeks. Aggregation interval is 4h (current computational software limitation), data of detector AG1411.

ular model.

III.6 Multivariate (linear) Time Series Models (Kapitel 4.7)

III.6.1 AR(I)MAX

ARIMAX models are an extension of ARIMA models that allow for the inclusion of one or more external factors. In principle, the functional influence of the external factors can be arbitrary, typically, a linear regression model is used. The external factors can be e.g. weather, calendar, or simply time series measured at other detectors. For predictions, the fitted ARIMA model is enriched by the values of the external regressor²².

The setup of a reasonable ARIMAX method for traffic data is not straight forward. Here, we thus show two other examples to illustrate ARIMAX and discuss why a reasonable application to traffic data requires a more complex model.

The data we are using as first example are water levels of Lake Huron between 1875 and 1972 [Brockwell, 2002]. Such data typically contains a trend, which poses a very intuitive example of an ARIMAX model: we observe yearly fluctuations of water levels (due to different weather and climate phenomena) that are modeled using a regular ARIMA model, and the trend is included as an external factor through a linear regression on the data.

In the example (Abbildung (Anhang) 34) we used 50 initial data sets for training an adaptive ARIMAX model with one step ahead predictions.

In this example, a regular (adaptive) ARMA²³ model performs similarly well, but an ARMAX model is more intuitively appropriate for data with a trend.

The Lake Huron data is modeled with a linearly added external factor (linear trend). Typical problems will contain non-linear relations of external factor and observed data. Such an example (sinusoidal trend) is given in Abbildung (Anhang) 35. There, a simple ARIMA model without external factor performs approximately 10% worse in terms of prediction errors.

²² Note that for such a prediction, (some) future values of the external regressor need to be known. If measurements from another detector are used as external regressors, this can only be done with an appropriate time lag.

²³ The „I“ in ARIMA is skipped if no differencing step is applied.

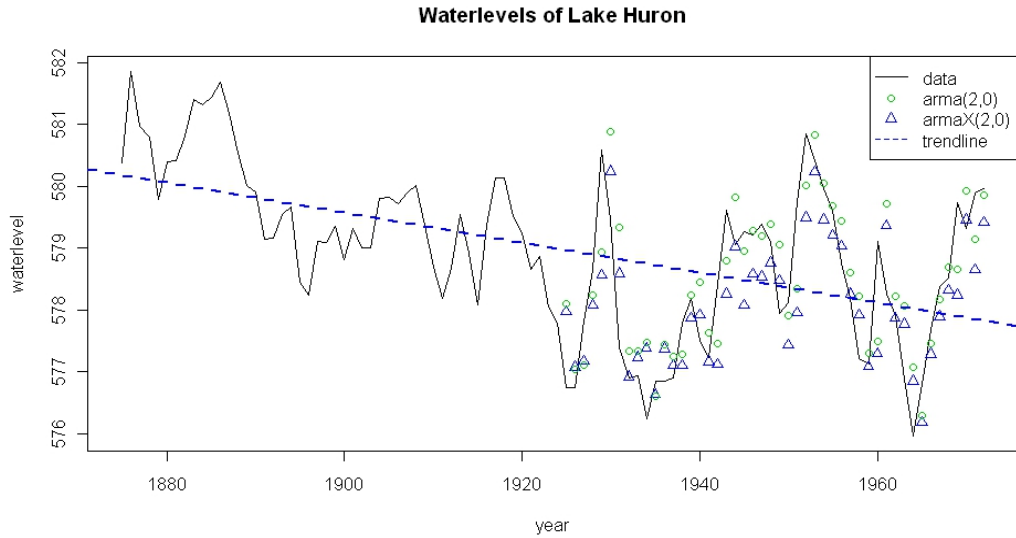


Abbildung (Anhang) 34 Waterlevels of lake Huron from 1875 – 1972 [Brockwell, 2002]. Regular ARMA and ARMAX model perform similarly well, but the ARMAX model is more intuitive in this case

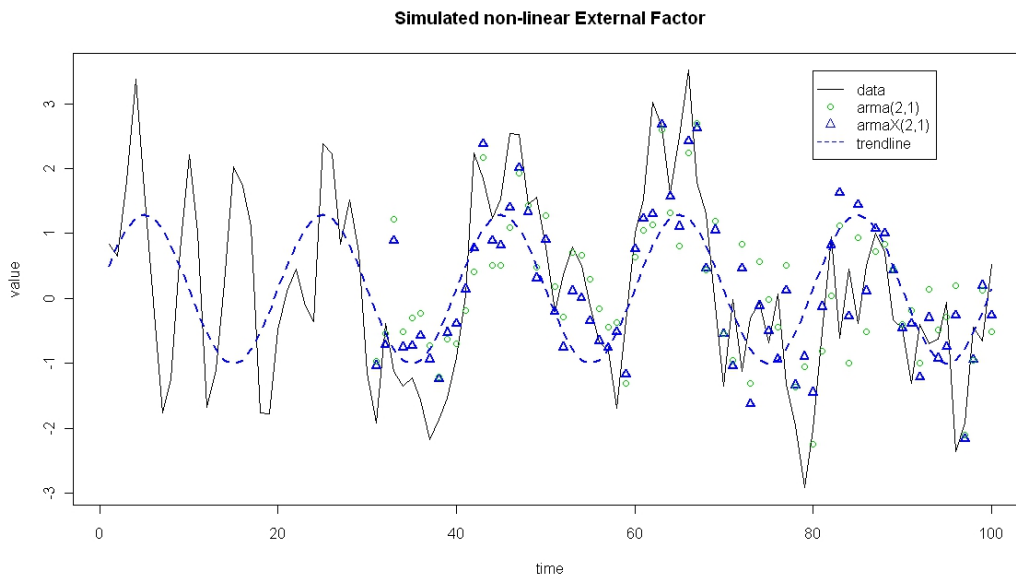


Abbildung (Anhang) 35 Simulated example with non-linear trend and ARMA(2,1) data. Optically, the difference between pure ARMA(2,1) and ARMAX(2,1) is not obvious, but the absolute error is around 10% lower with the ARMAX method. Note that the underlying trend must be exactly

For traffic data, it is not obvious what the external regressor(s) may be. Since any functional dependence of regressor(s) and time series is possible, we are not bound by any linearity constraints. There is, however, only one method for including the regressor: if we wanted to take e.g. velocity data from neighboring measurement sites as external regressors, this could only be done at fixed time lags. This would not provide a perfect representation of the data, since realistically the influence time between detectors is never constant.

A more reasonable approach for applying an ARIMAX model in the traffic context would be to aim to calculate trend indicators for long term prognoses (days, weeks). The week-day structure, as well as holiday calendar and seasonality could be used as external re-

gressors upon some expected daily patterns. However, the possible complexity of functional connections between regressor and time series is not to be underestimated and may only be solved in combination with an additional algorithm (e.g. a neural network that is trained to choose matching connections).

No matter what an ARIMAX model is used for, a certain amount of “human knowledge” has to be used for the setup, and this setup may possibly need to be adapted with space and time.

III.6.2 Vector ARIMA

Vector ARIMA (VARIMA) models offer a conceptionally interesting approach to multi-time series modeling. The basic idea of univariate ARIMA models, which describe a time series as a combination of an autoregressive and a moving average part, is extended by the inclusion of influences from other time series, using heteroregressive modeling. This means that e.g. the velocity value at detector X at time t, $X(t)$ depends not only on $X(t-1)$, $X(t-2)$, $X(t-3)$, but maybe also on $Y(t-5)$, $Y(t-6)$ and $Z(t-3)$, $Z(t-2)$, and so on. The parameters which determine this influence quantitatively are estimated from the data.

One could be tempted to just include everything at every time into the prediction of time series X. This would lead to two (related) problems:

- the number of parameters grows rapidly and becomes unfeasible for realistic time horizons and realistic numbers of possible input quantities [Kamarianakis, 2005]
- the estimation of parameters is mathematically challenging. While fitting a model may be resulting in high fit quality, typically the prediction quality is rather poor [Tsitsika, 2007]

Being well recognized in various branches of science [Öller, 1985], [Dong, 2010] VARIMA models are at the same time known for the above mentioned deficits, which are very hard to overcome.

The number of parameters can be kept relatively moderate, if enough reasonable assumptions are put into the dependence structure and the VARIMA model is “rigidified”. Of course this requires a lot of a-priori knowledge about dependence that is usually not easy to obtain. Similarly, a big problem of this rigidification is the fixed choice of time lag if we want to predict e.g. velocities at one counter with dependence on its neighbors.

The poor prediction quality of VARIMA models due to problematic parameter estimates is even less easy to overcome. There are mathematical algorithms for this problem, but they do so far not satisfyingly solve that issue (see e.g. the “dse” package for the statistic software R). Another considerable drawback of VARIMA models is their linearity. Auto- / Heteroregression, as well as dependence work only for linear cases. While this drawback could be balanced by adaptive model fitting in the univariate case (see Chapter 4.5), such an adaptive fit is not feasible anymore for multivariate models (computation time, convergence problems of the fitting algorithm in general).

Due to the model complexity at the high cost of only linear modeling, VARIMA poses difficulties in being applied to traffic forecasts.

III.6.3 State Space Models

State space models are a generalization of VARIMA models. Their main idea is to separate the prediction problem of a set of time series into a state equation and into an equation of dynamics [Brockwell, 2002]. The state space can be chosen in many ways, leading to a lot of “similar” models with essentially the same predictive features. Due to this freedom, directly fitting a state space model to data is computationally more feasible than fitting the comparably rigid structure of a VARIMA model. The disadvantage of this freedom is that insight into what should happen in the model is lost, and with that, a change in data “patterns” can lead to unexpected effects in prediction quality.

At the same time, state space models are also restricted to linear modeling, which is quite a high price to pay for very little (if any) gain in model intuition.

An application of state space models directly to counter data does not seem reasonable. Their use for predicting a supporting process (e.g. propagation more general “traffic situa-

tions” along several detectors) needs consideration. Again these are questions which already aim at a system’s concept and will therefore be discussed there.

III.7 Travel Time Prediction with Neural Networks – Procedure (Kapitel 4.8)

In a first step, the travel time was reconstructed from the 30 seconds aggregated velocities using the PLSB algorithm as outlined in Chapter 4.2, and is shown in Abbildung (Anhang) 36. The travel time reconstruction shows an average travel time for the segment of around 580 seconds, corresponding to an average speed of approximately 100km/h, corresponding to the maximum speed limit on those segments. Furthermore, the travel time shows a weekly pattern and a few distinct and pronounced peaks, in which the travel time increases up to almost 1400 seconds, i.e. more than a factor of 2. Our focus here is to predict these reconstructed travel times based on the currently available velocities from the detectors listed above.

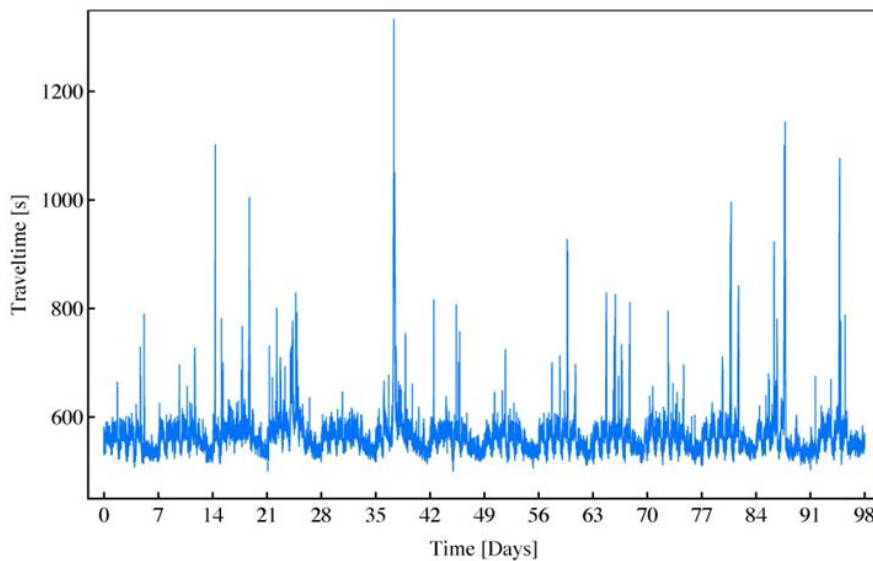


Abbildung (Anhang) 36 Reconstructed travel time over the analyzed 14 weeks period

To predict the travel times, we used the standard NeuralNetworks toolbox available for MATLAB (MATLAB 7.11.0.584, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2010). While the authors of related works (see e.g. [van Lint, 2004]) employed recurrent networks, our results are based on standard feed forward neural networks, the architecture of which is schematically shown in Abbildung (Anhang) 37 below.

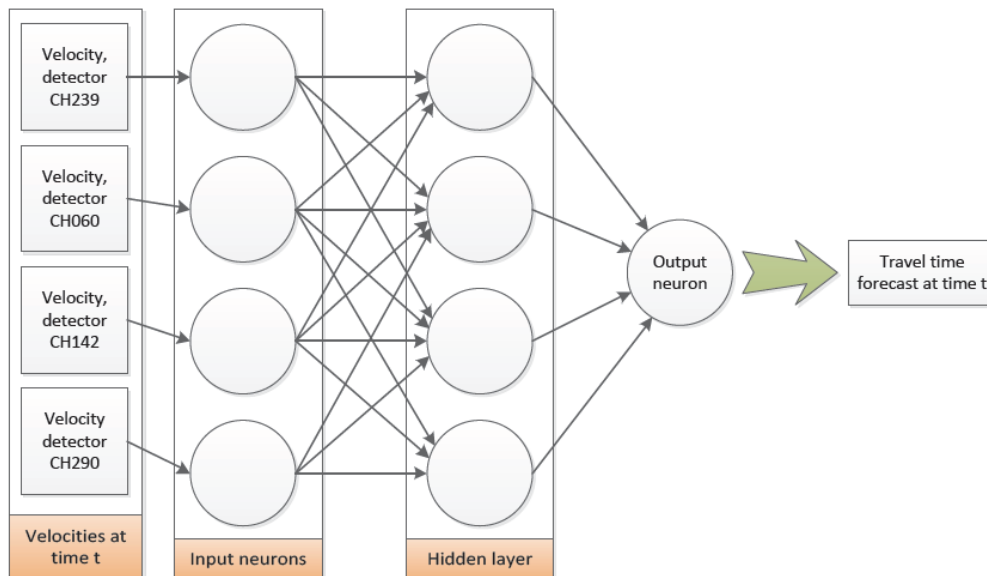


Abbildung (Anhang) 37 Schematics of the travel time prediction neural network.

Generally, each input (velocity data from each detector) was directly connected to a layer of input neurons (one neuron per input). The input neurons were then fully connected to a hidden layer, for which we employed up to 20 neurons. In the output neuron the output of the hidden layer is combined to yield a travel time forecast.

We trained the neural network on test data, i.e. the detector velocities were used as trial input and the forecasted travel time was compared to the reconstructed travel time. The forecast error is then used to improve the network performance by means of the standard back-propagation algorithm for neural networks learning. We took 3.5 days of data from the 14 week period and used 90% of them to train the network, and then evaluated the forecasting performance on the remaining 10% of the set by calculating the MAPE and the residuals.

The iterative process can be summarized as follows:

1. Data preparation: Travel times are reconstructed from given velocity data of several detectors. These reconstructed travel times are necessary for training the ANN.
2. Training: Training the ANN with data from past. The reconstructed travel times are compared to travel time predictions of the ANN based upon velocity data. A difference between predicted and reconstructed travel times is fed back to the ANN for training.
3. Prediction: After training, the ANN can be used to predict travel times based upon current velocity data. Note that through the training process, the ANN is using predicted traffic states to predict travel times.

Note again, that such a prediction is more sophisticated than a naïve travel time estimate based on actual velocity data: the ANN prediction incorporates that the traffic situation changes during the trip, which can be essential.

Results:

Referring to the test case presented in Chapter 4.8, insight into the prediction quality is gained from the distribution of residuals, shown in Abbildung (Anhang) 38 for absolute values and in Abbildung (Anhang) 39 as signed quantity. There are two important observations to be made: First, as expected, the larger the aggregation interval, the worse the prediction of travel time – this is simply due to the fact that an aggregation interval of, e.g., 12 hours effectively means that one makes a prediction on the expected travel time for a car that will pass through the segment in 12 hours. The second, less obvious obser-

vation is, that the smallest aggregation time does not yield the best prediction, even though it theoretically contains the most updated values to base the prediction on: The 30 seconds aggregation interval (red) shows a larger spread in the residual distribution than the 10 or 15 minutes aggregation results. Interestingly, this aggregation interval roughly corresponds to the average travel time for the studied segment. Whether this is coincidence or not is currently an open question. Further analysis could reveal whether indeed there is a correlation between travel time and optimal aggregation interval. If so, it would be crucial to concurrently create aggregated data from detector measurements at various aggregation intervals, and, for each travel time prediction setup, then choose the optimal aggregation interval for the neural network training and forecasting.

An insight into the prediction quality is gained from the distribution of residuals, shown in Abbildung (Anhang) 38 for absolute values and in Abbildung (Anhang) 39 as signed quantity. There are two important observations to be made: First, as expected, the larger the aggregation interval, the worse the prediction of travel time – this is simply due to the fact that an aggregation interval of, e.g., 12 hours effectively means that one makes a prediction on the expected travel time for a car that will pass through the segment in 12 hours. The second, less obvious observation is, that the smallest aggregation time does not yield the best prediction, even though it theoretically contains the most updated values to base the prediction on: The 30 seconds aggregation interval (red) shows a larger spread in the residual distribution than the 10 or 15 minutes aggregation results. Interestingly, this aggregation interval roughly corresponds to the average travel time for the studied segment. Whether this is coincidence or not is currently an open question. Further analysis could reveal whether indeed there is a correlation between travel time and optimal aggregation interval. If so, it would be crucial to concurrently create aggregated data from detector measurements at various aggregation intervals, and, for each travel time prediction setup, then choose the optimal aggregation interval for the neural network training and forecasting.

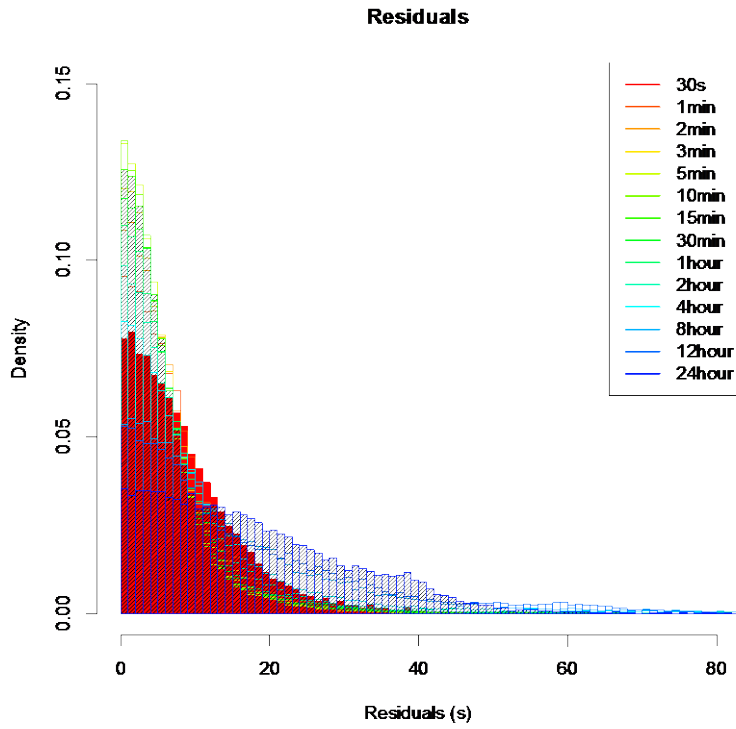


Abbildung (Anhang) 38 Residuals (absolute values) of travel time predictions for different aggregation intervals (see Chapter 5.3.1 for more explanation).

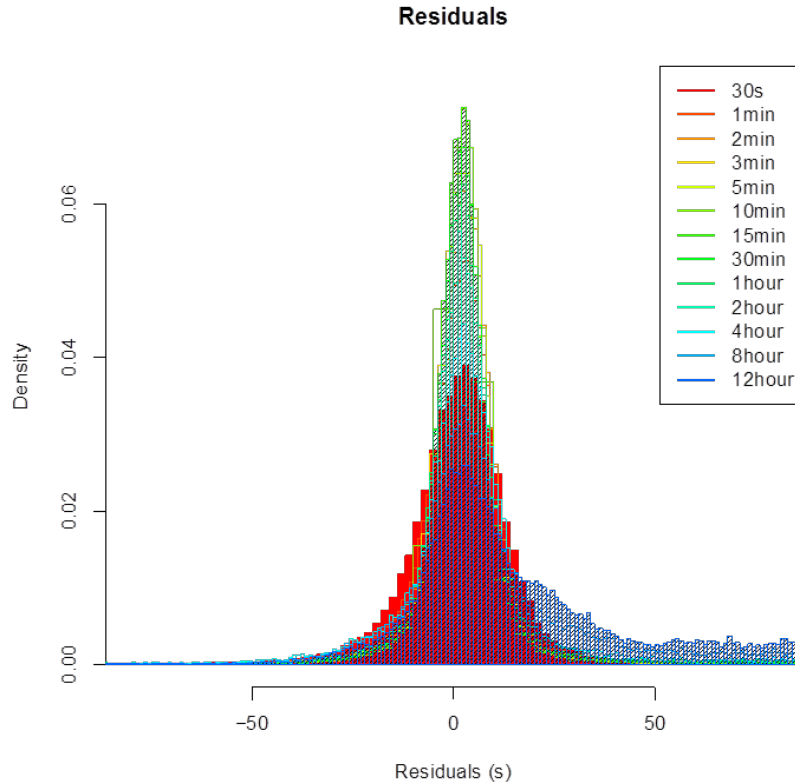


Abbildung (Anhang) 39 Residual distribution for travel time prediction using different aggregation intervals (see Chapter 5.3.1 for more explanation).

According to literature, mostly [van Lint, 2004], [Wu, 2004], the forecasting quality can be further improved by the following extensions, which have not yet been studied in detail:

- Inclusion of traffic density as separate inputs into the neural network. This strategy was employed in [van Lint, 2004] and could improve the quality of the prediction at the onset of traffic jams.
- Inclusion of external factors such as weather conditions: The neural network architecture can be easily extended to incorporate various kinds of external time series. However, the quality does not necessarily improve as more input is used. Therefore, a selection of relevant external factors needs to be made a priori.
- State-space/recurrent network architecture. Van Lindt and coworkers report on significantly better results when employing state-space/recurrent neural networks instead of the feed-forward architecture used here.

Use of support vector machines instead of classical neural networks has been studied in [Wu, 2004] with positive results, yielding considerably better travel time predictions using such methods over traditional neural network or statistical methods.

IV Anhänge Datenverfügbarkeit und – bereitstellung (Kapitel 5)

IV.1 Datenerfassungssystembeschreibung- und -beurteilungsblatt (Vorlage)

Abgedeckter Bereich

Verkehrsdaten	Umfelddaten	Ereignisse und Gefahren
<input type="checkbox"/> Verkehrszähl- daten <input type="checkbox"/> Verkehrsbeobachtungen/ - informationen <input type="checkbox"/> Verkehrsnetzdaten/ -informationen <input type="checkbox"/> Verkehrsnachfragematrizen	<input type="checkbox"/> Wetter <input type="checkbox"/> Strassenzustand	<input type="checkbox"/> Planbare Ereignisse (Baustellen, Veranstaltungen, Ferienkalender) <input type="checkbox"/> Spontane Ereignisse (Unfälle, Falschfahrer, weitere Gefahren) <input type="checkbox"/> Polizeiliche Meldungen und Anord- nungen (Sperrungen, Umleitungen etc.) <input type="checkbox"/> VM-Massnahmen (Signalisationen, V-Vorgaben etc.)

Erfassungssystem	
Beschrieb	
Besitzer/Betreiber	
Beobachtungsmethode	
Messgrössen	
Berechnete Grössen	
Messstellennetz/-dichte (Aus- rüstungsgang und Erfassungsrate)	
Zeitbezug (gemäss VSS 2006/905, S. 40):	Messgrössen (Beobachtungsintervall): Berechnete Grössen:

Raumbezug (gemäss VSS 2006/905, S. 41)	Messgrössen: Berechnete Grössen:
Anwendungsbereich (bisher)	
Datenverfügbarkeit	
Systemschnittstelle (online, offline etc.)	
Standards und Richtlinien	
Betriebszuverlässigkeit des Systems	
Umgang mit fehlerhaften Daten/Systemausfällen	
Datenqualität (Messgrössen, berechnete Grössen, gemäss VSS 2006/905, S. 44/45)	Thematische Genauigkeit/Zuverlässigkeit: Lagegenauigkeit: Zeitliche Genauigkeit: Aktualität: Vollständigkeit:
Entwicklungen in der Zukunft	

Beurteilung	
Beurteilung der Eignung für die Verwendung für Stauprognosen	
Einschränkungen in der Verwendung	
Notwendige Voraussetzungen für die Verwendung	
Offene Fragen	
Quellen, Referenzen, Verfasser	
Dokumente und Referenzen:	• [1]
Verfasser	
Datum	

V Anhänge Systemkonzept für Verkehrs- und Stauprognosesystem (Kapitel 6)

V.1 Rechenzeit und Speicherbedarf – Abschätzung für Maximalausbau

Tabelle 57 und Tabelle 58 liefern eine Zusammenfassung des geschätzten Rechen- und Speicherbedarfs bei Maximalausbau (siehe Kapitel 6.4) mit zusätzlicher Skalierungsabschätzung in der üblichen Big-O-Komplexitätsnotation (dabei bedeutet $O(n^2)$ dass sich eine Grösse wie n^2 für grosse n verhält. Es wurden dabei Prozesse, die offline ablaufen (also Prozesse, die nicht zeitkritisch sind und im Hintergrund laufen können, wie Vorstrukturierung etc.) und Online-Prozesse (zeitkritische Berechnungen) separat behandelt.

Offline-Prozesse:

Tabelle 57 Rechenzeit- und Speicherbedarfsabschätzung für Offline-Prozesse

Prozessschritt	Speicherbedarf flächendeckend pro Tag	Rechenzeit flächendeckend pro Berechnung	Skalierung Spei- cherbedarf	Skalierung Re- chenzeit
Preprocessing				
Reisezeitprognose Rerouting-Optimierung (Routing in 2 Schritten, siehe Kapitel 6)	? (nicht-persistent, aber hoher RAM-Bedarf (MB-GB))	mehrere Stunden	?, vermutlich $O(n)$ bis $O(n^2)$ n: Anzahl Verzweigungen	Mind. $O(n^2)$ n: Anzahl Verzweigungen
Vorstrukturierung Ganglinien Detektoren	Vernachlässigbar (Objekte bereits im Aggregationsprozess abgelegt)	Ca. 400 Minuten	$O((n+k)m)$ n: Anzahl Objekte M: Dimension (24) K: Anzahl Cluster (ca. 20)	$O(Knm)$ n: Anzahl Objekte (Ganglinien) M: Dimension (24) K: Anzahl Cluster (ca. 20)
Vorstrukturierung Reisezeiten	Vernachlässigbar (Objekte bereits im Aggregationsprozess abgelegt)	Ca. 400 Minuten	s. oben	s. oben
Training neuronales Netz (On-trip Reisezeitprognose)	? (abhängig von Streckenlänge resp. Detektordichte); generell vernachlässigbar, da nicht flächendeckend	Ca. 5 Minuten pro Prognosestrecke	$O(n k^2)$ n: Anzahl on-trip Prognosestrecken k: Anzahl Segmente pro Prognosestrecke	$O(m n k^2)$ n: Anzahl on-trip Prognosestrecken k: Anzahl Segmente pro Prognosestrecke

	eingesetzt			m: Anzahl historischer Datenpunkte
--	------------	--	--	------------------------------------

Online-Prozesse:

Tabelle 58 Rechenzeit- und Speicherbedarfsabschätzung für Online-Prozesse

Prozessschritt	Speicherbedarf flächendeckend pro Tag	Rechenzeit flächendeckend pro Berechnung	Skalierung Spei- cherbedarf	Skalierung Re- chenzeit
Preprocessing				
Aggregation Detektordaten in 3 Intervalle	<10 MB (ca. 400 Detekt.)	Wenige Sekunden (ca. 400 Detekt.)	O(n) n: Anzahl Detekto- ren	O(n) n: Anzahl Detekto- ren
Aggregation Reisezeitdaten	<10 MB bei aktuel- len Segmentdefiniti- on	-- (seitens Swisscom übernommen)	O(n) n: Anzahl Segmente	O(n) n: Anzahl Seg- mente
Aggregation Eventdaten (Datenüber- nah- me/Filterung)	<10 MB	Wenige Sekunden	O(n) n: Anzahl Events	vernachlässigbar
Aufbereitung Wetterdaten (Datenüber- nah- me/Filterung)	<10 MB	-- (vom Anbieter übernommen)	O(n) n: Anzahl Messstel- len O(n ²) n: Auflösung (pro Länge)	-- (vom Anbieter übernommen) / Filterung: vernach- lässigbar
Prognosen				
Univariate Verkehrszu- stands- prognose (de- tektorbasiert)	<10 MB	Ca. 320 sek. (für 400 Detektoren)	O(n) n: Anzahl Detekto- ren	O(n) n: Anzahl Detekto- ren
Univariate Reisezeitprog- nose	<10 MB	Ca. 6 Minuten (für alle durch Detekto- ren definierte Seg- mente)	O(n) n: Anzahl Segmente	O(n) n: Anzahl Seg- mente
On-trip Reise-	<10 MB	Wenige Sekunden	O(n)	O(n k ²)

zeitprognose (multivariat, mittels trainier- tem neuronalen Netz)			n: Anzahl on-trip Prognosestrecken	n: Anzahl on-trip Prognosestrecken k: Anzahl Seg- mente pro Prog- nosestrecke
Simulation Teilstrecken	? (v.a. nicht- persistente Daten)	Nicht flächende- ckend; mehrere Minuten für längere Stre- cken/Zeithorizonte	O(n) für makrosko- pische Grössen mit Strecken- oder Querschnittsbezug n: Anzahl Teilstre- cken	O(n v t) n: Anzahl Teilstre- cken v: durchschn. Anzahl Fahrzeuge pro Teilstrecke t: Simulations- Zeithorizont
Reisezeitprog- nose A => B ohne angepas- tes Routing	vernachlässigbar (nicht-persistent, da requestbasiert)	Vernachlässigbar (Hochrechnung existierender Daten, Routing extern)	konstant	O(n) n: Anzahl Re- quests (Benutzer- abfragen)
Reisezeitprog- nose A => B mit Rerouting	vernachlässigbar (nicht-persistent, da requestbasiert)	Vernachlässigbar (Hochrechnung existierender Daten, Routing extern)	konstant	O(n) n: Anzahl Re- quests (Benutzer- abfragen)
Postprocessing				
Umlegung Querschnittsda- ten auf Fläche	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar
Reise- zeit/Routing- Darstellung	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar	vernachlässigbar
Isochronendar- stellung	Nicht flächende- ckend, <10 MB pro Darstellung	Wenige Minuten	O(n) N: Anzahl Isochro- nen	O(n) N: Anzahl Iso- chronen

V.2 Resultate Basisprognose an einem Beispiel

Um die Effizienz der Vorstrukturierung und die abgeleitete Basisprognose (vgl. Kapitel 6.5) zu überprüfen, wurde Detektor CH195 (Erstfeld S) über die Jahre 2008-2012 untersucht. Dazu wurde für jeden Tag die Tagesganglinie des Verkehrsaufkommens mit Stundenintervall und 15-Minuten-Intervall berechnet, getrennt pro Richtungen. Dabei wurden Tage mit fehlenden Stundenwerten von der Analyse ausgeschlossen.

Jede Tagesganglinie wurde mit drei externen Einflussfaktoren versehen. Diese erwiesen

sich als die einflussreichsten Faktoren für diesen Detektor und die Wahl wurde für das Beispiel eingeschränkt. Eine Ausweitung der Analyse auf weitere Einflussfaktoren bzw. Attribute ist aber prinzipiell analog und konzeptionell kein Problem.

1. Wochentag (Mo-Su – 7 Attribute)
2. Schulferien (no_holiday, sport_holiday, spring_holiday, summer_holiday, autumn_holiday, christmas_holiday – 6 Attribute)
3. Feiertage (kein, New Year, Good Friday, Easter Saturday, Easter Sunday, Easter Monday, May Day, Ascension Day, Whit Monday, Swiss National Day, Christmas Day, Boxing Day – 12 Attribute)

Da bei Faktor 3 mit 12 Attributen die grösste Anzahl an Attributen vorlag, wurde ein k-Medoid-Clustering mit $k=13$ gewählt, um die Tagesganglinien zu clustern. Gemäss dem DCA Algorithmus wurden dann gezählt, wie oft welches Attribut in jedem Cluster zu finden war. Aus diesen Werten wurden die Belonging Vectors berechnet für jedes Attribut. Mittels Manhattan-Distanz wurden die Distanzen zwischen den Belonging-Vektoren errechnet. Attributgruppen wurden gebildet für alle Attribute, die sich weniger als die Distanz von 0.5 voneinander unterschieden. Während im den operativen Einsatz die Belonging-Vektoren sämtlicher Attribute gemeinsame geclustert werden sollten, haben wir hier der besseren Analysemöglichkeit willen für jeden Einflussfaktor die Attribute separat gruppiert, d.h. einmal für den Wochentag, die Schulferien und die Feiertage.

Die DCA Analyse ergab folgende Wochentag-Gruppen für Verkehr in südliche Richtung (zum Gotthard hin):

(Su)(Mo Tu We Th)(Fr)(Sa)

D.h. Montag, Dienstag, Mittwoch und Donnerstag lieferten bei besagtem Detektor ein ähnliches Verkehrsaufkommen. Für die Schulferien ergaben sich immer unterschiedliche Gruppen, ausser bei Frühlings- und Herbstferien, welche ähnliches Verkehrsaufkommen zur Folge haben:

(NoHol)(SpHol)(SprHol AutHol)(SumHol)(ChrHol)

Schliesslich ergab die Analyse der Feiertage, dass wiederum die meisten Feiertag ihr charakteristisches Verhalten zeigen, mit Ausnahme von Auffahrt und Karfreitag, und Ostersonntag und Pfingstmontag, welche jeweils einander ähnlich sind:

(NoHol) (NewYr) (GdFr,AscDay) (EaSat) (EaSun, WhtMon) (EasMon) (MayDay) (SwsDay) (ChrDay) (BoxDay)

Basierend auf diesen Klassifizierungen wurden Basisprognosen berechnet und mit den tatsächlichen Werten (welche nicht Teil der DCA-Analyse waren) verglichen. Die Vorhersagen wurden dabei so gemacht, dass für den vorherzusagenden Tag die 3 Einflussfaktoren eruiert wurden. Anhand der drei Attribute wurde die jeweils ähnlichste Attribut-Klasse gesucht. Handelte es sich z.B. um einen Freitag, welcher in den Frühlingsferien lag und ein Karfreitag war, so gehört dieser Tag zu den Attributklassen

(Fr), (SprHol AutHol), (GdFr,AscDay)

Die Basisprognose für den besagten Tag berechnet sich nun aus dem Mittel sämtlicher in den obigen drei Gruppen befindlichen Tagesganglinien (also alle Freitage, die entweder in Frühlings- oder Herbstferien lagen und bei denen sich es um Karfreitag oder Auffahrt handelte (wobei sich in diesem Fall AscDay und Freitag automatisch ausschliesst). Dies resultiert in einer Liste ähnlicher Tage l_i .

Für jeden Tag i in l_i sind die 15-Minuten-Ganglinienwerte für die Basisprognose verwendet worden gemäss dem oben beschriebenen Vorgehen.

Dieses Vorgehen wurde für drei Karfreitage und 5 normale Samstage durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung (Anhang) 40 und Abbildung (Anhang) 41 dargestellt.

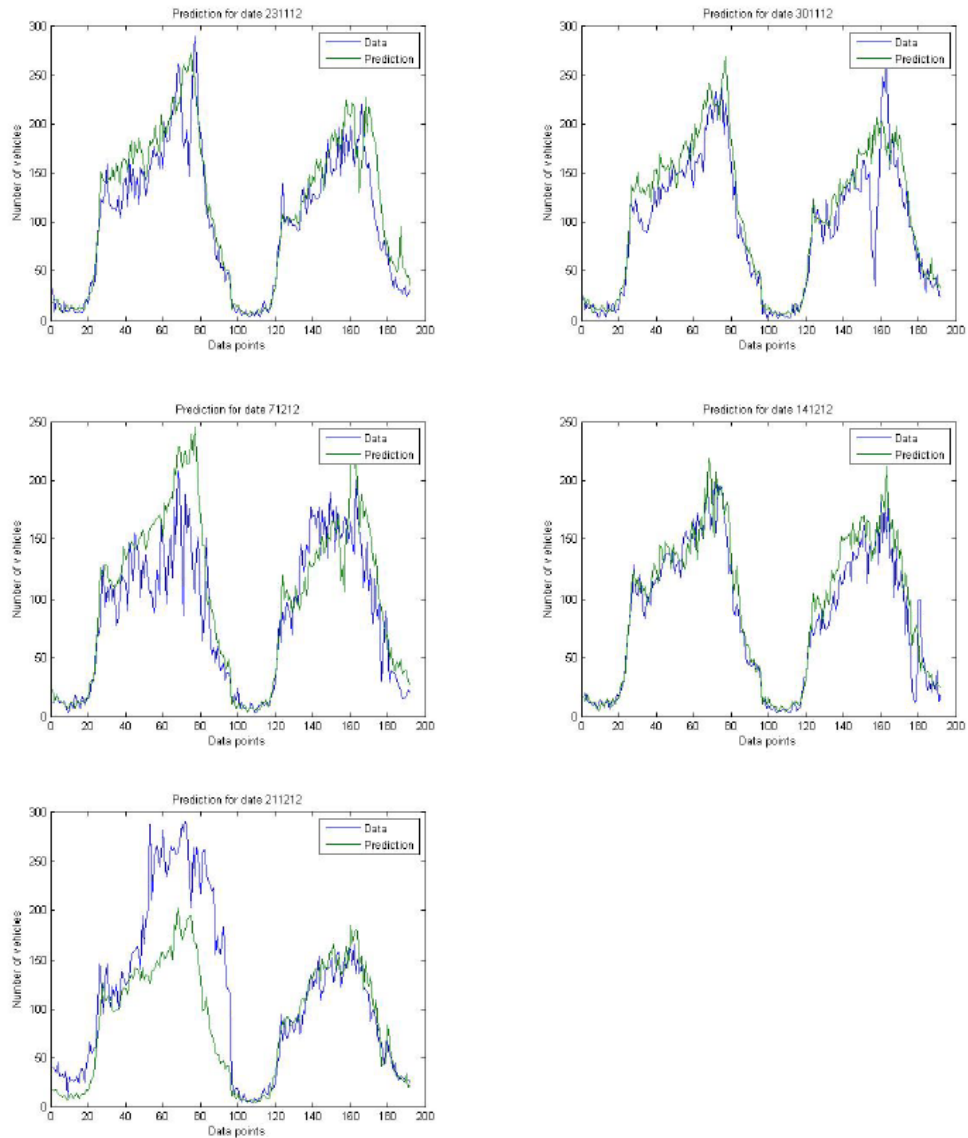


Abbildung (Anhang) 40 Basisprognose für Samstage

In Anbetracht der Tatsache, dass diese Prognosen die gesamte Tagesganglinie im Wesentlichen beliebig weit im Voraus berechnen können (realistisch: einige Wochen) sind diese Prognosen erstaunlich gut. Der letzte prognostizierte Samstag weicht jedoch deutlich von der Prognose ab. Eine Überprüfung des Datums zeigt, dass es sich dabei um den Samstag vor den Weihnachtsferien handelte. Es ist daher nicht erstaunlich, dass das Verkehrsaufkommen an diesem Tag vom normalen Durchschnitts-Samstag abwich. Die Prognose könnte mit dem DCA-Verfahren für diese Tage verbessert werden, indem die Samstage vor Ferien entsprechend gekennzeichnet werden (als ein Attribut der Ferien- oder Feiertage-Faktoren). Dieses zusätzliche Attribut, zusammen mit Brückentagen (Freitag zwischen Auffahrt und Samstag) ist bereits von Chrobok für eine Verbesserung der Prognosequalität verwendet worden und ist leicht im bestehenden Verfahren einzubauen. Alternativ und unabhängig von einer besseren Vorstrukturierung kann die Prognose verbessert werden, indem die Basisprognose mit aktuellen Kurzzeitprognosen angereichert werden (s. Kapitel 6.5).

Im Vergleich zu den Samstagen zeigt das Verkehrsaufkommen an den Karfreitagen ein deutlich anderes Muster (was auch der Grund für die unterschiedliche Klassifizierung ist). Die Prognosen für die Karfreitage sind ebenfalls von erstaunlich guter Qualität, insb. da sie weit im Voraus berechnet werden können. Die erste Prognose (links oben) ist dabei

am schlechtesten, da sich das Aufkommen am Karfreitag offenbar von den letzten Jahren geändert hat. Der Algorithmus berücksichtigt diese jährliche Änderung, sodass der Karfreitag des Folgejahres (oben rechts) deutlich besser prognostiziert werden kann. Im übernächsten Jahr fällt die Prognose noch besser aus, mit der Ausnahme der starken Schwankungen am Vormittag (links unten). Sehr wahrscheinlich handelte es sich um einen Unfall oder eine Verkehrsmassnahme, welche beide zum Zeitpunkt der Prognoseberechnung noch nicht vorhersagbar waren. Eine geeignete Kombination dieser Basisprognose mit Kurzzeitprognosen kann die Situation dahingehend verbessern, dass kurz vor Eintreten der Schwankungen eine bessere Kurzzeitprognose als Korrektur zur Basisprognose vorliegt.

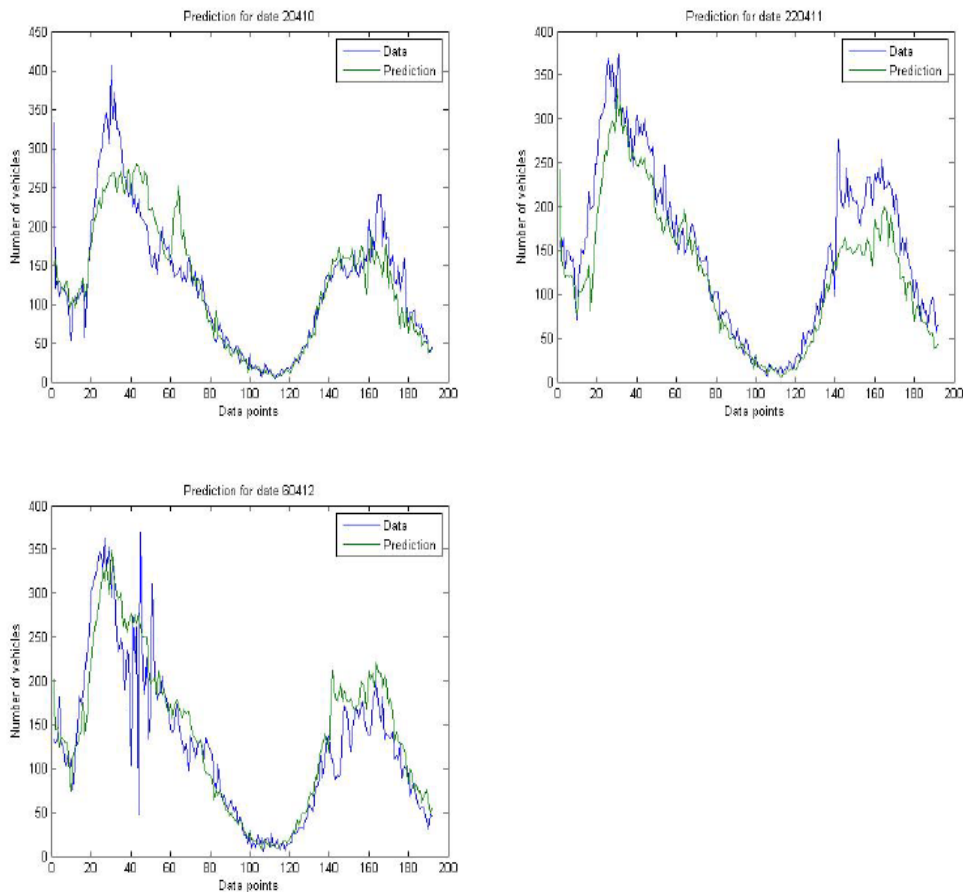


Abbildung (Anhang) 41 Basisprognose für Karfreitage

V.3 Ausfallsicherheit des Systems

Wie in Kapitel 6.6.2 gibt es drei verschiedene Ansätze, die Ausfallsicherheit zu garantieren.

1. **Eigenständige Prozess-Steuerung via Masterprozess:** Bei dieser Lösung wird ein sogenannter Masterprozess definiert, der sich via Message Bus um die Überwachung der Arbeitsprozesse (in dieser Terminologie *Tasks* genannt) kümmert. Der Masterprozess ist relativ einfach aufgebaut und startet nach wohldefinierten Kriterien (z.B. Timeouts, Prozessabstürzen) die entsprechenden Tasks neu. Damit sich die Komplexität des Master-Prozesses in Grenzen hält, sollte eine feste Zuweisung von Prozessen zu Hardware (d.h. Server) vorgenommen werden. Diese Lösung setzt nur ein Message Queue Framework voraus, benötigt aber die eigene Programmierung des Masterprozesses. Da die Tasks, wie bereits erwähnt, selbstständig mit der Da-

tenbank kommunizieren, kann je nach Systemgröße eine relativ hohe Datenbank-Auslastung resultieren. Da der Message Broker-Prozess als failover-Lösung bei den meisten AMQP-Lösungen implementiert ist, stellt der Master-Prozess den einzigen zentralen Angriffspunkt dar. Sein Ausfall ist jedoch nicht kritisch, da seine Aufgabe nur in der Überwachung besteht. Sollte aber zeitgleich ein anderer Prozess abstürzen, würde dieser Prozess nicht automatisch neu gestartet, bis der Master-Prozess wieder manuell neu gestartet wird.

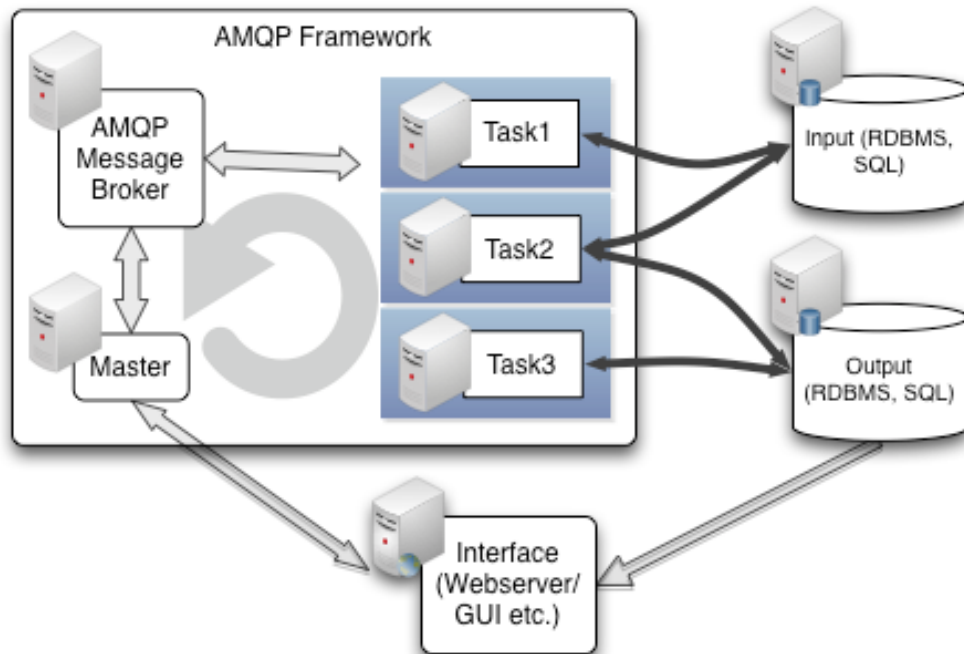


Abbildung (Anhang) 42 Schema des Master-Prozess-Ansatzes via AMQP Message Queue Framework

2. **Watchdog-Prozesse:** Hierbei handelt es sich um einen ähnlichen Ansatz wie bei 1. Anstelle eines zentralen Masterprozesses läuft nun aber auf jedem Server pro Task ein Watchdog-Prozess, der so konfiguriert ist, dass er den Task nach wohldefinierten Kriterien (Timeouts, Absturz etc.) neu startet. Der Watchdog-Prozess überwacht dabei immer nur den ihm zugewiesenen Task. Wie bei 1. ist auch hier eine direkte, vordefinierte Zuweisung von Tasks an Hardware nötig, damit die Watchdog-Prozesse einfach gehalten werden können.
3. **GRID-Framework:** Im Bereich des Hochleistungs- und Hochverfügbarkeits-Computings hat sich ein weiteres Konzept durchgesetzt: Beim GRID Computing werden die Tasks unabhängig von der Hardware von einem verteilten GRID-Framework verwaltet. Dieses Framework nimmt automatisch die Zuweisung von Tasks an frei verfügbare Server (Nodes genannt) aus dem GRID-Pool vor. Fällt ein Task oder Node aus, übernimmt das GRID-System das Re-Scheduling des Tasks. Dabei erkennt es automatisch, ob Hardware ausgefallen ist und weist in diesem Fall den Task einem anderen Node zu. Die GRID-Software läuft dabei dezentral ab, d.h. es gibt keinen zentralen Angriffspunkt (single point of failure). Aus Sicht des Softwareentwicklers reduziert sich der Aufwand, da der Aufwand für die Entwicklung des Masterprozesses und/oder der Watchdog-Prozesse entfällt. Dafür steigt die Einarbeitungszeit, da an die GRID-Software heranprogrammiert werden muss. Insbesondere muss die Message Queue der GRID-Software für die oben beschriebene Modulsynchronisation verwendet werden (die Verwendung einer externen Message Queue ist zwar denkbar, in diesem Fall entfallen aber die Vorteile einer vom GRID ausfallsicher verwalteten Message Queue). Ein weiterer grosser Vorteil dieser Lösung ist, dass die

meisten bestehenden GRID-Lösungen auch einen gemeinsam (insb. parallel verfügbaren) hochperformanten Speicherbereich anbieten. Dieser wird durch die GRID-Software unabhängig von den Tasks mit der traditionellen Datenbank synchronisiert. Dabei werden mehrere Transaktionen so gebündelt, dass die Datenbank möglichst wenig resp. gleichmässig belastet wird (sog. *write-behind*)

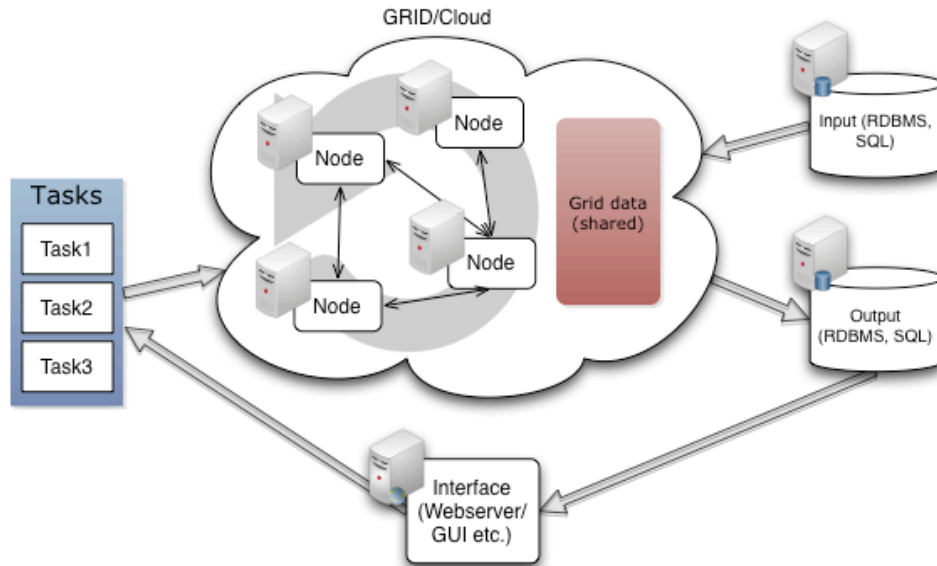


Abbildung (Anhang) 43 Schema des GRID-Ansatzes

V.4 Datenbank-Varianten

Die in Kapitel 6.6.4 aufgeführten Datenbank-Varianten lassen sich wie folgt näher beschreiben.

DB-Variante 1: Relationale Datenbank

Die traditionelle Datenbank-Konzeptvariante besteht aus einer primären relationalen Datenbank, über welche die Rechner (computing nodes) ihre Datenablage- und Zugriffsoptionen abwickeln. Der Datenbankinhalt des primären DB-Servers wird kontinuierlich auf einen identischen sekundären DB-Server gespiegelt. Dieser agiert als Backup-Datenbankserver, um einen Datenverlust zu verhindern, falls der Datenbankinhalt des primären DB-Servers beschädigt wird. Durch eine Rekonfiguration der Rechner können diese relativ einfach angewiesen werden, zwischenzeitlich den sekundären DB-Server zu verwenden. Es findet aber kein automatischer Übergang vom primären auf den sekundären DB-Server statt. Folglich bedingt ein Ausfall des primären Servers einen temporären Systemausfall. Der Systemaufbau ist in Abbildung (Anhang) 44 gezeigt.

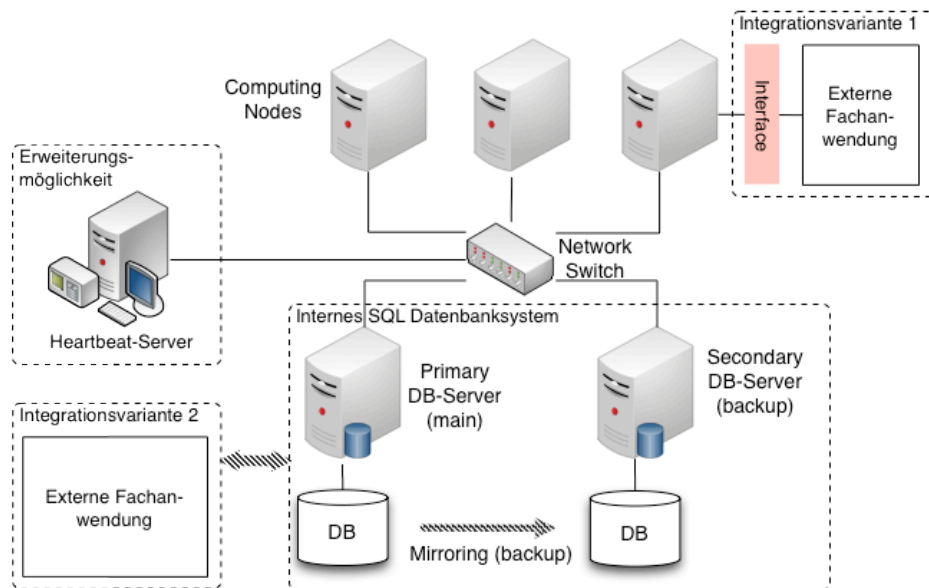


Abbildung (Anhang) 44 Systemaufbau DB-Konzept 1

Vorteil dieser Lösung ist die sehr einfache Hardware- und Software-Infrastruktur, Nachteil ist die Gefahr von Systemausfällen. Eine deutliche Verbesserung des Konzeptes im Hinblick auf Systemverfügbarkeit kann erreicht werden, indem die Rechner server automatisch bei Ausfall des primären Servers auf den sekundären ausweichen. Dies benötigt i.A. einen separaten sog. Heartbeat-Service, welcher die beiden DB-Server überwacht und ggf. bei Ausfall die Rechner server benachrichtigt, sodass diese automatisch den sekundären Server verwenden. Dies erfordert i.A. eine weitere Serverkomponente und die entsprechende, spezifische Programmierung der Benachrichtigungsroutine für die Rechner server sowie deren automatischer Rekonfigurationsroutinen. Ein sorgfältiges Testen der Szenarien ist daher unbedingt nötig.

Die Anbindung in die ASTRA-Systemlandschaft seitens Output-Daten kann nach Integrationsvariante 1 und 2 erfolgen (siehe Kapitel 6.6.3). Bei ersterer haben externe FAs keinen Direktzugriff auf die DBs des Systems und koppeln daher via Export-Schnittstellen an einen der Rechner server an. Bei Integrationsvariante 2 haben externe FAs Direktzugriff auf die Datenbanken und können daher direkt mittels SQL-Abfragen die Daten aus der internen DB beziehen.

DB-Variante 2: Relationale Datenbank mit automatischem Failover

Mit zusätzlicher Hardware-Infrastruktur kann der Programmieraufwand für die automatische Ausfallsicherheit von DB-Variante 1 relativ leicht umgangen werden. Dazu werden die DB-Server in ein separates Netzwerk ausgelagert. Auf sie kann von den Rechner servern nur noch über den zentralen Failover-Server zugegriffen werden. Dieser leitet die Datenbankabfragen intern an den primären DB-Server weiter, oder, bei dessen Ausfall, an den sekundären Server. Der Aufbau ist in Abbildung (Anhang) 45 gezeigt.

Technisch wird die Lösung durch ein entsprechendes Routing der IP-Adressen ermöglicht, welches intern im Failover-Server geschieht und mittels Betriebssystemroutinen und einem auf dem Failover-Server laufenden Heartbeat-Service leicht realisierbar ist. Auf Rechner server-Seite läuft die Umschaltung von primären auf sekundären Server unmerklich ab: Sie kommunizieren weiterhin mit dem Failover-Server (IP: 192.168.0.1) und müssen daher nicht rekonfiguriert werden. Damit verbunden ist das Prognosesystem wenn überhaupt so nur unmerklich kurz in seiner Funktionalität unterbrochen (ggf. werden DB-Abfragen, die während der Umschaltung erfolgten, nicht beantwortet und müssen wiederholt werden).

Die Lösung bietet dadurch mit technischen einfachen Mitteln und Standardkomponenten eine Lösung mit guter Verfügbarkeit an. Einziger Schwachpunkt ist der Failover-Server, da bei dessen Ausfall das System keine DB-Anfragen mehr ausführen kann. Da dieser

Server aber wenig Systemlast zu bewältigen hat, ist sein Ausfall aber relativ unwahrscheinlich. Diese Anfälligkeit kann zusätzlich vermindert werden, indem speziell für diesen Zweck konzipierte hardwarebasierte Failover-Router verwendet werden.

Die Anbindung der externen FAs geschieht analog wie zur DB-Variante 1 entweder über Export-Schnittstellen (Integrationsvariante 1) oder via Direkt-Zugriff per SQL-Abfragen auf die System-DB (Integrationsvariante 2).

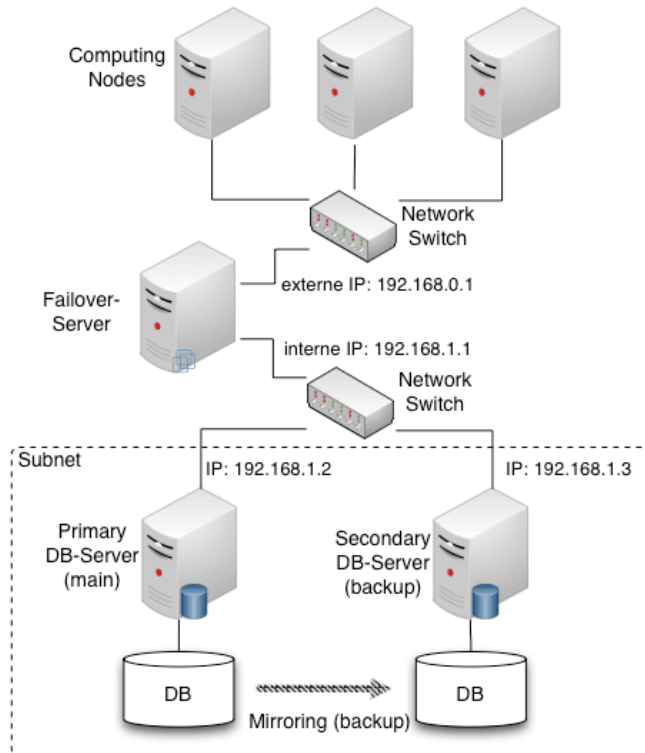


Abbildung (Anhang) 45 Aufbau DB-Konzept 2

DB-Variante 3: Key-Value-Datenbank

Wesentlicher Unterschied der Key-Value-Datenbank-Ablage gegenüber den vorherigen Konzepten ist, dass hierbei die Datenablage verteilt geschieht und daher kein dedizierter DB-Server mehr existiert. Stattdessen kümmern sich die Rechenserver selber um die lokale Ablage der Daten, während das GRID-System dafür sorgt, dass die Daten redundant abgelegt sind. Es findet aber wohlgemerkt keine Synchronisation der Daten statt, d.h. nicht jeder Rechnenode verfügt physisch lokal über sämtliche Daten. Dadurch skaliert dieses Datenbankkonzept optimal für grosse, wachsende Datenmengen und ist gleichzeitig in höchstem Grade ausfallsicher. Die Behandlung von Hard- und Softwareausfällen wird komplett von der GRID-Software übernommen. Es ist daher keine Eigenimplementation von Überwachungs- oder Ausfall-Behandlungsroutinen nötig. Der DB-Systemaufbau ist in Abbildung (Anhang) 46 schematisch gezeigt.

Da die direkte Programmierung an eine Key-Value-DB mühsam ist (insb. da keine Relationen und Tabellenstrukturen, Filter etc. existieren), bieten praktisch alle Key-Value-DBs mittlerweile SQL-Interfaces an, die eine Verwaltung der Daten mittels SQL-Abfragen erlaubt. Meistens wird allerdings nur ein Subset der SQL-Syntax unterstützt, was in Ausnahmefällen die Auslagerung von Filter- oder Abfragelogik von der DB in die Programmlogik nötig macht. Z. B. müssen die Systemmodule so programmiert werden, dass sie anstelle von komplexen, verschachtelten SQL-Abfragen mehrere einfachere SQL-Abfragen verwenden und deren Output ggf. selber in die benötigte Form zusammenfügen. Da die benötigten Datenbank-Abfragen aber grösstenteils von geringer Komplexität sind (da mehrheitlich nur tabellarische Abfragen ohne Relationen abgefragt werden müssen), dürfte sich dieser Zusatzaufwand im kleinen Rahmen halten.

Die Anbindung externer FAs an Output-Daten des Systems ist bei dieser DB-Lösung

stark von der Integrationsvariante abhängig: Bei Integrationsvariante 1 haben externe FAs nur über die Exportschnittstellen des Systems auf Systemdaten Zugriff. Diese Anbindung erfolgt daher analog wie bei den SQL-DB-Konzepten über einen Rechnenode, welcher die entsprechende Schnittstelle anbietet.

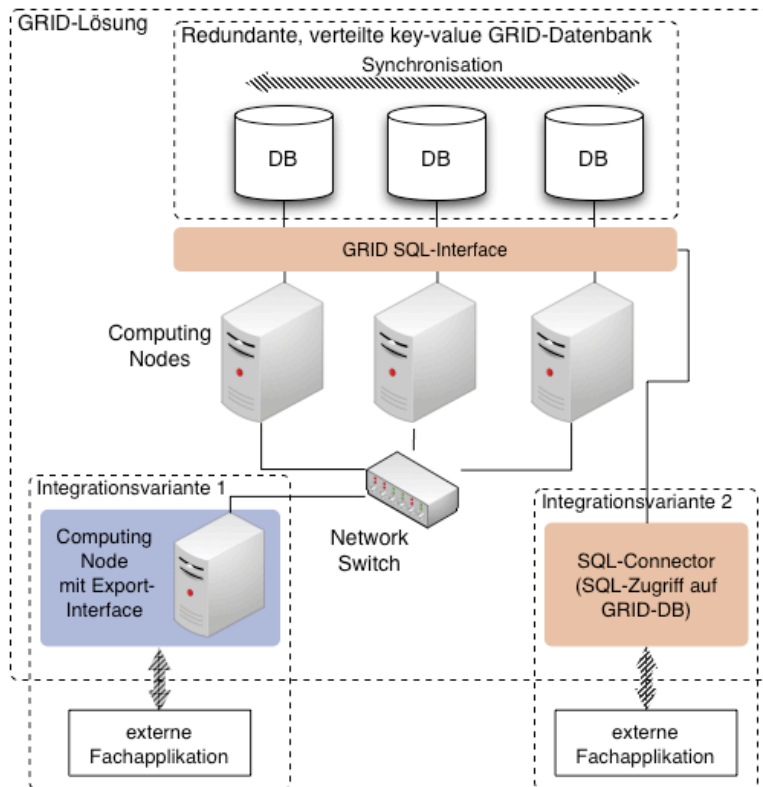


Abbildung (Anhang) 46 Aufbau DB-Konzept 3

Die Anbindung externer FAs via Integrationsvariante 2 verlangt den direkten DB-Zugriff durch externe FAs. Dies ist aufgrund der verteilten Datenablage nun nicht mehr ohne weiteres möglich (zumindest nicht via SQL-Abfragen). Da ein externer SQL-Zugriff aber für viele Geschäftsanwendungen nötig ist, existieren zahlreiche Anbieter sogenannter SQL-Connectors. Diese Schnittstellen erlauben ein SQL-Interface zur Key-Value-Datenbank mit Lese- und Schreibzugriff. Es ist aber zu beachten, dass nur ein Grundset von SQL-Statements von diesen Lösungen unterstützt wird. Die Funktionalität sollte zwar bei allen verfügbaren Lösungen für den Datenaustausch ausreichen, muss aber vor Festlegung auf einen SQL-Connector noch im Detail überprüft werden.

DB-Konzept 4: Key-Value-Datenbank mit SQL-Backend

Als Kombination von Key-Value-DBs und traditionellen RDBMS bietet sich als letzte Konzeptvariante ein Aufbau, wie in Abbildung (Anhang) 47 Abbildung (Anhang) 47 gezeigt, an. Hierbei arbeitet das System quasi mit zwei Datenbanken: Der internen Key-Value-DB für rein interne Datenspeicherung (z.B. temporäre Daten, oder Zwischenspeicher für Performance-Optimierung), und eine externe SQL-Datenbank für sämtliche aufbereiteten Output-Daten. Während die Programmierung der Systemmodule durch die Verwendung zweier unterschiedlicher DBs komplexer wird, ist dafür die Anbindung der externen FAs via externe SQL-DB trivial. Grundsätzlich kann das System so aufgebaut resp. implementiert werden, dass die Systemmodule auch aus der externen DB Daten ins System zurücklesen, womit die direkte Kommunikation zwischen der Verkehrsprognose-FA und externen FAs möglich ist, ohne auf die verteilte interne DB-Ablage zu verzichten. Es ist auch denkbar, dass es sich bei der externen SQL-DB um die ASTRA-Datenbank-Server handelt, wodurch eine sehr starke Ankopplung des Verkehrsprognosesystems an die ASTRA-Systemlandschaft (s. Integrationsvariante 3, siehe Kapitel 6.6.3) ermöglicht wird.

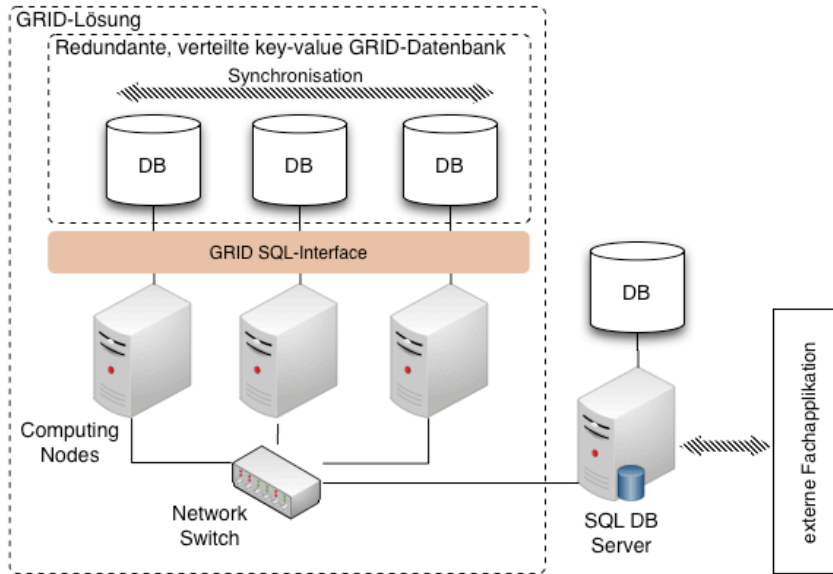


Abbildung (Anhang) 47 Kombination aus Key-Value-DB mit SQL-Backend

VI Anhänge Beurteilung Konzept Verkehrs- und Stauprognosesystem (Kapitel 7)

VI.1 Beurteilungsraster für das Systemkonzept und Mindestanforderungen

Hauptkriterien	Teilkriterien	Zielgrößen	Mindestanforderungen
1. Prognosefähigkeit / Qualität	1.1 Anwendungszwecke	Verkehrsinformation, Routenplanung, Verkehrsmanagement	Verkehrsmanagement und Verkehrsinformation
	1.2 Prognosekenngrößen	Reisezeiten/Reisezeitverluste, Staulängen, künftige Verkehrslage, Staudauer	Reisezeiten/Reisezeitverluste
	1.3 Abdeckung Strassenklassen und räumliche Auflösung	Nationalstrassen, kantonale HLS und HVS	Nationalstrassen
	1.4 Abdeckung Verkehrsdaten	Querschnittsdaten und Streckendaten	Querschnittsdaten
	1.5 Abdeckung externe Faktoren	Abdeckung relevanter externer Faktoren: Momentaner Verkehr, Wochentag, Ferienkalender, Wetter, Grossanlässe, Baustellen, Unfälle / andere Störungen, VM-Massnahmen / Netzstatus	Momentaner Verkehr, Ferienkalender Schweiz
2. Realisierbarkeit	2.1 Komplexität	Möglichst gering	-
3. Kosten	3.1 Kosten	Möglichst geringe Kosten	-

VI.2 Beurteilungsblätter

Hauptkriterium: 1. Prognosefähigkeit/Qualität		Teilkriterium: 1.1 Anwendungszwecke	
Zielgrößen: 1.1.1 Verkehrsinformation (= Mindestanforderung) 1.1.2 Reise- und Routenplanung 1.1.3 Verkehrsmanagement (= Mindestanforderung)			
Grundlage für die Bewertung: Nach Etappe 4 werden etwa 70% der Anforderungen abgedeckt, die in der Bedürfnisanalyse (Kap. 3) eruiert worden sind.			
		Fortschritte gegenüber der vorgängigen Etappe	Bewertung
1. Etappe	1.1.1	Die wesentlichen Informationen sind geliefert (inkl. Darstellung).	+2
	1.1.2	Keine Reise- und Routenplanung.	0
	1.1.3	Einbindung der Verkehrsinformationsprognose in das Verkehrsmanagement über Website/Webservice ohne spezielle Export/Import-Schnittstelle (keine Unterscheidung zwischen VIP und VMP).	+1
	Gesamtbewertung 1. Etappe: Etappe 1 erfüllt die Mindestanforderungen. Die wesentlichen Informationen (obwohl teilweise nur abgeleitet, wie Reisezeiten/Reisezeitverluste) sind für die Verkehrsinformation bereits abgedeckt. Beim Verkehrsmanagement ist erst eine minimale Funktionalität gewährleistet.		Zwischentotal 3
2. Etappe	1.1.1	Kein Fortschritt.	0
	1.1.2	Einbau von Reise- Routenplanung Funktion (Reisezeitprognosen für vorgegebene Quell-Ziel-Punkte, Auflistung der streckenbezogenen Reisezeitinformationen, u.a.)	+2
	1.1.3	Einbau Analysefunktion (Fehlerhistorie), Interface zur Verwaltung von Event-/Kalenderdaten. Schnittstelle on-trip Reisezeit-Daten (Echtzeit).	+1
	Gesamtbewertung 2. Etappe: Mit verschiedenen Funktionen wird die Reise- Routenplanung eingebaut. Verschiedene Verbesserungen der Verkehrsmanagement-Funktion, aber kein Entwicklungssprung.		Zwischentotal 6
3. Etappe	1.1.1	Einbau einer neuen Darstellung.	+1
	1.1.2	Eingabe von Quelle-Ziel möglich. Rerouting basierend auf aktuellen (nicht auf prognostizierten) Geschwindigkeiten. Pre-trip Prognosehorizont mit Ganglinienprognosen. Segmentbezogene Prognose der Reisezeiten (für Autobahn und ausgewählte Autostrassen) mit Angabe der Reisezeitverluste gegenüber Situation „freier Verkehrsfluss“.	+1
	1.1.3	Schnittstelle für pre-trip Reisezeit-Daten (für vordefinierte Segmente) und zur Auflistung von Segmenten mit erheblichen Reisezeitverlusten. Reisezeitprognosen gemäss Standard-Benutzerinterface ohne spezielle Schnittstellen.	+1
	Gesamtbewertung 3. Etappe: Die Verkehrsinformation und das Verkehrsmanagement werden in begrenztem Masse erweitert. Die Reise- und Routenplanung erfährt, dank der Möglichkeit Quelle und Ziel einzugeben, eine kleine Entwicklung.		Zwischentotal 9
4. Etappe	1.1.1	Darstellung der Stauinformationen via bestehendes Interface mit verbesserten Verkehrszustandsprognosen (Simulation bei Regime-Wechsel).	+1
	1.1.2	Rerouting basierend auf prognostizierten Segmentreisezeiten. Verbesserte Reisezeitberechnung.	+2
	1.1.3	Automatisierte Schnittstelle für VM-Massnahmen	+2
	Gesamtbewertung 4. Etappe: Die Möglichkeit zum Rerouting stellt bei der Reise- und Routenplanung einen Entwicklungssprung dar. Bei der Verkehrsinformation gibt es begrenzte Verbesserungen. Der Verkehrsmanagement-Service wird deutlich erweitert.		Total 14

Legende: 0 = Kein Fortschritt; 1 = Fortschritt klein; 2 = Fortschritt gross

Bewertungsschema

Systemzustand	Punktzahl	In Prozent der Anforderungen gemäss Kap. 3
1. Etappe	3 / 14	15%
2. Etappe	6 / 14	30%
3. Etappe	9 / 14	45%
4. Etappe	14 / 14	70%

Hauptkriterium: 1. Prognosefähigkeit/Qualität		Teilkriterium: 1.2 Prognosekenngrößen und erwartete Qualität	
Zielgrößen: 1.2.1 Reisezeiten / Reisezeitverluste (= Mindestanforderung) 1.2.2 Staulängen 1.2.3 Künftige Verkehrslage 1.2.4 Staudauer			
Grundlage für die Bewertung: Nach Etappe 4 werden 100% der Anforderungen abgedeckt, die in der Bedürfnisanalyse (Kap. 3) eruiert worden sind (die nicht abgedeckten Kenngrößen können aus den abgedeckten Kenngrößen abgeleitet werden). Die Qualität hängt von der Methodik und von den Datengrundlagen ab.			
		Fortschritte gegenüber der vorgängigen Etappe	Bewertung
1. Etappe	1.2.1	Abgeleitete Prognose der Reisezeiten.	+1
	1.2.2	Abgeleitete Prognose der Staulänge.	+1
	1.2.3	Künftige Verkehrslage erfasst.	+2
	1.2.4	Abgeleitete Prognose der Staudauer.	+1
	Gesamtbewertung 1. Etappe: Die Angabe der Reisezeiten und der Reisezeitverluste erfüllt die Mindestanforderungen, obwohl es sich erst um abgeleitete Größen handelt (weniger genau als direkt berechnete Größen). Sämtliche abgeleitete Größen besitzen noch ein Potential zur Entwicklung.		
2. Etappe	1.2.1	Direkte Prognose für vorgegebene Quell-Ziel-Punkte.	+2
	1.2.2	Kein Fortschritt.	0
	1.2.3	Kein Fortschritt.	0
	1.2.4	Kein Fortschritt.	0
	Gesamtbewertung 2. Etappe: Die direkte Prognose der Reisezeiten und der Reisezeitverluste ist eine bedeutende Entwicklung.		
3. Etappe	1.2.1	Segmentbezogene Prognose der Reisezeiten. Möglichkeit zur Eingabe von Start-Ziel-Relationen.	+2
	1.2.2	Direkte Prognose der Staulängen	+1
	1.2.3	Kein Fortschritt.	0
	1.2.4	Direkte Prognose der Staudauer	+1
	Gesamtbewertung 3. Etappe: Die Ermittlung der Reisezeiten ist dank der segmentbezogenen Prognose in der 3. Etappe verbessert. Die direkte Prognose der Staudauer stellt eine kleine Entwicklung dar.		
4. Etappe	1.2.1	Kein Fortschritt.	0
	1.2.2	Staulängenberechnung mittels Einbindung von Simulationen.	+2
	1.2.3	Kein Fortschritt.	0
	1.2.4	Staudauer mittels Simulationen.	+2
	Gesamtbewertung 4. Etappe: In der 4. Etappe finden zwei Verbesserungen statt, die einen Entwicklungssprung darstellen. Beide erfolgen dank der Einbindung von Simulationen.		

Legende: 0 = Kein Fortschritt; 1 = Fortschritt klein; 2 = Fortschritt gross

Bewertungsschema

Systemzustand	Punktzahl	In Prozent der Anforderungen gemäss Kap. 3
1. Etappe	5 / 15	33%
2. Etappe	7 / 15	47%
3. Etappe	11 / 15	73%
4. Etappe	15 / 15	100%

Hauptkriterium: 1. Prognosefähigkeit/Qualität		Teilkriterium: 1.2 Prognosekenngrößen und erwartete Qualität	
Zielgrößen: 1.2.1 Reisezeiten / Reisezeitverluste (= Mindestanforderung) 1.2.2 Staulängen 1.2.3 Künftige Verkehrslage 1.2.4 Staudauer			
Grundlage für die Bewertung: Nach Etappe 4 werden 100% der Anforderungen abgedeckt, die in der Bedürfnisanalyse (Kap. 3) eruiert worden sind (die nicht abgedeckten Kenngrößen können aus den abgedeckten Kenngrößen abgeleitet werden). Die Qualität hängt von der Methodik und von den Datengrundlagen ab.			
	Fortschritte gegenüber der vorgängigen Etappe		Bewertung
1. Etappe	1.2.1	Abgeleitete Prognose der Reisezeiten.	+1
	1.2.2	Abgeleitete Prognose der Staulänge.	+1
	1.2.3	Künftige Verkehrslage erfasst.	+2
	1.2.4	Abgeleitete Prognose der Staudauer.	+1
	Gesamtbewertung 1. Etappe: Die Angabe der Reisezeiten und der Reisezeitverluste erfüllt die Mindestanforderungen, obwohl es sich erst um abgeleitete Größen handelt (weniger genau als direkt berechnete Größen). Sämtliche abgeleitete Größen besitzen noch ein Potential zur Entwicklung.		Zwischentotal 5
2. Etappe	1.2.1	Direkte Prognose für vorgegebene Quell-Ziel-Punkte.	+2
	1.2.2	Kein Fortschritt.	0
	1.2.3	Kein Fortschritt.	0
	1.2.4	Kein Fortschritt.	0
	Gesamtbewertung 2. Etappe: Die direkte Prognose der Reisezeiten und der Reisezeitverluste ist eine bedeutende Entwicklung.		Zwischentotal 7
3. Etappe	1.2.1	Segmentbezogene Prognose der Reisezeiten. Möglichkeit zur Eingabe von Start-Ziel-Relationen.	+2
	1.2.2	Direkte Prognose der Staulängen	+1
	1.2.3	Kein Fortschritt.	0
	1.2.4	Direkte Prognose der Staudauer	+1
	Gesamtbewertung 3. Etappe: Die Ermittlung der Reisezeiten ist dank der segmentbezogenen Prognose in der 3. Etappe verbessert. Die direkte Prognose der Staudauer stellt eine kleine Entwicklung dar.		Zwischentotal 11
4. Etappe	1.2.1	Kein Fortschritt.	0
	1.2.2	Staulängenberechnung mittels Einbindung von Simulationen.	+2
	1.2.3	Kein Fortschritt.	0
	1.2.4	Staudauer mittels Simulationen.	+2
	Gesamtbewertung 4. Etappe: In der 4. Etappe finden zwei Verbesserungen statt, die einen Entwicklungssprung darstellen. Beide erfolgen dank der Einbindung von Simulationen.		Total 15

Legende: 0 = Kein Fortschritt; 1 = Fortschritt klein; 2 = Fortschritt gross

Bewertungsschema

Systemzustand	Punktzahl	In Prozent der Anforderungen gemäss Kap. 3
1. Etappe	5 / 15	33%
2. Etappe	7 / 15	47%
3. Etappe	11 / 15	73%
4. Etappe	15 / 15	100%

Hauptkriterium: 1. Prognosefähigkeit/Qualität		Teilkriterium: 1.3 Abdeckung Strassenklassen	
Zielgrößen:			
1.3.1 Nationalstrassen (= Mindestanforderung)			
1.3.2 Kantonalstrassen HLS und HVS			
Grundlage für die Bewertung: Nach Etappe 4 werden etwa 85% der Anforderungen abgedeckt, die in der Bedürfnisanalyse (Kap. 3) eruiert worden sind.			
		Fortschritte gegenüber der vorgängigen Etappe	Bewertung
1. Etappe	1.3.1	Nationalstrassen abgedeckt.	+2
	1.3.2	Kantonale HLS und HVS punktuell abgedeckt.	+1
	Gesamtbewertung 1. Etappe: Mit der Abdeckung der Nationalstrassen ist die Mindestanforderung erfüllt		Zwischentotal 3
2. Etappe	1.3.1	Kein Fortschritt.	0
	1.3.2	Kein Fortschritt.	0
	Gesamtbewertung 2. Etappe: Kein Fortschritt.		Zwischentotal 3
3. Etappe	1.3.1	Kein Fortschritt.	0
	1.3.2	Kantonale HLS und HVS vollständig abgedeckt.	+2
	Gesamtbewertung 3. Etappe: Die Prognosen werden mit der 3. Etappe neu auch für die kantonalen HLS und HVS durchgeführt.		Zwischentotal 5
4. Etappe	1.3.1	Kein Fortschritt.	0
	1.3.2	Kein Fortschritt.	0
	Gesamtbewertung 4. Etappe: Kein Fortschritt		Total 5

Legende: 0 = Kein Fortschritt; 1 = Fortschritt klein; 2 = Fortschritt gross

Bewertungsschema

Systemzustand	Punktzahl	In Prozent der Anforderungen gemäss Kap. 3
1. Etappe	3 / 5	51%
2. Etappe	3 / 5	51%
3. Etappe	5 / 5	85%
4. Etappe	5 / 5	85%

Hauptkriterium: 1. Prognosefähigkeit/Qualität		Teilkriterium: 1.4 Abdeckung Verkehrsdaten	
Zielgrößen: 1.4.1 Querschnittsdaten (= Mindestanforderung) 1.4.2 Streckendaten			
Grundlage für die Bewertung: Nach Etappe 4 werden etwa 70% der Anforderungen abgedeckt, die in der Bedürfnisanalyse (Kap. 3) eruiert worden sind.			
		Fortschritte gegenüber der vorgängigen Etappe	Bewertung
1. Etappe	1.4.1	Querschnittsdaten angewendet.	+1
	1.4.2	Streckendaten nicht berücksichtigt.	0
	Gesamtbewertung 1. Etappe: Die Mindestanforderungen werden mit der Benützung von Querschnittsdaten erreicht.		Zwischentotal 1
2. Etappe	1.4.1	Keine Änderung.	0
	1.4.2	Streckendaten angewendet.	+2
	Gesamtbewertung 2. Etappe: Die Berücksichtigung von Streckendaten verbessert die Prognosefähigkeit deutlich.		Zwischentotal 3
3. Etappe	1.4.1	Kein Fortschritt.	0
	1.4.2	Kein Fortschritt.	0
	Gesamtbewertung 3. Etappe: Kein Fortschritt, aber der Einbezug von weiteren Datenquellen wird geprüft.		Zwischentotal 3
4. Etappe	1.4.1	Kein Fortschritt.	0
	1.4.2	Kein Fortschritt.	0
	Gesamtbewertung 4. Etappe: Kein Fortschritt, aber der Einbezug von weiteren Datenquellen wird geprüft.		Total 3

Legende: 0 = Kein Fortschritt; 1 = Fortschritt klein; 2 = Fortschritt gross

Bewertungsschema

Systemzustand	Punktzahl	In Prozent der Anforderungen gemäss Kap. 3
1. Etappe	1 / 3	23%
2. Etappe	3 / 3	70%
3. Etappe	3 / 3	70%
4. Etappe	3 / 3	70%

Hauptkriterium: 1. Prognosefähigkeit/Qualität		Teilkriterium: 1.5 Abdeckung externe Faktoren		
Zielgrössen: 1.5.1 Momentaner Verkehr (= Mindestanforderung) 1.5.2 Wochentag 1.5.3 Wetter, Witterung 1.5.4 Ferienkalender (= Mindestanforderung) 1.5.5 Grossanlässe 1.5.6 Baustellen 1.5.7 Unfälle, andere Störungen 1.5.8 Verkehrsmanagement-Massnahmen/Netzzustand				
Grundlage für die Bewertung: Nach Etappe 4 werden etwa 97% der Anforderungen abgedeckt, die in der Bedürfnisanalyse (Kap. 3) eruiert worden sind.				
		Fortschritte gegenüber der vorgängigen Etappe	Bewertung	
1. Etappe	1.5.1	Der momentane Verkehr wird berücksichtigt.	+2	
	1.5.2	Wochentag berücksichtigt.	+2	
	1.5.3	Wetter nicht berücksichtigt.	0	
	1.5.4	Nur der Schweizer Ferienkalender wird berücksichtigt.	+2	
	1.5.5	Grossanlässe nicht berücksichtigt.	0	
	1.5.6	Baustellen sind in den Prognosen nicht berücksichtigt.	0	
	1.5.7	Unfälle und andere Störungen nicht berücksichtigt.	0	
	1.5.8	VM-Eingriffe bei der Netzstruktur (z.B. Strassensperrungen) können manuell eingefügt werden	+1	
	Gesamtbewertung 1. Etappe: Die 1. Etappe erfüllt die Mindestanforderungen.			Zwischentotal 7
2. Etappe	1.5.1	Kein Fortschritt.	0	
	1.5.2	Kein Fortschritt.	0	
	1.5.3	Wetter wird berücksichtigt.	+2	
	1.5.4	In- und Ausland-Ferienkalender berücksichtigt.	+1	
	1.5.5	Kein Fortschritt.	+2	
	1.5.6	Baustellen berücksichtigt.	0	
	1.5.7	Kein Fortschritt.	0	
	1.5.8	Kein Fortschritt.	0	
	Gesamtbewertung 2. Etappe: Die Berücksichtigung der Wetterbedingungen und der Baustellen stellt einen Entwicklungssprung dar. Im Vergleich mit der 1. Etappe werden zusätzlich auch die ausländischen Ferienkalender (Nachbarländer) berücksichtigt.			Zwischentotal 12
3. Etappe	1.5.1 bis 1.5.4	Kein Fortschritt.	0	
	1.5.5	Grossanlässe werden berücksichtigt.	+2	
	1.5.6	Kein Fortschritt.	0	
	1.5.7	Kein Fortschritt.	0	
	1.5.8	Kein Fortschritt.	0	
	Gesamtbewertung 3. Etappe: Diese Etappe berücksichtigt zusätzlich die Grossanlässe.			Zwischentotal 14
	4. Etappe	1.5.1 bis 1.5.6	Kein Fortschritt.	0
1.5.7		Unfälle und andere Störungen betrachtet.	+2	
1.5.8		Automatisierte Schnittstelle für VM-Massnahmen	+2	
Gesamtbewertung 4. Etappe: Diese Etappe berücksichtigt zusätzlich die Unfälle und andere Störungen.			Total 18	

Legende: 0 = Kein Fortschritt; 1 = Fortschritt klein; 2 = Fortschritt gross

Bewertungsschema

Systemzustand	Punktzahl	In Prozent der Anforderungen gemäss Kap.3
1. Etappe	7	38%
2. Etappe	12	65%
3. Etappe	14	75%
4. Etappe	18	97%

Hauptkriterium: 2. Realisierbarkeit		Teilkriterium: 2.1 Komplexität	
Zielgrößen:			
2.1.1 Minimierung der Komplexität bezüglich Verkehrsdaten			
2.1.2 Minimierung der Komplexität bezüglich Umfeld- und Ereignisdaten			
2.1.3 Minimierung der Komplexität bezüglich Netz			
2.1.4 Minimierung der Komplexität bezüglich Algorithmen			
2.1.5 Minimierung der Komplexität bezüglich Schnittstellen			
Grundlage für die Bewertung: Die Anforderung lautet so wenig Komplexität wie möglich. Wir gehen davon aus, dass in der 4. Etappe die grösste Komplexität erreicht wird (das heisst 0% der Anforderung erreicht). Die Zielerreichung der vorgängigen Etappen wird in Bezug auf die Komplexität der Etappe 4 bestimmt.			
		Zunahme der Komplexität gegenüber der vorgängigen Etappe	Bewertung
1. Etappe	2.1.1	Ausgangskomplexität Datenquelle	+2
	2.1.2	Schweizer Ferienkalender, momentaner Verkehr und Netzstruktur.	+1
	2.1.3	Ausgangskomplexität Netz.	+2
	2.1.4	Ausgangskomplexität Algorithmen.	+2
	2.1.5	Minimale Schnittstelle zur Einbindung der Verkehrsinformation.	+1
	Gesamtbewertung 1. Etappe: Die angewendeten Daten sind statisch und deswegen nicht allzu komplex einzubeziehen. Die Ausgangskomplexität von Datenquelle, Netz und der Algorithmen ist höher als die von Daten und Schnittstelle.		
2. Etappe	2.1.1	Zusätzliche Datenquellen.	+2
	2.1.2	Wetter, Auslands-Ferienkalender und Baustellen.	+2
	2.1.3	Kein Fortschritt.	0
	2.1.4	Erweiterung Algorithmen.	+1
	2.1.5	Angepasste Schnittstelle: Analysefunktion, Interface zur Verwaltung von Event/Kalenderdaten.	+2
	Gesamtbewertung 2. Etappe: Bezüglich Datenquelle, Umfeld- und Ereignisdaten (vor allem Wetterdaten) und Schnittstelle ergibt sich ein Komplexitätssprung.		
3. Etappe	2.1.1	Kein Fortschritt.	0
	2.1.2	Grossanlässe.	+1
	2.1.3	Erweiterung Netz.	+2
	2.1.4	Erweiterung Algorithmen.	+2
	2.1.5	Schnittstelle: Auflistung mit erheblichem Reisezeitverlust und pre-trip Reisezeitendaten.	+1
	Gesamtbewertung 3. Etappe: Neu werden kantonale HVS und HLS einbezogen. Dies widerspiegelt sich in einem Sprung der Komplexität des Netzes. Die Komplexität der Algorithmen wächst ebenso beachtlich.		
4. Etappe	2.1.1	Kein Fortschritt.	0
	2.1.2	Unfälle und andere Störungen.	+2
	2.1.3	Kein Fortschritt.	0
	2.1.4	Erweiterung Algorithmen.	+2
	2.1.5	Schnittstelle Stauwarnung.	+2
	Gesamtbewertung 4 Etappe: Unfälle und Störungen erhöhen die Komplexität der Umfeld- und Ereignisdaten massgebend. Ebenso wächst die Komplexität der Algorithmen und der Schnittstelle signifikant.		

Legende: 0 = Kein Fortschritt; 1 = Fortschritt klein; 2 = Fortschritt gross

Bewertungsschema

Systemzustand	Punktzahl	In Prozent der Anforderungen
1. Etappe	8 / 27	70%
2. Etappe	15 / 27	43%
3. Etappe	21 / 27	19%
4. Etappe	27 / 27	0%

Hauptkriterium: 3. Kosten		Teilkriterium: 3.1 Kosten	
Zielgrößen: 3.1.1 Basissystem 3.1.2 Datenkomplexität 3.1.3 Rechenkomplexität 3.1.4 Netzkomplexität			
Grundlage für die Bewertung: Die Anforderung lautet so wenige Kosten wie möglich. Wir gehen davon aus, dass in der 4. Etappe die höchsten Kosten erreicht werden (das heisst 0% der Anforderung erreicht). Die Zielerreichung der vorgängigen Etappen wird in Bezug auf die Kosten der Etappe 4 bestimmt.			
		Zunahme des Aufwandes gegenüber der vorgängigen Etappe	Bewertung
1. Etappe	3.1.1	Basis für alle Etappen wird gelegt.	+2
	3.1.2	Basisdaten.	+2
	3.1.3	Basisalgorithmen.	+1
	3.1.4	Basis-Netz.	+1
	Gesamtbewertung 1. Etappe: Hohe Anfangskosten für das Basissystem und Basisdaten		Zwischentotal 6
2. Etappe	3.1.1	Kleiner Ausbau des Basissystems.	+1
	3.1.2	Integration von Streckendaten etc.	+2
	3.1.3	Prognosealgorithmen.	+2
	3.1.4	Kleiner Ausbau des Basis-Netzes.	+1
	Gesamtbewertung 2. Etappe: Die Einbeziehung komplexerer Daten und die Entwicklung der Algorithmen stellen den grössten Kostensprung gegenüber der Etappe 1 dar.		Zwischentotal 12
3. Etappe	3.1.1	Kleiner Ausbau des Basissystems.	+1
	3.1.2	Integration von weiteren Datenquellen.	+2
	3.1.3	Routingalgorithmen.	+2
	3.1.4	Ausbau des Netzes.	+2
	Gesamtbewertung 3. Etappe: Das Basissystem entwickelt sich nur minimal. Die Kosten für die anderen Positionen erfahren einen Sprung gegenüber Etappe 2		Zwischentotal 19
4. Etappe	3.1.1	Kleiner Ausbau des Basissystems.	+1
	3.1.2	Simulationen.	+2
	3.1.3	Simulationen geplant.	+2
	3.1.4	Kleiner Ausbau des Netzes.	+1
	Gesamtbewertung 4 Etappe: Das Basissystem wird angepasst. Die Simulationen steigern die Komplexität der Software beachtlich und entsprechend auch die Kosten.		Total 25

Legende: 0 = Kein Kostensprung; 1 = Kostensprung klein und klein-mittel; 2 = Kostensprung mittel bis gross

Bewertungsschema

Systemzustand	Punktzahl	In Prozent der Anforderungen
1. Etappe	6 / 25	76%
2. Etappe	12 / 25	52%
3. Etappe	19 / 25	24%
4. Etappe	25 / 25	0%

Abkürzungen und Glossar

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
AAN	Artificial Neural Networks
ABS	Antiblockiersystem
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
ASR	Antriebsschlupfregelung
AVZ	Automatische Strassenverkehrszählung
CA	Cellular Automata (Zellulärer Automat)
Car2X	Car2X Kommunikation bezeichnet die Fahrzeug-zu-Fahrzeug und die Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation, die sowohl auf einer angepassten Wireless LAN Technologie also auch auf Mobilfunk beruhen.
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
DVC	Daily Variation Curves (Tagesganglinien)
DWV	Durchschnittlicher Werktägliches Verkehr
ESP	Electronic Stability Programme
GARCH	Generalized Autoregressive Conditional Heteroschedastic
GPS	Global Positioning System
IDM	Intelligent Driver Model
LWR	Lighthill-Whitham-Richards Modell
MFZ	Motorfahrzeug
MISTRA	Management Informationssystem Strasse und Strassenverkehr: MISTRA ist ein integratives, modular aufgebautes Informationssystem. Es besteht aus einem Basissystem und einem Datawarehouse (DWH) sowie verschiedenen angekoppelten Fachapplikationen. Das Basissystem stellt den Fachapplikationen georeferenzierte Daten und Basisfunktionalitäten zur Verfügung.
NWA	Nutzwertanalyse
OeV	Öffentlicher Verkehr
SASVZ	Schweizerische Automatische Strassenverkehrszählung
SSVZ	Schweizerische Strassenverkehrszählung
STARIMA	Space-time ARIMA
SVM	Support Vector Machines
SVU	Strassenverkehrsunfälle
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
VARIMA	Vector ARIMA
V-MON	Verkehrsmonitoring (Fachapplikation)
VM	Verkehrsmanagement (Fachapplikation)
VMZ-CH	Verkehrsmanagementzentrale Schweiz
VU	Verkehrsunfälle(Fachapplikation)
VWA	Vergleichswertanalyse
WIM	Weigh In Motion

Begriffe

Begriff	Bedeutung
Auslastungsgrad	Unter dem Auslastungsgrad X eines Strassenabschnitts wird das Verhältnis der Verkehrsstärke Q zur Leistungsfähigkeit (Kapazität) L verstanden. (Quelle: SN 640 018a)
Ereignismanagement	In Verkehrsmanagement Schweiz: Sammelbegriff für alle Prozesse des Verkehrsmanagements, welche von Ereignissen ausgelöst werden (geplant/ungeplant). (Quelle: ASTRA 85 990, Glossar Verkehrsmanagement Schweiz, 2007 v4.21)
Floating Car Data	Floating-Car-Data bezeichnet einen Systemvorschlag mit 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 zumindest den Zeitstempel sowie die aktuellen Ortskoordinaten. Durch den Einsatz des Floating-Car-Data-Verfahrens (FCD) werden Autos so zu mobilen Sensoren oder zu Software-Agenten. (Quelle: Wikipedia, http://de.wikipedia.org/wiki/Floating_Car_Data)
Floating Phone Data	Mobilfunkanbieterseitige Positions- und Bewegungsermittlung durch Zellularbuchung des mobilen Empfängers. (Quelle: Wikipedia, http://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrslagedienst)
Freier Verkehr (free flow)	Im freien Verkehr können die Fahrer ihre Geschwindigkeit überwiegend frei wählen (nur durch zulässige Maximalgeschwindigkeit begrenzt). Empirische Daten zeigen einen positiven Zusammenhang zwischen dem Verkehrsfluss und der Verkehrsdichte. Diese Beziehung, die im Fundamentaldiagramm dargestellt wird, wird durch einen maximalen Punkt begrenzt, ab dem Stau entsteht, resp. Freier Verkehr nicht mehr möglich ist. (Quelle: Wikipedia, http://de.wikipedia.org/wiki/Drei-Phasen-Verkehrstheorie , eigene Definition)
Fundamentaldiagramm (fundamental diagram)	Das Fundamentaldiagramm zeigt den makroskopischen Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke, Geschwindigkeit und Dichte des Verkehrsflusses auf einem Strassenabschnitt. Es dient zur Beurteilung der Verkehrsqualität. Aus dem Fundamentaldiagramm werden aufgrund von Verkehrsdaten (Verkehrsstärke, Geschwindigkeit, Verkehrsdichte usw.) Verkehrszustände abgeleitet. (Quelle: SN 640 138b und SN 671 972)
Ganglinie (daily variation curve)	Eine Ganglinie ist die graphische Darstellung von Messwerten in ihrer zeitlichen Reihenfolge. Dabei befindet sich die Zeit stets auf der X-Achse, der Messwert auf der Y-Achse des Koordinatensystems. (Quelle: Wikipedia, http://de.wikipedia.org/wiki/Ganglinie)
Hybridmodell (hybrid model)	Ein Hybridmodell bezeichnet eine Kombination mehrerer Prognosemodelle in einem Modell. Hybridmodelle können Verkehrsmodelle unterschiedlicher Längenskalen (mikro-, meso-, makroskopisch) vereinen oder unterschiedliche Prognosemodelle (Simulationen, statistische Modelle). (Quelle: eigene Definition)
Leistungsfähigkeit (Kapazität)	Unter Leistungsfähigkeit einer Verkehrsanlage wird die grösstmögliche Verkehrsstärke verstanden, von der erwartet werden kann, dass sie einen Abschnitt dieser Anlage während eines gegebenen Zeitintervalls, bei gegebenen Strassen-, Verkehrs- und Betriebsbedingungen, durchfahren kann. (Quelle SN 640 017a)
Management ausserordentlicher Ereignisse	Planen und Durchführen von Massnahmen zur Bewältigung von ausserordentlichen Ereignissen, die den Einsatz des Verkehrsmanagements sowie von Einsatzkräften wie Sanität, Feuerwehr, Polizei, Ölwehr usw. bedingen. (Quelle: SN 640 781)
Modell	Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System, welches sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild unterscheidet. (VDI-Richtlinie 3633, 1993)
Modellierung	Der Begriff der Modellierung ist definiert als der Prozess der Modellgenerierung und/oder Anwendung von Modellen zur Lösung wissenschaftlicher Fragestellungen. (Hoffmann, Schrott, 2003)
Quellen-Senken-Matrix (origin-destination matrix)	Eine Quellen-Senken-Matrix (oft auch Verkehrsmatrix genannt) bezeichnet eine Anordnung von Verkehrsgrössen in einem ursprungsziel-bezogenen Matrixschema. Typische Verkehrsgrössen sind Verkehrsangebot, Verkehrsteilnehmer oder Verkehrsflüsse.

Begriff	Bedeutung
	(Quelle: http://www.comnets.uni-bremen.de/~mab/itg/ , eigene Definition)
Reisegeschwindigkeit	Die Reisegeschwindigkeit ist Länge des Weges von Tür zu Tür dividiert durch die Reisezeit von Tür zu Tür. (Quelle: eigene Definition)
Reisezeit	Die Reisezeit ist die Dauer eines Weges von Tür zu Tür. (Quelle: SN 641 822)
Simulation	Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. (VDI Richtlinie 3633, 1993)
Stau	Stau im Sinne der Verkehrsinformation ergibt sich 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 Stau entspricht der Verkehrsqualitätsstufe F der SN 640 017 «Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit; Grundlagennorm» [1]. (Quelle: SN 671 921)
Staudauer	Die Anzahl Stautunden ist die Dauer der Staus von deren Beginn bis zu deren Auflösung in Stunden. (Quelle: ASTRA http://www.astra.admin.ch)
Stauinformationssystem	Ein Stauinformationssystem ermittelt gestützt auf gemessene und berechnete Grössen zum Verkehrszustand Kenngrössen zum Stau. Es liefert als Output Verkehrsinformation über die aktuelle und allenfalls auch künftige Stausituation. Der Output kann verschiedene Kenngrössen wie Staulänge, Staudauer, Verlustzeiten, Reisegeschwindigkeit, Reisezeiten, Verkehrszustand etc. beinhalten. (Quelle: eigene Definition)
Staulänge	Die Staulänge ist aufsummierte Länge der im Stau stehenden Fahrzeuge inklusive der Abstände zwischen den Fahrzeugen. (Quelle: eigene Definition)
Stauprognose	Eine Stauprognose ist eine Verkehrsprognose, welche die Vorhersage von Verkehrsstaus beinhaltet. In der Stauprognose können charakteristische Kenngrössen wie Staulänge, Staudauer, Verlustzeiten, Reisegeschwindigkeit, Reisezeiten, Verkehrszustand etc. berechnet und dargestellt werden. (eigene Definition)
Stauprognoseverfahren / -methoden (traffic prognosis methods /traffic forecast methods)	Stauprognoseverfahren und -methoden sind wissenschaftliche Konzepte, Algorithmen, und Berechnungenabläufe, welche als zentraler Bestandteil für eine Stauprognose verwendet werden können. Sie bilden die wissenschaftliche Basis für Stauprognose-systeme, befassen sich aber nicht mit daten- und betriebstechnischen Bereichen wie Datenaufbereitung, Darstellung, externe Anbindung etc. Die Begriffe Stauprognoseverfahren und -methoden werden in diesem Bericht synonym verwendet (Quelle: eigene Definition)
Stauprognosesystem	Ein Stauprognosesystem macht gestützt auf historische und aktuelle gemessene und berechnete Kenngrössen zum Verkehr und zu relevanten Einflussfaktoren (Wetter, Witterung, Baustellen, Ferienkalender etc.) Vorhersagen zur zu einem bestimmten Zeitpunkt herrschenden Verkehrssituation, insbesondere Stausituationen. (eigene Definition).
Stop-and-go-Verkehr (stop-and-go traffic)	Verkehr, der durch das nur langsame Vorwärtskommen der Fahrzeuge, die noch dazu häufig anhalten müssen, gekennzeichnet ist. (Quelle: Duden, http://www.duden.de/rechtschreibung/Stop_and_go_Verkehr)
Verkehrserzeugung und Verkehrsanziehung	Die Verkehrserzeugung (Quelle) und die Verkehrsanziehung (Ziel) sind die beiden Beziehungen (erzeugend oder anziehend), welche zwischen Verkehrsverursachern bestehen. Die Verkehrserzeugung ist die Summe der realisierten Bewegungsanfänge eines Bezugsgebiets (Zone, Einrichtung) pro Zeiteinheit. Die Verkehrsanziehung ist die Summe der realisierten Bewegungsenden eines Bezugsgebiets (Zone, Einrichtung) pro Zeiteinheit. (Quelle: SN 640 015a)
Verkehrsaufkommen (traffic demand)	Ein Verkehrsaufkommen ist die realisierte Verkehrsnachfrage eines Bezugsgebiets pro Zeiteinheit als Summe aller Bewegungsanfänge und -enden. Ein Verkehrsaufkommen ist gleich der Summe von Verkehrserzeugung und Verkehrsanziehung. (Quelle: SN 640 015a)
Verkehrsbelastung	Bezeichnet die Verkehrsmenge auf einer Strasse in Fahrzeugen pro Stunde. Die Verkehrsbelastung kann sich auf einzelne Strassenabschnitte oder auf ganze Strassennetze beziehen. Sie kann sich auf eine Momentanaufnahme oder auf einen generellen Zustand beziehen.

Begriff	Bedeutung
	(Quelle: ASTRA 85 990, Glossar Verkehrsmanagement Schweiz, 2007 v4.21)
Verkehrsbeeinflussung	<p>Beeinflussen des Verkehrs mit dem Verkehrszustand angepassten betrieblichen Massnahmen und Empfehlungen, um den Verkehr sicher und flüssig zu halten, die Effizienz des Verkehrssystems und den Reisekomfort zu steigern und die Umweltbelastung zu senken.</p> <p>(Quelle: SN 640 781)</p> <p>Der Begriff beinhaltet Verkehrslenkung, -leitung und –steuerung.</p>
Verkehrsdaten	<p>Verkehrsdaten sind Daten, welche zu einer vorgegebenen Zeit den Verkehr und die für ihn relevanten Einflüsse im Umfeld der Verkehrsnetze quantitativ beschreiben. (Quelle: SN 971 951)</p> <p>Unter Verkehrsdaten werden folgende Werte verstanden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrsstärke [Fz/h] • Geschwindigkeit [km/h] • Verkehrsdichte[Fz/km] • Reisezeit [h/km] <p>Unterscheidung nach Personenwagen PW und Lastwagen LW oder nach detaillierten Fahrzeugkategorien (Motorräder MR, Personenwagen PW, Lastwagen LW usw.) (Quelle: SN 671 972)</p>
Verkehrsdatenerfassung	<p>Die Verkehrsdatenerfassung bezeichnet die Erfassung der Verkehrsdaten. Die Erfassung kann mittels unterschiedlichen Techniken (Induktionsschleifen, Radar, Infrarot, digitale Bildauswertung usw.) erfolgen. (Quelle: SN 671 972)</p> <p>Die Verkehrsdatenerfassung umfasst manuelle und automatische Arbeitsvorgänge, mit denen lokal anfallende Verkehrsdaten in eine maschinenlesbare Form gebracht und auf Datenträgern gespeichert werden. Sie beruht auf verschiedensten Techniken (Induktionsschleifen, Radar, Infrarot, digitale Bildauswertung etc.).</p> <p>(Quelle: ASTRA 85 990, Glossar Verkehrsmanagement Schweiz, 2007 v4.21)</p>
Verkehrsdatenverbund	<p>Der Begriff ist in MinVG Art. 8 verankert</p> <p>Der Verkehrsdatenverbund bezeichnet die Infrastruktur für den operativen Datenaustausch zwischen allen beteiligten Partnern im Rahmen von VM-CH.</p> <p>(Quelle: ASTRA 85 990, Glossar Verkehrsmanagement Schweiz, 2007 v4.21)</p>
Verkehrsdichte (traffic density)	<p>Unter Verkehrsdichte wird die Verkehrsbelastung je Streckenabschnitt zu einem bestimmten Zeitpunkt verstanden.</p> <p>(Quelle: SN 640 017a)</p>
Verkehrsfluss (traffic flow)	<p>Unter Verkehrsfluss versteht man den Fluss (...), d. h. die Anzahl der Fahrzeuge, die eine bestimmte Strassenfläche oder -linie (als Grenzfall der Fläche) pro Zeiteinheit durchquert.</p> <p>Im Strassenverkehr bezeichnet der Begriff die Ausnutzung der Verkehrswege durch den fahrenden Verkehr. Das bedeutet, der Verkehrsfluss nimmt durch höhere Geschwindigkeit erst einmal zu, kann aber etwa durch die dabei überproportional zunehmenden Abstände oder durch größere Geschwindigkeitsunterschiede und damit verbundene gegenseitige Behinderungen auch wieder abnehmen.</p> <p>Einflussgrößen für die Optimierung des Verkehrsflusses sind:</p> <p>Verhalten des einzelnen Fahrers, etwa durch das Beschleunigen bei einem Ampelstart und kooperative Fahrweise.</p> <p>Beeinflussung des laufenden Verkehrs durch Verkehrsleitanlagen, was in Deutschland teils auf Autobahnen durch Regelung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit oder freigegebener Fahrspuren via elektronisch gesteuerter Anzeigetafeln erfolgt. In Städten wiederum besteht die Herausforderung der Verkehrsleitung in der richtigen Einrichtung der Taktzeiten der Ampelanlagen.</p> <p>Systematische Phänomene – wenn etwa bei einer bestimmten Verkehrsdichte ein Stau aus dem Nichts entsteht, wie er im Nagel-Schrecken-Modell beschrieben wird.</p> <p>Verkehrsplanung, welche die Verkehrsinfrastruktur entsprechend dem Bedarf aufzubauen und zu unterhalten hat, wobei auch Aspekte des Umweltschutzes berücksichtigt werden.</p> <p>(Quelle: Wikipedia http://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsfluss)</p>
Verkehrsinformation	<p>In Kenntnis setzen der Verkehrsteilnehmer über Sachverhalte, welche für deren Fahrt oder den Transport von deren Gütern vor (pre-trip) und während der Fahrt (on-trip) von Bedeutung sein können, sowohl betreffend den allgemeinen Strassenverkehr als auch den öffentlichen Verkehr, inkl. Verspätungsmeldungen, Verhaltensempfehlungen usw.</p> <p>(Quelle: SN 640 781)</p>
Verkehrsinformationszentrale	<p>Die Verkehrsinformationszentrale leistet im Rahmen von VM-CH die Erfas-</p>

Begriff	Bedeutung
	<p>sung der Grundlagen sowie die Aufbereitung und Verbreitung der Verkehrsinformation. Zwischen dem ASTRA und dem Betreiber wird eine Leistungsvereinbarung abgeschlossen.</p> <p>(Quelle: ASTRA 85 990, Glossar Verkehrsmanagement Schweiz, 2007 v4.21)</p>
Verkehrslage	<p>Wird z.B. in SSV Art. 67 verwendet.</p> <p>Bezeichnet in VM-CH das Gesamtbild der Verkehrszustände auf dem Netz.</p> <p><i>Der Begriff ist im Normenwerk VSS nicht definiert. Er bezieht sich auf das Netz (im Gegensatz zum Verkehrszustand, der sich auf einen Abschnitt bezieht).</i></p> <p><i>Er bezieht sich auf den Verkehrsfluss (im Gegensatz zum Strassenzustand, der sich auf die Infrastruktur bezieht).</i></p> <p>(Quelle: ASTRA 85 990, Glossar Verkehrsmanagement Schweiz, 2007 v4.21)</p>
Verkehrsmanagement	<p>Der Begriff ist definiert in MinVG Art. 10 Abs. 4:</p> <p>Das Verkehrsmanagement umfasst alle Massnahmen und Arbeiten, die für einen sicheren und flüssigen Verkehrs auf den Nationalstrassen erforderlich sind, namentlich:</p> <p>Verkehrslenkung, -leitung und -steuerung</p> <p>Verkehrsinformation, wie Sammlung und Aufbereitung von Daten sowie Bereitstellung von und Verbreitung von Verkehrsinformationen, als Grundlage für optimale Entscheidungen der Strassenbenützer vor und während der Fahrt auf den Nationalstrassen</p> <p>(Quelle: ASTRA 85 990, Glossar Verkehrsmanagement Schweiz, 2007 v4.21)</p> <p>Unter Verkehrsmanagement versteht man die Gesamtheit aller Massnahmen planerischer, technischer, organisatorischer und rechtlicher Art, die räumlich und zeitlich geeignet sind, den gesamten Verkehrsablauf für Benützer, Betreiber und Betroffene optimal zu gestalten.</p> <p>Unter Verkehrsmanagement Strasse versteht man die Gesamtheit aller Massnahmen zur Gestaltung des Verkehrsablaufs in Strassennetzen.</p> <p>(Quelle: SN 640 781)</p>
Verkehrsmanagementzentrale	<p>Der Begriff ist in MinVG Art. 8 verankert.</p> <p>Die Verkehrsmanagementzentrale Schweiz ist für die verkehrsbeeinflussenden Massnahmen auf dem schweizweiten Netz der Nationalstrassen verantwortlich.</p> <p>Die VMZ-CH umfasst die notwendigen technischen Einrichtungen (Arbeitsplätze, Darstellungsgeräte, Rechner, Datenspeicher sowie einen Anschluss an den VDV-CH).</p> <p>(Quelle: ASTRA 85 990, Glossar Verkehrsmanagement Schweiz, 2007 v4.21)</p>
Verkehrsmodell	<p>Verkehrsmodell ist ein Fachbegriff der Verkehrsplanung und beschäftigt sich mit der Abbildung von Verkehrsprozessen in Modellen. Es existieren mikroskopische, mesoskopische und makroskopische Verkehrsmodelle, die die Verkehrsnachfrage oder den Verkehrsfluss betrachten.</p> <p>(Quelle: Wikipedia http://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsmodell_(Verkehrsplanung))</p>
Verkehrsprognose (traffic prognosis / traffic forecast)	<p>Eine Verkehrsprognose ist eine Prognose, die der objektbasierten Vorhersage von Verkehrsströmen (z. B. für einen Strassenabschnitt oder eine Buslinie) oder der Vorhersage der Gesamtheit der Verkehrsnachfrage dient. Bei der Planung von Strassen werden objektbasierte Verkehrsprognosen verwendet, um die zukünftige Verkehrsbelastung und deren Entwicklung abschätzen zu können.</p> <p>(Quelle: Wikipedia http://de.wikipedia.org/wiki/Verkehrsprognose)</p>
Verkehrsqualität	<p>Unter Verkehrsqualität wird der Grad der gegenseitigen Behinderungen der Verkehrsteilnehmer verstanden. (Quelle: SN 640 017a)</p>
Verkehrsstärke	<p>Unter Verkehrsstärke wird die Verkehrsbelastung (Anzahl der Verkehrselemente eines Verkehrsstromes) je Zeitintervall an einem Querschnitt der Verkehrsanlage verstanden. (Quelle: SN 640 017a)</p>
Zeitreihe / Zeitreihenanalyse (time series / time series analysis)	<p>Eine Zeitreihe ist eine zeitabhängige Folge von Datenpunkten (meist aber keine Reihe im mathematischen Sinne). Typische Beispiele für Zeitreihen sind Börsenkurse, Wahlabsichtsbefragungen oder Wetterbeobachtungen.</p> <p>Die Zeitreihenanalyse ist die Disziplin, die sich mit der mathematisch-statistischen Analyse von Zeitreihen und der Vorhersage (Trends) ihrer künftigen Entwicklung beschäftigt. Sie ist eine Spezialform der Regressionsanalyse.</p> <p>(Quelle: Wikipedia, http://de.wikipedia.org/wiki/Zeitreihenanalyse)</p>

Literaturverzeichnis

-
- [Abrahamsson, 1998] Abrahamsson T., "Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts – A Literature Survey," 1998.
-
- [Adapticon, o.J.] Homepage des Software und Systemherstellers Adapticon: www.adapticon.com.
-
- [Adapticon, 2011] Foliensammlung und interne Dokumente zum Adapticon Stauinformati- und -prognosesystem. (nicht öffentlich)
-
- [AFV ZH, 2012] Reisezeiterfassung mittels Bluetooth-Technologie, Testbericht, Uwe A. Scharenberg-Nuding, Amt für Verkehr Kanton Zürich. 15.10.2012.
-
- Verkehrsmanagement in einer Millionenmetropole - Neue Berliner Verkehrsregelungszentrale reduziert Staus. Peter Aicher, Michael Beer, Jürgen Glauche und Uwe Reiter. *Strassenverkehrstechnik* 9. 2006..
-
- [Anwb, 2011] www.routenet.nl/routeplanner: Website für Routenplanung basierend auf dem INRIX System.
-
- [ARE, 2006] Erstellung des nationalen Personenverkehrsmodells für den öffentlichen und privaten Verkehr - Modellbeschreibung, Bericht März 2006.
-
- [ARE, 2007] Staukosten des Strassenverkehrs in der Schweiz. Aktualisierung 2000 / 2005. Bern 2007. Eine Aktualisierung ist 2014 / 15 geplant.
-
- [ARE, 2010] Nationales Personenverkehrsmodell des UVEK, Basismodell 2005, Bericht Dezember 2010
-
- [ARE, 2011] Nationales Güterverkehrsmodell des UVEK, Basismodell 2005: Modellbeschrieb und Validierung, Bericht Dezember 2011.
-
- [ASTRA] Faktenblatt 3 Verkehrsmanagement Schweiz (VM CH)
-
- [ASTRA, 2005] Verkehrstelematik (ITS-CH 2012), Leitbild für die Schweiz im Jahre 2012
-
- [ASTRA, 2008a] Richtlinie ASTRA 15 003: Verkehrsmanagement in der Schweiz (VM-CH), Ausgabe 2008 V1.03.
-
- [ASTRA 2008b] Die Verkehrsmanagementzentrale (VMZ-CH): Aufgaben und Tätigkeiten
-
- [ASTRA, 2008c] „Verkehrszähler“, Richtlinie ASTRA 13012. V1.02.
-
- [ASTRA, 2008d] „Verkehrsmanagement in der Schweiz (VM-CH)“, Richtlinie ASTRA 15003. V1.02.
-
- Weisung ASTRA 75 002: Verkehrsmanagementpläne auf Nationalstrassen, Ausgabe [ASTRA 2011]01.02.2011 V1.00
-
- [ASTRA, 2012] IT-Dokumentation ASTRA 65 021: Verkehrsmonitoring VMON, Ausgabe 2012 V2.0.1.0
-
- [ASTRA, 2013] Verkehrsmanagement Schweiz (VM-CH): Konzept Verkehrsdatenerfassung, B+S AG, Entwurf vom 22.3.2013
-
- [Autobahn, 2011] www.autobahn.nrw.de. Website für Routenplanung basierend auf dem OLSIM System.
-
- Voraussetzungen für dynamische Wegweisung mit integrierten Stau- und Reisezeitinformationen. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Verkehrstechnik, Heft V181. Bergisch Gladbach, 2009.
-
- [Bast, 2009] Gladbach, 2009.
-
- [B+S AG, 2004] B+S, EBP, Landert Farago Partner: Wirksamkeit und Nutzen der Verkehrsinformation. Forschungsauftrag SVI 2000/386 auf Antrag der SVI, 2004.
-
- [B+S AG, 2005] „Floating Car Data – Stand der Technik“, B+S Ingenieur AG, im Auftrag Bundesamt für Strassen ASTRA. 09.11.05.
-

[B+S AG, 2006]	Forschungsauftrag VSS 1999/265, „Systeme für die automatische Verkehrsüberwachung (Monitoring) mit digitaler Bildverarbeitung“, B+S Ingenieur AG , Amstein+Walthert AG Zürich. März 2006.
[B+S AG, 2011]	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement. Forschungsauftrag VSS 2006/905 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute. Mai 2011.
[B+S AG, 2012]	Verkehrsprognosen mit Online Daten. Forschungsauftrag VSS 2007/905 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute.
[Barcelo, 2010]	Barcelo, J., 2010. Fundamentals of Traffic Simulation, Springer New York, 2010
[Bayern, 2011]	www.bayerninfo.de. Website Stauinformations- und -prognosesystem in Bayern..
[Ben-Akiva, 1998]	Ben-Akiva, M., 1998. DynaMIT : a Simulation-Based System for Traffic Prediction. In DAC-CORD Short Term Forecasting Workshop. pp. 1-12
[Brockwell, 2002]	Brockwell, P. J. and Davis R. A., Introduction to Time Series and Forecasting. 2002, pp. 1-434.
[Castro-Neto, 2009]	Castro-Neto, M. et al., 2009. Online-SVR for short-term traffic flow prediction under typical and atypical traffic conditions. Expert Systems with Applications, 36, pp.6164-6173.
[Chandra, 2009]	Chandra, S.R. & Al-Deek, H., 2009. Predictions of Freeway Traffic Speeds and Volumes Using Vector Autoregressive Models. Journal of Intelligent Transportation Systems, 13(2), pp.53-72.
[Chen, 2011]	Chen, C. et al., 2011. Short-time Traffic Flow Prediction with ARIMA-GARCH Model. In 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). pp. 607-612.
[Chickering, 1997]	Chickering, D.M., Heckerman, D. & Meek, C., 1997. A Bayesian Approach to Learning Bayesian Networks with Local Structure
[Chrobok, 2005]	Chrobok, R., "Theory and Application of Advanced Traffic Forecast Methods", Dissertation, 2005
[Chrobok, o.J.]	Chrobok, R., OLSIM: A New Generation of Traffic Information Systems. University Duisburg-Essen. Ohne Jahresangabe.
[Clark, 2003]	Clark, S., 2003. Traffic Prediction Using Multivariate Nonparametric Regression. Journal of Transportation Engineering, 129(2), pp.161-168.
[Cools, 2009]	Cools, M., Moons, E. & Wets, G., 2009. Investigating the Variability in Daily Traffic Counts Through Use of ARIMAX and SARIMAX Models. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2136, pp.57-66.
[Cortes, 1995]	Cortes, C. & Vapnik, V., 1995. Support-vector networks. Machine Learning, 20, pp.273-297
[Daganzo, 1995]	Daganzo, C.F., 1995. Requiem for Second-Order Fluid Approximation of Traffic Flow. Transportation Research Part B: Methodological, 29B(4), pp.277-286
[de Rham, 2007]	de Rham, C., Schwarz R. and Schaufelberger W., "Short-term Forecasts for Transport Models," 2007.
[de Rahm, 2007]	de Rham, C., Short-term Forecasts for Transport Models. Systems Consult und B+S Ingenieur AG. ASTRA Projekt 2006/019. Dezember 2009.
[Delling, 2009]	Delling, D., Wagner D., "Time-Dependent Route Planning", Robust and Online Large-Scale Optimization. Lecture Notes in Computer Science, Volume 5868, pp 207-230, 2009.
[Dia, 2001]	Dia, H., 2001. An object-oriented neural network approach to short-term traffic forecasting. European Journal of Operational Research, 131, pp.253-261
[Ding, 2006]	Ding, M., Chen, Y., & Bressler, S.L. "Granger causality: Basic theory and application to neuroscience". In Schelter, S., Winterhalder, N., & Timmer, J. Handbook of Time Series Analysis. Wiley, Wienheim, 2006
[Dong, 2010]	Dong Y., Li Y. and Lai M., "Structural damage detection using empirical-mode decomposition and vector autoregressive moving average model," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 30, no. 3, pp. 133-145, 2010.

-
- Dupuis, A., Chopard B., "Parallel simulation of traffic in Geneva using cellular automata", [Dupuis, 2001]Parallel and Distributed Computing Practices Journal, 2001.
-
- [Dutch Website on Route Planning, 2011] www.routenet.nl. Website für Routenplanung basierend auf dem Adapticon System.
www.zekerOpTijd.nl. Website für Routenplanung basierend auf Adapticon System.
-
- [Emmerink, 1996] Emmerink, R. H. M., u.a., Variable message signs and radio traffic information: an integrated empirical analysis of drivers' route choice behaviour. In: Transportation research. Part A, Policy and practice. Vol. 30A, no. 2, S. 135 - 153. 1996.
-
- [Furtlehner, 2007] Furtlehner, C., Lasgouttes J.-M., de La Fortelle A., A belief propagation approach to traffic prediction using probe vehicles, in: Proc. IEEE 10th Int. Conf. Intel. Trans. Sys., 2007, pp. 1022_1027
-
- [Google, 2011] www.maps.google.ch. Homepage zu Stauinformations- und prognosesystem von Google.
-
- [Ghosh, 2009] Ghosh, B., Basu, B. & O'Mahony, M., 2009. Multivariate Short-Term Traffic Flow Forecasting Using Time-Series Analysis. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 10(2), pp.246-254. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4908946>.
-
- [Ghosh, 2004] Ghosh, Bidisha, Basu, Biswajit & O'Mahony, Margaret, 2004. Time-Series Modeling For Forecasting Vehicular Traffic Flow in Dublin
-
- [Gilmore, 1995] Gilmore, J.F. & Abe, N., 1995. Neural Network Models for Traffic Control and Congestion Prediction. IVHS Journal, 2(3), pp.231-252
-
- [Guo, 2007] Guo, J., Williams, B.M. & Smith, B.L., 2007. Data Collection Time Intervals for Stochastic Short-Term Traffic Flow Forecasting. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2024, pp.18-26.
-
- [Helbing, 2001] Helbing, D. et al., 2001. MASTER: macroscopic traffic simulation based on a gas-kinetic, non-local traffic model. Transportation Research Part B: Methodological, 35(2), pp.183-211
-
- [Hesse, 2003] Hesse, W., Moller, E., Arnold, M. & Schack, B. "The use of time-variant EEG Granger causality for inspecting directed interdependencies of neural assemblies." J Neurosci Methods 124, 27-44, 2003
-
- [Hessen, 2011] www.verkehr.hessen.de. Homepage zu Stauprognose und Verkehrsmanagement im Bundesland Hessen.
-
- [Hong, 2006] Hong, W.-C. et al., 2006. Highway traffic forecasting by support vector regression model with tabu search algorithms. In The 2006 IEEE International Joint Conference on Neural Networks. Ieee, pp. 1617-1621.
-
- [Horvitz, 2005] Horvitz, E., Apacible, J., Sarin, R. & Liao, L., 2005. Prediction, Expectation, and Surprise: Methods, Designs, and Study of a Deployed Traffic Forecasting Service. In Twenty-First Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence. pp. 1-10
-
- [Hyndman, 2005] Hyndman, R.J. and Koehler A.B., "Another look at measures of forecast accuracy," 2005.
-
- [INRETS, 1997] WP3 Report. CAPITALS Project.
-
- [Ju, 2005] Ju, R.C., u.a., Route switching behaviour on freeways with provision of different types of real-time traffic information. In: Transportation research. Part A 39, S. 445 - 461. 2005.
-
- [Kamarianakis, 2005] Kamarianakis, Y. and Prastacos, P., "Space-time modeling of traffic flow," *Computers & Geosciences*, vol. 31, pp. 119-133, 2005.
-
- [Rudolf Keller, 2000] Forschungsauftrag SVI 47/98, „Verwendungsmöglichkeiten von Floating Car Data in der Verkehrsplanung“, Rudolf Keller & Partner Verkehrsingenieure AG, Basel. Version 1.5, 19.12.2000.
-
- [Khashei, 2011] Khashei, M., and Bijari, M., "A novel hybridization of artificial neural networks and ARIMA models for time series forecasting," *Applied Soft Computing*, vol. 11, pp. 2664-2675, 2011.
-

-
- [Kindzerske, 2007] Kindzerske, M.D. & Ni, D., 2007. Composite Nearest Neighbor Nonparametric Regression to Improve Traffic Prediction. *Transportation Research Record*, 1993, pp.30-35.
-
- [Lee, 2010] Lee, M.-T., 2010. Short-Term Freeway Traffic Flow Forecasting with ARIMAX Modeling. *Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig*
-
- [X. Li, 2008a] Li, X., Lord, D., et al., 2008. Predicting motor vehicle crashes using Support Vector Machine models. *Accident; analysis and prevention*, 40(4), pp.1611-1618.
-
- [Z. Li, 2008b] Li, Z.-P., Yu, H., et al., 2008. An Improved Adaptive Exponential Smoothing Model for Short-term Travel Time Forecasting of Urban Arterial Street. *Acta Automatica Sinica*, 34(11), pp.1404-1409.
-
- [Lin, 2001] Lin, W.-hua, 2001. A Gaussian Maximum Likelihood Formulation for Short-Term Forecasting of Traffic Flow. In *2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*. pp. 150-155
-
- [G. Liu, 1998] Liu, G., Lyrantzis, A.S. & Michalopoulos, P.G., 1998. Improved High-Order Model for Freeway Traffic Flow. *Transportation Research Record*, 1644, pp.37-46
-
- [Z. Liu, 2005] Liu, Z., Zhang, D. & Liao, H., 2005. Multi-scale Combination Prediction Model with Least Square Support Vector Machine for Network Traffic. *Lecture Notes in Computer Science*, 3498, pp.385-390
-
- [Luspay, 2010] Luspay, T. et al., 2010. Parameter-dependent modeling of freeway traffic flow. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(4), pp.471-488.
-
- [Mahmassani, 1998] Mahmassani, H.S., 1998. Dynamic Traffic Simulation and Assignment. In *Operations Research and Decision Aid Methodologies in Traffic and Transportation Management*. pp. 104-161
-
- [Matsumura] Matsumura S., Yamashita H., Iwaki S., Sugimura H., "Experimental verification of travel-time prediction method. *ITS International*.
-
- [Modelit, 2011] www.modelit.nl. Homepage für das Stauinformations- und -prognosesystem von Modelit.
-
- [Modelit, 2011] www.tripcast.nl. Homepage Reisezeitprognosen basierend auf dem Stauinformations- und -prognosesystem von Modelit.
-
- [Modelit, o.J.] Making Short Term Travel Time Forecasts available to the public : TripCAst. Nanne van der Zijpp. Presentation Slides.
-
- [Mygistics, 2011] www.mygistics.com. Homepage für das Stauinformations- und -prognosesystem von Mygistics.
-
- [Nagel, 1992] Nagel, K. & Schreckenberg, M., 1992. A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. *Journal de Physique I*, pp.2221-2229
-
- [Noh, 2009] Noh, H. et al., 2009. Approach to Modeling Demand and Supply for a Short-Notice Evacuation. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2091, pp.91-99.
-
- [Öller, 1985] Öller, L.-E., "Macroeconomic Forecasting with a Vector ARIMA Model: A Case Study of the Finnish Economy," *International Journal of Forecasting*, vol. 1, pp. 143-150, 1985.
-
- [Park, 2008] Park, B. et al., 2008. Online Implementation of DynaMIT: A Prototype Traffic Estimation and Prediction Program. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 12(2), pp.129-140.
-
- [Pipes, 1953] Pipes, L.A., 1953. An Operational Analysis of Traffic Dynamics. *Journal of Applied Physics*, 24(3), pp.274-281.
-
- [Pottmeier, 2004] Pottmeier, A., Chrobok R., Hafstein S., Mazur F. and Schreckenberg M., "OLSIM: Up-to-Date Traffic Information on the Web," in *Proceedings of the Third IASTED International Conference: Communications, Internet and Information Technology*, 2004, pp. 571-576
-
- [PTV, 2001] Use of PTV-Software in the traffic management centre (VMZ) Berlin. Presentation at PTV user group meeting 2001. Berlin.
-
- [Qi, 2011] Qi, C. et al., 2011. Time / Space-Separation-Based SVM Modeling for Nonlinear Distributed Parameter Processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50, pp.332-341
-
- [Raney, 2002] Raney, B., Voellmy, A., Cetin, N., Vrtic, M. & Nagel, K., 2002. Towards a Microscopic Traffic

	Simulation of All of Switzerland. Lecture Notes in Computer Science, 2329, pp.371-380
[Ratrou, 2009]	Ratrou, N.T. & Rahman, S.M., 2009. A Comparative Analysis of Currently Used Microscopic and Macroscopic Traffic Simulation Software. The Arabian Journal for Science and Engineering, 34(1), pp.121-133
[Rehborn, 2011]	Verkehrserfassung: Ein Überblick zur Rekonstruktion von zeitlichräumlichen Verkehrsmustern mit und in Fahrzeugen – Teil 1: Verkehrszustandserkennung. Rehborn und Kerner. Straßenverkehrstechnik 09/11 (Zusammenfassung).
[Rehborn, 2011]	Verkehrserfassung: Ein Überblick zur Rekonstruktion von zeitlichräumlichen Verkehrsmustern mit und in Fahrzeugen – Teil 2: ASDA/FOTO. Rehborn und Kerner. Straßenverkehrstechnik 09/11 (Zusammenfassung)
[Reuschel, 1950]	Reuschel, A., 1950. Vehicle movements in a platoon. Oesterreichisches Ingenieurarchiv, 4, pp.193-215
[de Rham, 2007]	de Rham, C., Schwarz, R. & Schaufelberger, W., 2007. Short-term Forecasts for Transport Models
[Robbins, 2004]	Robbins, D.C. et al., 2004. ZoneZoom : Map Navigation for Smartphones with Recursive View Segmentation. In Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces. pp. 231-234
[Runge, 2012]	Runge, J., Heitzig J., Petoukhov V., and Kurths J., "Escaping the Curse of Dimensionality in Estimating Multivariate Transfer Entropy", Phys. Rev. Lett. 108, 258701, 2012
[Schreiber, 2000]	Schreiber, T., "Measuring Information Transfer", Phys.Rev.Lett 85 461, 2000
[Shekhar, 2007]	Shekhar, S. & Williams, B.M., 2007. Adaptive Seasonal Time Series Models for Forecasting Short-Term Traffic Flow. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2024, pp.116-125.
[Siemens, 2003]	Verkehrsinformationssystem. Foliensammlung für FH Dozententreffen in Zürich. 3. Juni 2011.
[Singliar, 2008]	Machine Learning Solutions for Transportation Networks. University of Pittsburgh
[Smith, 2000]	Smith, B.L. & Oswald, R.K., 2000. Data-Driven Forecasting for ITS: Approximate Nearest Neighbor Nonparametric Regression Employing Innovative Data Structures. IEEE Transactions on Intelligent Transportation, pp.1-21
[Steiner, 2008]	Steiner, A. and Sick, B., "A New Method for Travel Time Estimation on Long Freeway Sections," European Journal of Transport and Infrastructure Research, vol. 8, no. 4, pp. 333-354, 2008.
[Sun, 2006]	Sun, S., Zhang, C. & Yu, G., 2006. A Bayesian Network Approach to Traffic Flow Forecasting. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 7(1), pp.124-132
[Sun, 2004]	Sun, S., Yu, G., Zhang, C., 2004. Short-Term Traffic Flow Forecasting Using Sampling Markov Method With Incomplete Data, 2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, University of Parma, Parma, Italy June 14-17,2004
[Swisscom Mobile, 2005]	TRAFIS: Traffic Information System (Foliensammlung).
[Thianniwet, 2009]	Thianniwet, T., Phosaard S. and Pattara-Atikom W., "Classification of Road Traffic Congestion Levels from GPS Data using a Decision Tree Algorithm and Sliding Windows," in Proceedings of the World Congress on Engineering, 2009, vol. I, pp. 1-5.
[Tsitsika, 2007]	Tsitsika, E.V., Maravelias C.D. and Haralabous J., "Modeling and forecasting pelagic fish production using univariate and multivariate ARIMA models," Fisheries Science, vol. 73, pp. 979-988, 2007.
[Treiber, 2010]	Treiber, M. & Kesting, A., 2010. Verkehrsdynamik und -simulation, Springer
[TomTom, 2011]	www.tomtom.com. Homepage für das Stauinformations- und -prognosesystem von TomTom.

[TomTom, 2011]	Interne Dokumente über das Stauinformations- und -prognosesystem von TomTom. (nicht öffentlich)
[Turochy, 2006]	Turochy, R.E., 2006. Enhancing Short-Term Traffic Forecasting with Traffic Condition Information. <i>Journal of Transportation Engineering</i> , 132(6), pp.469-474.
[Van Der Voort, 1996]	Van Der Voort, M., 1996. Combining kohonen maps with arima time series models to forecast traffic flow. <i>Transportation Research Part C: Emerging Technologies</i> , 4(5), pp.307-318.
[van Hinsbergen, 2009]	van Hinsbergen, C.P.I., van Lint, J.W.C. & van Zuylen, H.J., 2009. Bayesian committee of neural networks to predict travel times with confidence intervals. <i>Transportation Research Part C: Emerging Technologies</i> , 17, pp.498-509
[van Lint, 2003]	van Lint, J. W. C., "An Improved Travel-time Estimation Algorithm using Dual Loop Detectors," in 82nd annual meeting of the Transportation Research Board, 2003, pp. 1-13.
[van Lint, 2004]	van Lint, J. W. C., "Reliable Travel Time Prediction for Freeways," The Netherlands TRAIL Research School, 2004.
[van Lint, 2005]	van Lint J. W. C., Hoogendoorn, S. P. and van Zuylen H.J., "Accurate freeway travel time prediction with state-space neural networks under missing data," <i>Transportation Research Part C: Emerging Technologies</i> , vol. 13, pp. 347-369, 2005.
[van Lint, 2010]	van Lint, J. W. C and Hoogendoorn, S. P., "A Robust and Efficient Method for Fusing Heterogeneous Data from Traffic Sensors on Freeways," <i>Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering</i> , vol. 25, pp. 596-612, 2010.
[Vanajakshi, 2007]	Vanajakshi, L. & Rilett, L.R., 2007. Support Vector Machine Technique for the Short Term Prediction of Travel Time. In 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Ieee, pp. 600-605.
[Vlahogianni, 2005]	Vlahogianni, E.I., Karlaftis, M.G. & Golias, J.C., 2005. Optimized and meta-optimized neural networks for short-term traffic flow prediction: A genetic approach. <i>Transportation Research Part C: Emerging Technologies</i> , 13, pp.211-234
[Vortisch, 2011]	Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstraßennetzen, Dissertation. Peter Vortisch. Universität Karlsruhe. 2005.
[VMZ Berlin, 2011]	www.wmz.berlin.de. Homepage zum Stauinformations- und Prognosesystems MONET.
[VM-CH-cnlab]	VM-CH-cnlab-System_Datenerfassung_V3.3.pdf (zugänglich via CNLAB-Portal)
[VSS 2005]	SN 671921: Strassenverkehrstelematik: Standardisierte Verkehrsinformation
[VSS 2006]	SN 640781: Verkehrsmanagement - Begriffssystematik
[Williams, 2003]	Williams, B.M. & Hoel, L.A., 2003. Modeling and Forecasting Vehicular Traffic Flow as a Seasonal ARIMA Process: Theoretical Basis and Empirical Results. <i>Journal of Transportation Engineering</i> , 129(6), pp.664-672.
[Wu, 2004]	Wu, C.-H., Ho, J.-M. & Lee, D.T., 2004. Travel-Time Prediction With Support Vector Regression. <i>IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems</i> , 5(4), pp.276-281.
[Xiao, 2005]	Xiao,H., Ambadipudi R., Hourdakis, J. and Michalopoulos P. Methodology for Selecting Microscopic Simulators: Comparative Evaluation of AIMSUN and VISSIM. Technical Report CTS 05-05, Department of Civil Engineering, Univ. of Minnesota, 2005.
[Yasdi, 1999]	Yasdi, R., 1999. Prediction of Road Traffic using a Neural Network Approach. <i>Neural Computing & Applications</i> , 8, pp.135-142.
[Zhang, 2004]	Zhang, C., Shiliang, S. & Yu, G., 2004. A Bayesian network approach to time series forecasting of short-term traffic flows. In Proceedings. The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Ieee, pp. 216-221
[Zhang, 1998]	Zhang, G., Patuwo, B.E. & Hu, M.Y., 1998. Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. <i>International Journal of Forecasting</i> , 14, pp.35-62
[Zhang, 2010]	Zhang, T. et al., 2010. Nonparametric Regression for the Short-term Traffic Flow Forecasting. In International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE). pp. 2850-2853

Zhang, Y. & Liu, Y., 2009. Traffic forecasting using least squares support vector machines.
[Zhang, 2009] Transportmetrica, 5(3), pp.193-213.

Zheng, W., Lee, D.-H. & Shi, Q., 2006. Short-Term Freeway Traffic Flow Prediction: Bayesian Combined Neural Network Approach. Journal of Transportation Engineering, 132(2), pp.114-121
[Zheng, 2006] 121

[ZHAW/Rapp, Forschungsauftrag ASTRA 2011/010 - Stauprognoseverfahren / -systeme: Zwischenbericht 2012a] „Analyse des State of the Art“ (AP1), 12.1.2012, nicht veröffentlicht

Forschungsauftrag ASTRA 2011/010 - Stauprognoseverfahren / -systeme: Zwischenbericht
[ZHAW/Rapp, „Bedürfnisanalyse: Anforderungen an Stauprognosesysteme“ (AP2), 30.5.2012, nicht veröffentlicht
2012b] veröffentlicht

Forschungsauftrag ASTRA 2011/010 - Stauprognoseverfahren / -systeme: Zwischenbericht
[ZHAW/Rapp, „Evaluation Prognoseverfahren“ (AP3), „Datenbedarf und Prognosevariablen“ (AP4),
2012c] 22.9.2012, nicht veröffentlicht

[ZHAW/Rapp, Forschungsauftrag ASTRA 2011/010 - Stauprognoseverfahren / -systeme: Zwischenberichts-
2013a] entwurf „Datenverfügbarkeit und - bereitstellung“ (AP5), 30.9.2013, nicht veröffentlicht

[ZHAW/Rapp, Forschungsauftrag ASTRA 2011/010 - Stauprognoseverfahren / -systeme: Zwischenbericht
2013b] „Systemkonzept“ (AP6), 21.9.2013, nicht veröffentlicht

[ZHAW/Rapp, Forschungsauftrag ASTRA 2011/010 - Stauprognoseverfahren / -systeme: Zwischenbericht
2014] „Evaluation Systemkonzept und Vorbereitung Phase II“ (AP7), 21.1.2014, nicht veröffentlicht

Weitere Literaturangaben gehen aus den Datenerfassungssystembeschreibungs- und -beurteilungsblättern hervor in den Arbeitsberichten (insbesondere [ZHAW/Rapp, 2012a] hervor).

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 06.05.2014

Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA 2011/010
Projekttitel: Stauprognoseverfahren und -systeme
Enddatum: 30.05.2014

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden die Voraussetzungen, Anforderungen und das Potential eines Stauprognosesystems für die Schweiz eruiert und in der Folge ein Konzept für ein solches System entwickelt. Zusammenfassend können die folgenden Punkte festgehalten werden: 1) Kein System auf dem Markt kann allen Anforderungen gerecht werden. Insbesondere fehlt den Systemen typischerweise eine echte Prognosefähigkeit, die sowohl unterschiedliche Prognosehorizonte, wie auch lokale Einflüsse und Rahmenbedingungen (wie z.B. lokale Feiertage etc.) berücksichtigt. 2) Auf methodischer Seite besteht ein erhebliches Potential, das sich für ein Stauprognosesystem in der Schweiz gewinnbringend nutzen lässt. 3) Die Umsetzung eines für die Schweiz massgeschneiderten Systems ist grundsätzlich möglich.

Das Projekt orientierte sich an einer Reihe von Leitfragen. Die Ergebnisse dazu können wie folgt kurz zusammengefasst werden:

- 1) State-of-the-Art Prognoseverfahren: Man kann grundsätzlich zwischen simulationsbasierten und statistischen Verfahren unterscheiden. Allgemein scheint eine Kombination von verschiedenen Verfahren geeignet. Ein grosser Teil der wissenschaftlich beschriebenen Methoden kommt allerdings bisher in der Praxis nur beschränkt zum Einsatz.
- 2) State-of-the-Art Prognosesysteme: Im Vordergrund steht die Verkehrsinformation. Defizite bestehen bei der Prognosefähigkeit und der Berücksichtigung lokaler Rahmenbedingungen.
- 3) Anforderungen an ein Stauprognosesystem: Die Anforderungen sind vielfältig. Im Zentrum steht eine Anwendung, die für die Verkehrsinformation, die Routenplanung und das Verkehrsmanagement gleichermaßen funktioniert.
- 4) Prognoseverfahren und Prognosevariablen: Für ein zuverlässiges und universell einsetzbares Prognosesystem sollten verschiedene Verfahren kombiniert werden. Je nach Verkehrssituation können so die für die jeweilige Situation geeigneten Verfahren gewählt bzw. optimal kombiniert werden.
- 5) Datenverfügbarkeit: Dieser Punkt ist entscheidend für erfolgreiche Prognosen. Ein System muss einerseits auf bestehenden Datenquellen (Verkehrszähler) aufbauen und andererseits den Einbezug zukünftig verfügbarer Datenquellen (z.B. floating car/phone data) ermöglichen.
- 6) Systemkonzept: Das System kann als eigene Fachapplikation in die ASTRA-Systemlandschaft eingebettet werden. Beim Aufbau des Systems eignet sich ein Vorgehen in Realisierungsetappen mit zunehmender Komplexität. Auf IT-Seite ist aufgrund der erforderlichen Rechenleistung und für die Ausfallsicherheit eine Parallelisierung der Datenverarbeitung notwendig.
- 7) Beurteilung des Systemkonzeptes: Eine SWOT-Analyse wurde durchgeführt. Grundsätzlich wird der Vorschlag zum Systemkonzept als zielführend und vielversprechend erachtet. Gewisse Unsicherheiten können allerdings erst im Rahmen eines Testbetriebes beurteilt werden.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Ziele des Projektes wurden erreicht. Fraglich war in der Begleitkommission anfänglich die Zielsetzung und der mögliche Nutzen. Interessant war vor allem der Ansatz, mathematische und statistische Methoden für die Stauprognose anzuwenden, die bisher im Strassenbereich nicht zur Anwendung kamen.

Es wurde aufgezeigt, dass die Stauprognoseverfahren gezielt verbessert werden können. Eine Verbesserung der Prognoseverfahren scheint jedoch nur sinnvoll, wenn damit auch konkret ein Nutzen erzielt werden kann (dh weniger Stau oder zumindest Eindämmung der weiteren Stauzunahme). Es wurden diverse Umsetzungsmöglichkeiten aufgezeigt - welche jedoch im Einzelfall auf Nutzen, Akzeptanz und Anwendbarkeit geprüft werden müssen. Vorhandene, auch erkannte Forschungslücken könnten weiter verfolgt werden.

Die Begleitkommission ist mit der von der Forschungsstelle vorgenommenen Beurteilung einverstanden.

Die Zusammenarbeit mit der Forschungsgruppe war sehr konstruktiv, optimal und wir konnten in den Koordinationssitzungen die Dynamik und Begeisterung aller Beteiligten immer wieder Spüren.

Umsetzung:

Wie erwähnt gibt es diverse Umsetzungsmöglichkeiten. Prioritär sollte man sich auf einfachere Anwendungen konzentrieren und nicht CH-weite Lösungen über alle Strassennetze (Idealzustand?). Dh, den Einsatz in abgrenzbaren, ev lokalen/regionalen Anwendungen erproben und den Nutzen dieser optimierten Prognoseangaben erheben.

Eine solche Projektidee ist:

Strategien zur prognosebasierten Steuerung und Homogenisierung des Verkehrsflusses (z.B. am Beispiel der Nationalstrassen im Limmattal).

Optimierte, prognosebasierte Verkehrsinformation auf den Nord-Süd-Strecken (Gotthard-Achse, San Bernardino-Achse). Nachweisen, inwiefern solche optimierten Prognosen eine Verbesserung gegenüber dem heutigen Zustand bringen (häufig basierend auf Erfahrungswerten der Operatoren).

Hierzu gäbe es höchstens zu ergänzen, dass die Qualität in Abhängigkeit zu den Rohdaten steht. Deshalb müsste für eine allfällige weitere Umsetzung die Qualität und Verfügbarkeit dieser Daten garantiert werden.

weitergehender Forschungsbedarf:

Ein eigentlicher, weiterer Forschungsbedarf besteht zur Zeit nicht. Es geht nun darum, die erhaltenen Resultate an effektiven Beispielen zu erproben (gemäss den Ausführungen im Kapitel Umsetzung).

Einfluss auf Normenwerk:

keinen Einfluss auf Normenwerk

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Suter

Vorname: Heinz

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen, Abteilung Strassennetze, Verkehrsmanagement

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 15.06.2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbaupflaster mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbaupflaster in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarrer Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdruckverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologietransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labor-massstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrsintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlag-schutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009