



# **Einsatz eines Cell-Transmission-Modells in der Verkehrssteuerung**

**Utilisation d'un modèle de transmission cellulaire dans le  
contrôle du trafic**

**Use of a cell transmission model in traffic control**

**SCHWIETERING Ingenieure GmbH**  
**Dr.-Ing. Christoph Schwietering**  
**Denis Löbbbering, M.Sc.**  
**Florian Kretschmann, M.Sc.**

**TU München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik**  
**Dr.-Ing. Matthias Spangler**  
**Barbara Metzger, M.Sc.**

**comnea<sup>T.E.C.</sup>**  
**Dr.-Ing. Friedrich Maier**

**Forschungsprojekt VPT\_20\_00A\_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Verkehrsplanung und -technik (VPT)**

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)



# **Einsatz eines Cell-Transmission-Modells in der Verkehrssteuerung**

**Utilisation d'un modèle de transmission cellulaire dans le  
contrôle du trafic**

**Use of a cell transmission model in traffic control**

**SCHWIETERING Ingenieure GmbH**  
**Dr.-Ing. Christoph Schwietering**  
**Denis Löbbbering, M.Sc.**  
**Florian Kretschmann, M.Sc.**

**TU München, Lehrstuhl für Verkehrstechnik**  
**Dr.-Ing. Matthias Spangler**  
**Barbara Metzger, M.Sc.**

**comnea<sup>T.E.C.</sup>**  
**Dr.-Ing. Friedrich Maier**

**Forschungsprojekt VPT\_20\_00A\_01 auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Verkehrsplanung und -technik (VPT)**

**Dezember 2022**

**1743**

# Impressum

## Forschungsstelle und Projektteam

### Projektleitung

Christoph Schwietering

### Mitglieder

Friedrich Maier

Barbara Metzger

Matthias Spangler

Florian Kretschmann

Denis Löbbbering

## Begleitkommission

### Präsident

Sigrid Pirkelbauer

### Mitglieder

Thomas Gasser

Nikolaos Geroliminis

Anastasios Kouvelas

Patrick Maillard

Marco Richner

Silvio Sigrist

Claude Weis

## Antragsteller

Arbeitsgruppe Verkehrsplanung und -technik (VPT)

## Bezugsquelle

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

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Impressum .....</b>	<b>4</b>
	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>7</b>
	<b>Résumé .....</b>	<b>11</b>
	<b>Summary .....</b>	<b>15</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>19</b>
1.1	Ausgangslage.....	19
1.2	Zielsetzung .....	20
<b>2</b>	<b>Grundlagenermittlung .....</b>	<b>21</b>
2.1	Forschungsbedarf .....	21
2.2	Verkehrsmodellierung und -prognose – Stand des Wissens.....	21
2.3	Verkehrsmanagement.....	24
2.3.1	Netzbeeinflussung.....	26
2.3.2	Betrieb von Verkehrsmanagement in der Schweiz .....	27
2.3.3	Zusammenfassung.....	28
2.4	Datengrundlage für die Modellierung von Verkehrsnachfrage und Netz .....	28
2.5	Auswahl des Testfelds .....	29
<b>3</b>	<b>Erstellung des Netzmodells .....</b>	<b>33</b>
3.1	Strecken .....	33
3.2	Knotenpunkte .....	34
3.3	Detektion .....	34
3.4	Generierung des Netzmodells.....	35
<b>4</b>	<b>Verkehrsnachfragemodellierung .....</b>	<b>37</b>
4.1	Analyse verfügbarer Dateien.....	37
4.2	Datenbereinigung .....	38
4.3	Zeitliche Aggregation der Verkehrsdaten .....	38
4.4	Modellierung streckenabschnittsbezogener Verkehrsmengen .....	40
4.5	Ermittlung der Verkehrsdaten für einen bestimmten Simulationsfall .....	40
4.6	Modellierung von Zu- und Abflüssen .....	40
<b>5</b>	<b>Ermittlung der Streckenkapazitäten.....</b>	<b>43</b>
5.1	Literatur und Regelwerke .....	43
5.2	Anwendung der Literatur und Regelwerke für das CTM.....	45
5.3	Definition der Kapazitäten der einzelnen Zellen .....	47
<b>6</b>	<b>Implementierung des Cell Transmission Models .....</b>	<b>49</b>
6.1	Verkehrsflussmodell .....	49
6.2	Verkehrstromverknüpfungen an Knotenpunkten.....	50
6.3	Maschenschluss.....	52
6.4	Nachweis der Online-Fähigkeit mit einer Pseudo-Online-Umsetzung.....	52
6.5	Ausführungen zu potenziellen Modellanpassungen und -ergänzungen.....	52
6.5.1	Differenzierung verschiedener Fahrzeugklassen.....	52
6.5.2	Modellierung von Bereichen mit geringeren Geschwindigkeiten (z.B. Geschwindigkeitsharmonisierung, Arbeitsstellen) .....	53
6.5.3	Verfeinerung der räumlich-zeitlichen Auflösung .....	53
6.5.4	Verfeinerung der Rückstaumodellierung.....	54

<b>7</b>	<b>Validierung</b> .....	<b>55</b>
7.1	Statistische Analyse der Datengrundlage und der Abbildung der Verkehrsnachfrage.....	55
7.2	Detaillierte Analyse einzelner überlasteter Streckenabschnitte.....	57
7.3	Analyse der Dichte der Fahrzeuge.....	59
7.4	Modellergebnisse mit künstlich platziertem Stau.....	60
7.5	Zusammenfassung.....	63
<b>8</b>	<b>Massnahmen im Verkehrsmanagement</b> .....	<b>65</b>
8.1	Ermittlung des Modellnutzens in Bezug auf derzeitig verwendete Schaltstrategien.....	65
8.2	Beurteilung und Nutzung der Prognosefähigkeit.....	69
8.3	Überführung des CTM in die Praxis.....	71
8.4	Weitere Nutzungsmöglichkeiten.....	74
<b>9</b>	<b>Konzepte zur Ergänzung fehlender Nachfragedaten und zur Abbildung dynamischen Routenwahlverhaltens</b> .....	<b>76</b>
9.1	Flottendaten (FCD) – Potenziale und Ansätze zur Integration.....	76
9.1.1	Potenziale von FCD zur verbesserten Abbildung der Verkehrsnachfrage.....	77
9.1.2	Verkehrsverlagerungen - Potenziale von FCD zu ihrer Erkennung und zu ihrer Abbildung im CTM.....	77
9.1.3	Potenziale von FCD zur Störungserkennung und zur Kapazitätsschätzung in Engpässen.....	77
9.2	Daten aus Planungsmodellen – Potenziale und Ansätze zur Integration.....	78
9.2.1	Daten aus Planungsmodellen zur verbesserten Abbildung der Verkehrsnachfrage im entwickelten Cell Transmission Model.....	78
9.2.2	Daten aus Planungsmodellen zur Abbildung von Verlagerungseffekten bei Störungen des Verkehrsflusses.....	80
9.3	Mögliche nächste Schritte.....	81
<b>10</b>	<b>Fazit und Ausblick</b> .....	<b>82</b>
	<b>Glossar</b> .....	<b>84</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>85</b>
	<b>Projektabschluss</b> .....	<b>87</b>

## Zusammenfassung

Für die intelligente Verkehrssteuerung, -leitung und -lenkung auf dem Nationalstrassennetz ist eine zuverlässige und umfassende Information über die aktuelle Verkehrslage essenziell. Dazu werden seitens ASTRA auf dem Nationalstrassennetz lokale Einzelfahrzeugdaten an Messstellen erfasst, die in Entfernungen von einigen Kilometern angeordnet sind. Damit bieten sie zeitlich hoch aufgelöste, räumlich jedoch lückenhafte Informationen über den aktuellen Verkehrszustand im Netz. Neben der Sicht auf die aktuelle Verkehrslage ist insbesondere im Hinblick auf präventives Verkehrsmanagement oder Alternativroutensteuerung zudem eine Kurzfristprognose für einen Zeitraum bis zu zwei Stunden wünschenswert, da dadurch bei grossräumigen Massnahmen eine deutliche Qualitätsverbesserung erzielt werden kann. Eine solche Kurzfristprognose gibt es beim ASTRA bisher nicht.

Ziel dieses Projektes war einerseits die Erarbeitung und Implementierung eines prototypischen Modells zur verbesserten Verkehrslageschätzung und -kurzfristprognose sowie dessen Evaluierung anhand historischer Verkehrsdaten auf der Grundlage eines Cell Transmission Models (CTM). Zusätzlich wurden Konzepte für Massnahmen des Verkehrsmanagements erarbeitet, die in Anbetracht der verbesserten Verkehrslageschätzung und -prognose positive Effekte auf Verkehrsfluss, -sicherheit und -emissionen haben können.

Das gewählte CTM zählt zu den makroskopischen Verkehrsflussmodellen, die Zuflüsse an Netzündern und Zufahrten zeitschrittweise einspeisen und durch einen modellierten Netzausschnitt propagieren, bis sie anteilig an Abfahrten oder komplett an Netzündern abfliessen. Damit kann das CTM ein rein datenbasiertes lückenhaftes Verkehrslagebild vervollständigen und kurzfristig prognostizieren, so dass es Operatoren im Verkehrsmanagement im Hinblick auf präventives Verkehrsmanagement oder Alternativroutensteuerung erheblich unterstützen kann.

Das Netzmodell, welches das Verkehrsangebot abbildet, setzt sich aus fahrtrichtungsbezogenen Streckenabschnitten sowie Verknüpfungen im Bereich von Knotenpunkten zusammen. Die Streckenabschnitte werden in Zellen einheitlicher Länge von jeweils 250 m gegliedert. Als zu modellierender Netzausschnitt wird das Autobahnnetz zwischen Basel und Zürich sowie zwischen Luzern und Winterthur ausgewählt. Kriterien hierfür sind vergleichsweise hohe Streckenauslastungen, die Abdeckung mindestens einer Netzmasche und die Verfügbarkeit von Verkehrsdaten als Eingangsdaten für die Verkehrsnachfragemodellierung. Der Netzausschnitt umfasst etwas mehr als 2.600 Zellen oder 650 Richtungskilometer.

Die Verkehrsnachfragemodellierung im ausgewählten Netzausschnitt erfolgt auf Basis von Einzelfahrzeugdaten aus dem ersten Halbjahr 2019. Abhängig von der Datenverfügbarkeit sowie von Ferien und Feiertagen wurden die Kalenderwochen 13 bis 15 ausgewählt, um eine gemittelte Nachfrageweche zu berechnen. Die Kalenderwoche 16 wurde zu Validierungszwecken ebenso aufbereitet. Unter Verwendung geeigneter gewählter Zu- und Abflussraten werden aus den Verkehrsstärken an den angrenzenden Streckenabschnitten Zu- und Abflussverkehrsstärken für die Anschlussstellen im Testfeld berechnet. Korrekturtermine stellen sicher, dass dabei plausible Werte ausgegeben werden. Abgestimmt auf die Zellenlänge wurde eine Zeitschrittlänge von zehn Sekunden gewählt. Sofern keine lokalen Daten von den angrenzenden Streckenabschnitten einer Anschlussstelle verfügbar waren, wurden Daten von benachbarten Messquerschnitten interpoliert oder ersatzweise übernommen. Zudem wurde eine Methodik entwickelt, die im Fall zu grosser Abstände zu Messquerschnitten unter Einbeziehung von Verkehrsmengen aus Planungsmodellen eine verbesserte Ermittlung von Ersatzwerten ermöglicht:

Zunächst wird für einen Streckenabschnitt zwischen zwei Anschlussstellen, für den keine Eingangsdaten vorliegen, eine Verkehrsstärkeganglinie qualitativ aus den nächstgelegenen Messquerschnitten und quantitativ aus der Verkehrsmenge ermittelt, die das Planungsmodell im Rahmen der Umlegung für diesen Abschnitt ausgibt. Daraus werden dann die Zu- und Abflüsse gemäss dem zuvor beschriebenen Vorgehen modelliert und anschliessend mit den Tageswerten für die Rampen aus der Umlegung in einem ersten Korrekturschritt verbessert.

Ein zweiter abschliessender Korrekturterm stellt sicher, dass die Bilanz der Verkehrsmengen im Übergang vom flussaufwärtigen zum flussabwärtigen Streckenabschnitt stimmt.

Den einzelnen Zellen im modellierten Netzausschnitt werden Kapazitätswerte zugewiesen. Diese Kapazitätswerte quantifizieren das Verkehrsangebot und werden zunächst für Abschnitte zwischen Anschlussstellen oder Teilknotenpunkten einheitlich angewendet. Anpassungen des Kapazitätswerts werden vorgenommen, wenn eine Änderung der Fahrstreifenanzahl, der Steigung oder der Geschwindigkeitsregelung bekannt ist. Sofern verfügbare Messwerte nicht die Festlegung einer anderen Kapazität nahelegen, werden bei der hier beschriebenen Modellierung für Streckenabschnitte mit zwei oder drei Fahrstreifen die Werte der VSS-Norm 40 018a genutzt. An Streckenabschnitten mit mehr Fahrstreifen wird das deutsche HBS mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 120 km/h herangezogen, da die VSS dazu keine Werte beinhaltet. Beim Anwenden der Kapazitätswerte der Regelwerke wird auf die jeweils in der Norm verfügbaren zusätzlichen Parameter wie Steigung der Strecke oder Lage zu Ballungsräumen geachtet.

Ein CTM versetzt bei ungestörtem Verkehrsfluss Fahrzeuge auf einer in Zellen eingeteilten Strecke zwischen zwei Zeitschritten um eine Zelle nach vorn. Die zuvor genannten Festlegungen zur Zellenlänge von 250 m und zu Zeitschritten von 10 s wurden im Hinblick auf daraus resultierende plausible Geschwindigkeiten gewählt, die sich somit zu 90 km/h ergeben – ein Wert, der für das Gesamtkollektiv der Fahrzeuge insbesondere bei stauträchtigen Verhältnissen die Realität gut annähert, zumal die Art und Weise der Nachfragemodellierung daraus resultierende Abweichungen korrigiert. Für das vorliegende CTM wurde die Festlegung getroffen, dass ein Lkw-ähnliches Fahrzeug 1,5 Pkw-ähnlichen Fahrzeugen entspricht. Ist die Anzahl der zu versetzenden Fahrzeuge in einer Zelle jedoch so hoch, dass ihre Versetzung in die nächste Zelle einer Übersteigerung der Streckenkapazität entsprechen würde, so werden die überschüssigen Fahrzeuge nicht versetzt, so dass ein Stau initiiert wird. Dies kann durch eine Steigerung der Verkehrsstärke an einer Anschlussstelle oder durch einen Kapazitätsrückgang z.B. infolge einer Fahrstreifenreduktion dauerhaft oder infolge eines Unfalls zeitlich begrenzt eintreten. Führt der Stau in der Zelle oberhalb des Engpasses dazu, dass dort eine maximale Verkehrsdichte für den Fall eines Staus erreicht wird, so wird auch ihre Kapazität heruntersetzt und der Stau breitet sich weiter flussaufwärts aus. Er löst sich auf, wenn die Verkehrsnachfrage flussaufwärts bis unter die verbleibende Kapazität abfällt oder wenn die Kapazität flussabwärts angehoben wird.

Das Verkehrsflussmodell wurde um die Funktion erweitert, Verkehrsströme auch in geschlossenen Netzmaschen abzubilden. Dazu wird ein Streckenabschnitt in beiden Fahrtrichtungen jeweils in zwei Streckenabschnitte geteilt. Ein neuer Teilknotenpunkttyp mit je einer Zu- und Abflusskante verbindet die geteilten Streckenabschnitte wieder. Er modelliert Verkehrsströme und Stauwellenbewegungen unter Verrechnung des zeitlichen Versatzes von einem Modellierungsintervall, der bei einem CTM beim Schliessen einer Masche auftritt. Die Festlegung, welcher Abschnitt modelltechnisch geteilt wird, um nachfolgend die Masche zu schliessen, ist beliebig. Weil die Rechenaufwände bei häufiger Staubildung am Maschenschluss anwachsen, ist es zweckmässig, Maschenschlüsse an Abschnitten vorzusehen, die selten von Staus betroffen sind.

Das beschriebene Modell wurde ausgiebig getestet und validiert. Dabei zeigte sich, dass das Modell zur Verkehrslagemodellierung und zur kurzfristigen Verkehrszustandsprognose sehr gut geeignet ist. Es bildet den Verkehr mit der eingegebenen Nachfrage sinnvoll ab und erzeugt auch den verdichteten Verkehr bzw. die Staus an der jeweiligen Stelle plausibel. Die Ausbreitung von Stauungen erfolgt durch das Modell entsprechend der Realität. Dabei ist zu beachten, dass die zutreffende Modellierung der Verkehrsnachfrage dafür von zentraler Bedeutung ist. Dies setzt wiederum die Verfügbarkeit belastbarer Messdaten voraus. Von ähnlicher Bedeutung ist die zutreffende Quantifizierung der Streckenkapazitäten. Es ist zudem festzuhalten, dass zu Beginn eines Simulationslaufs das modellierte Netz zunächst mit Verkehr gefüllt werden muss, so dass erst nach einer gewissen Modell-Laufzeit die Nachfrage im Modellnetz korrekt dargestellt werden kann.

Die Validierung zeigte zudem, dass die Modellierung des Maschenschlusses erfolgreich war: Sowohl die Übergabe von Fahrzeugen in Fahrtrichtung als auch vor allem die Modellierung von Staus entgegen der Fahrtrichtung über den Maschenschluss hinweg verliefen reibungslos.



Ein weiterer Validierungsschritt zeigte die Online-Fähigkeit des Modells im Hinblick auf eine Anwendung im Verkehrsmanagement: Dazu wurden Daten aus der Kalenderwoche 16 des Jahres 2019 als Pseudo-Online-Daten dem Verkehrsflussmodell zugeführt. Ab einem beliebigen Zeitpunkt während eines Modelllaufs, dem pseudo-aktuellen Zeitpunkt, fanden historische Zu- und Abflüsse gemittelt aus den Kalenderwochen 13 bis 15 des Jahres 2019 Eingang ins Verkehrsflussmodell, so dass eine Kurzfristprognose ermittelt wurde. Entsprechende Testläufe verliefen erfolgreich.

Das CTM kann dem Operator als objektive Entscheidungshilfe dienen, indem es potenzielle Situationen erkennt bzw. prognostiziert und Massnahmen mit der zugehörigen Aktivierung und Deaktivierung von Schaltungen räumlich und zeitlich präzise vorgibt. Beispielhaft bei nachfolgend aufgeführten Anwendungsfällen wird erwartet, dass das Modell im Hinblick auf Schaltstrategien und Prognosefähigkeit einen Nutzen liefern kann:

- Stauwarnung oder Umleitungen: für die Aktivierungs- und Deaktivierungsbedingungen der einzelnen Massnahmen werden insbesondere die Kenngrössen Rückstaulänge, Lage des Staus und Ereignisdauer benötigt, welche sich dem Modell entnehmen lassen. Eine Erweiterung des Modells um weitere Kenngrössen wie beispielsweise die Reisezeitzunahme ist ebenfalls möglich.
- Absehbare Verkehrsüberlastung, z.B. infolge einer Arbeitsstelle: sofern die Streckenkapazität der Arbeitsstellenverkehrsführung bekannt ist, können taktische Massnahmen zur Minderung der verkehrlichen Konsequenzen ergriffen werden.
- Plötzlich auftretende Verkehrsbehinderungen wie Unfälle: verkehrliche Konsequenzen können rasch modelliert werden, so dass operative Massnahmen zur Minderung der verkehrlichen Konsequenzen ergriffen werden können.
- Absehbar abnehmende Verkehrsbehinderungen: bei einer abklingenden Verkehrsstörung kann der Verkehr frühzeitig wieder auf die Hauptroute geleitet werden.
- Entwicklung und Evaluierung neuer Verkehrsmanagementpläne.

Mit einem flächendeckenden zellenbezogenen Verkehrsmonitoring für das Fernstrassennetz bietet das CTM eine proaktive Unterstützung der Operatoren bei der Überwachung des Verkehrs und dem Schalten von Massnahmen.

Eine Einbindung von Flottendaten ins Gesamtmodell könnte erhebliche Vorteile bei der Erkennung von Störfällen sowie im Abgleich mit lokalen Daten bei der Abschätzung von verbleibenden Kapazitäten bei Störfällen sowohl online als auch offline bieten.



## Résumé

Une information fiable et complète sur la situation actuelle du trafic est essentielle pour la gestion, la direction et le guidage intelligents du trafic sur le réseau des routes nationales. Pour ce faire, OFROU saisit les données locales des véhicules individuels sur le réseau des routes nationales à des points de mesure situés à des distances de quelques kilomètres. Elles offrent ainsi des informations à haute résolution temporelle, mais lacunaires dans l'espace, sur l'état actuel du trafic sur le réseau. Outre la vue sur la situation actuelle du trafic, il est souhaitable de disposer de prévisions à court terme pour une période allant jusqu'à deux heures, notamment dans l'optique d'une gestion préventive du trafic ou d'une gestion des itinéraires alternatifs, car cela permet d'obtenir une nette amélioration de la qualité lors de mesures à grande échelle. OFROU ne dispose pas encore d'une telle prévision à court terme.

L'objectif de ce projet était, d'une part, d'élaborer et d'implémenter un modèle prototype pour améliorer l'estimation de la charge de trafic et les prévisions à court terme, ainsi que son évaluation à l'aide de données historiques sur le trafic, sur la base d'un Cell Transmission Model (CTM). En outre, des concepts de mesures de gestion du trafic ont été élaborés, qui, compte tenu de l'amélioration de l'estimation de la charge de trafic et des prévisions, peuvent avoir des effets positifs sur la fluidité, la sécurité et les émissions du trafic.

Le CTM choisi fait partie des modèles macroscopiques de flux de trafic qui alimentent les flux entrants aux limites du réseau et les flux entrants au pas de temps et les propagent à travers une section de réseau modélisée jusqu'à ce qu'ils s'écoulent proportionnellement aux départs ou complètement aux limites du réseau. Le CTM peut ainsi compléter et prévoir à court terme une image lacunaire du trafic basée uniquement sur des données, de sorte qu'il peut considérablement aider les opérateurs dans la gestion du trafic en vue d'une gestion préventive du trafic ou d'une gestion des itinéraires alternatifs.

Le modèle de réseau, qui représente l'offre de transport, se compose de tronçons de ligne liés à la direction ainsi que de connexions au niveau des nœuds. Les tronçons sont divisés en cellules d'une longueur uniforme de 250 m chacune. Le tronçon de réseau à modéliser est le réseau autoroutier entre Bâle et Zurich ainsi qu'entre Lucerne et Winterthur. Les critères retenus sont des taux d'utilisation relativement élevés des tronçons, la couverture d'au moins une maille du réseau et la disponibilité de données de trafic comme données d'entrée pour la modélisation de la demande de transport. La section du réseau comprend un peu plus de 2 600 cellules ou 650 kilomètres de direction.

La modélisation de la demande de transport dans la section de réseau sélectionnée est réalisée sur la base de données de véhicules individuels du premier semestre 2019. En fonction de la disponibilité des données ainsi que des vacances et des jours fériés, les semaines calendaires 13 à 15 ont été sélectionnées afin de calculer une semaine de demande moyenne. La semaine 16 a également été préparée à des fins de validation. En utilisant des taux d'affluence et d'écoulement choisis de manière appropriée, les taux d'affluence et d'écoulement pour les points de connexion dans la zone test sont calculés à partir des volumes de trafic sur les tronçons adjacents. Des termes de correction garantissent que les valeurs obtenues sont plausibles. Un pas de temps de dix secondes a été choisi en fonction de la longueur des cellules. Lorsqu'aucune donnée locale n'était disponible pour les tronçons adjacents d'un point de raccordement, les données des sections de mesure voisines ont été interpolées ou reprises à titre de remplacement. En outre, une méthodologie a été développée qui, dans le cas de distances trop importantes par rapport aux sections de mesure, permet d'améliorer la détermination de valeurs de remplacement en intégrant des volumes de trafic issus de modèles de planification:

Tout d'abord, pour un tronçon situé entre deux échangeurs et pour lequel il n'existe pas de données d'entrée, une courbe de variation de l'intensité du trafic est déterminée qualitativement à partir des sections de mesure les plus proches et quantitativement à partir de la quantité de trafic que le modèle de planification fournit pour ce tronçon dans le cadre

du réaménagement. Les débits entrants et sortants sont ensuite modélisés selon la procédure décrite précédemment, puis améliorés avec les valeurs journalières pour les rampes issues du réaménagement dans une première étape de correction. Un deuxième terme de correction final assure que le bilan des volumes de trafic dans la transition entre le tronçon amont et le tronçon aval est correct.

Des valeurs de capacité sont attribuées aux différentes cellules de la section de réseau modélisée. Ces valeurs de capacité quantifient l'offre de trafic et sont d'abord appliquées de manière uniforme aux tronçons entre les échangeurs ou les sous-nœuds. Des ajustements de la valeur de capacité sont effectués lorsqu'une modification du nombre de voies, de la pente ou de la régulation de la vitesse est connue. Dans la mesure où les valeurs de mesure disponibles ne suggèrent pas la définition d'une autre capacité, la modélisation décrite ici utilise les valeurs de la norme VSS 40 018a pour les tronçons à deux ou trois voies de circulation. Sur les tronçons comportant plus de voies, on utilise la norme allemande « Manuel de dimensionnement des installations de transport routier » avec une limitation de vitesse de 120 km/h, car la VSS ne contient pas de valeurs à ce sujet. Lors de l'application des valeurs de capacité des normes, il est tenu compte des paramètres supplémentaires disponibles dans la norme, tels que la pente de la ligne ou la situation par rapport aux agglomérations.

Un CTM déplace les véhicules d'une cellule vers l'avant entre deux pas de temps sur un tronçon divisé en cellules lorsque le trafic n'est pas perturbé. Les définitions susmentionnées d'une longueur de cellule de 250 m et d'intervalles de temps de 10 s ont été choisies en vue d'obtenir des vitesses plausibles qui se traduisent par 90 km/h - une valeur qui, pour l'ensemble des véhicules, se rapproche bien de la réalité, en particulier dans des conditions de congestion, d'autant plus que le mode de modélisation de la demande corrige les écarts qui en résultent. Pour le présent CTM, il a été décidé qu'un véhicule assimilé à un camion correspond à 1,5 véhicule assimilé à une voiture. Toutefois, si le nombre de véhicules à déplacer dans une cellule est si élevé que leur déplacement vers la cellule suivante correspondrait à un dépassement de la capacité de la ligne, les véhicules excédentaires ne sont pas déplacés, ce qui initie un embouteillage. Cela peut être dû à une augmentation de l'intensité du trafic à une jonction ou à une diminution de la capacité, par exemple à la suite d'une réduction du nombre de voies de circulation, de manière permanente ou limitée dans le temps à la suite d'un accident. Si l'embouteillage dans la cellule en amont du goulet d'étranglement a pour conséquence qu'une densité de trafic maximale y est atteinte en cas d'embouteillage, sa capacité est également réduite et l'embouteillage se propage plus en amont. Il se résorbe lorsque la demande de trafic en amont chute en dessous de la capacité restante ou lorsque la capacité en aval est augmentée.

Le modèle de flux de trafic a été étendu à la fonction de représentation des flux de trafic également dans des mailles de réseau fermées. Pour ce faire, un tronçon de route est divisé en deux dans les deux sens de circulation. Un nouveau type de nœud partiel avec une arête d'entrée et une arête de sortie relie les tronçons divisés. Il modélise les flux de trafic et les mouvements des ondes de congestion en tenant compte du décalage temporel d'un intervalle de modélisation, qui se produit dans un CTM lors de la fermeture d'une maille. Il est possible de déterminer à volonté quel tronçon est divisé par le modèle pour fermer ensuite la maille. Comme les efforts de calcul augmentent en cas de formation fréquente d'embouteillages à la fermeture des mailles, il est judicieux de prévoir des fermetures de mailles sur des tronçons qui sont rarement touchés par des embouteillages.

Le modèle décrit a été testé et validé de manière approfondie. Il s'est avéré que le modèle est très bien adapté à la modélisation de la situation du trafic et à la prévision de l'état du trafic à court terme. Il reproduit de manière judicieuse le trafic avec la demande introduite et génère également de manière plausible le trafic comprimé ou les embouteillages à l'endroit concerné. La propagation des embouteillages est effectuée par le modèle conformément à la réalité. Il convient de noter que la modélisation correcte de la demande de transport est d'une importance capitale à cet égard. Cela présuppose à son tour la disponibilité de données de mesure fiables. De même, il est important de quantifier correctement les capacités des lignes. Il faut également noter qu'au début d'une simulation, le réseau modélisé doit d'abord être rempli de trafic, de sorte que la demande ne peut être

représentée correctement dans le réseau modélisé qu'après une certaine durée d'exécution du modèle.

La validation a en outre montré que la modélisation de la fermeture des mailles était réussie : tant le transfert des véhicules dans le sens de la circulation que, surtout, la modélisation des embouteillages dans le sens inverse de la circulation par-delà la fermeture des mailles se sont déroulés sans problème.

Une autre étape de validation a montré la capacité en ligne du modèle en vue d'une application dans la gestion du trafic : pour cela, des données de la semaine 16 du calendrier de l'année 2019 ont été introduites dans le modèle de flux de trafic en tant que données pseudo-en ligne. A partir d'un moment quelconque pendant l'exécution du modèle, le moment pseudo-actuel, les flux entrants et sortants historiques moyennés des semaines calendaires 13 à 15 de l'année 2019 ont été intégrés dans le modèle de flux de trafic, de sorte qu'une prévision à court terme a été déterminée. Les tests correspondants se sont déroulés avec succès.

Le CTM peut servir d'aide à la décision objective pour l'opérateur en identifiant ou en prévoyant des situations potentielles et en indiquant avec précision dans l'espace et dans le temps les mesures à prendre avec l'activation et la désactivation des circuits correspondantes. On s'attend à ce que le modèle soit utile en termes de stratégies de commutation et de capacité de prévision dans les cas d'application suivants:

- Alerte embouteillage ou déviations: pour les conditions d'activation et de désactivation des différentes mesures, on a besoin en particulier des paramètres longueur du bouchon, emplacement du bouchon et durée de l'événement, qui peuvent être extraits du modèle. Il est également possible d'étendre le modèle à d'autres paramètres tels que l'augmentation du temps de trajet.
- Congestion prévisible du trafic, par exemple en raison d'un poste de travail: dans la mesure où la capacité de l'itinéraire du trafic du poste de travail est connue, des mesures tactiques peuvent être prises pour réduire les conséquences sur le trafic.
- Entraves soudaines à la circulation, telles que les accidents: les conséquences sur la circulation peuvent être modélisées rapidement, de sorte que des mesures opérationnelles peuvent être prises pour atténuer les conséquences sur la circulation.
- Perturbations du trafic en diminution prévisible : lorsque la perturbation du trafic s'atténue, le trafic peut être réorienté à temps vers l'itinéraire principal.
- Développement et évaluation de nouveaux plans de gestion du trafic.

Grace à un monitoring cellulaire du trafic sur l'ensemble du réseau routier interurbain, le CTM offre un soutien proactif aux opérateurs pour la surveillance du trafic et la mise en place de mesures.

L'intégration des données de la flotte dans le modèle global pourrait offrir des avantages considérables en termes de détection des incidents et de comparaison avec les données locales pour l'estimation des capacités restantes en cas d'incident, tant en ligne que hors ligne.



## Summary

Reliable and comprehensive information on the current traffic situation is essential for intelligent traffic control, management and guidance on the national road network. To this objective, FEDRO collects local data on individual vehicles at measuring points located at distances of several kilometers on the national road network. Thus, they provide information about the current traffic situation in the network with a high temporal resolution, but with spatial gaps. In addition to the view of the current traffic situation, a short-term forecast for a period of up to two hours is desirable, especially regarding preventive traffic management or alternative route control, as this can achieve a significant improvement in quality for large-scale measures. Such a short-term forecast does not yet exist at FEDRO.

The aim of this project was the development and implementation of a prototypical model for improved traffic situation estimation and short-term forecasting as well as its evaluation based on historical traffic data using a Cell Transmission Model (CTM). In addition, concepts for traffic management measures were developed, which can have positive effects on traffic flow, safety and emissions in view of the improved traffic situation estimation and prognosis.

The selected CTM is one of the macroscopic traffic flow models that feed in inflows at network edges and approaches in time steps and promote them through a modeled network section until they flow off proportionally at exits or completely at network edges. Thus, CTM can complete a purely data-based incomplete current traffic situation and forecast it in the short term, so that it can considerably support operators in traffic management with regard to preventive traffic management or alternative route control.

The network model, which depicts the traffic offer, is composed of route sections related to the direction of travel as well as links in the area of intersections. The route sections are divided into cells of uniform length of 250 m each. The highway network between Basel and Zurich and between Lucerne and Winterthur is selected as the network section to be modeled. Criteria for this are comparatively high route utilization, the coverage of at least one network mesh and the availability of traffic data as input data for the traffic demand modeling. The network section covers slightly more than 2,600 cells or 650 directional kilometers.

Traffic demand modeling in the selected network section is based on single vehicle data from the first half of 2019. Depending on data availability and vacations or public holidays, calendar weeks 13 - 15 were selected to calculate an averaged demand week. Calendar week 16 was also prepared for validation purposes. Using appropriately selected inflow and outflow rates, inflow and outflow traffic volumes for the interchanges in the test area are calculated from the traffic volumes at the adjacent roadway segments. Correction terms ensure that plausible values are issued. A time step length of ten seconds was selected to match the cell length. If no local data were available from the adjacent sections of a junction, data from neighboring measurement cross sections were interpolated or used as a substitute. In addition, a methodology was developed which, in the case of excessively large distances to measurement cross-sections, allows improved determination of substitute values by including traffic volumes from planning models:

First, for a section of road between two interchanges, for which no input data are available, a traffic volume hydrograph is determined qualitatively from the nearest measurement cross-sections and quantitatively from the traffic volume that the planning model outputs for this section as part of the apportionment. From this, the inflows and outflows are then modeled according to the procedure described above and subsequently improved with the daily values for the ramps from the rerouting in a first correction step. A second final correction term ensures that the balance of traffic volumes in the transition from the upstream to the downstream section is correct.

Capacity values are assigned to the individual cells in the modeled network section. These capacity values quantify the available traffic and are initially applied uniformly to sections

between junctions or sub-junctions. Adjustments to the capacity value are made when a change in the number of lanes, grade, or speed control is known. Unless available measured values suggest the specification of a different capacity, the modeling described here uses the values of VSS Standard 40 018a for roadway sections with two or three lanes. On sections with more lanes, the German “Manual for the dimensioning of road traffic facilities“ is used with a speed limit of 120 km/h, since the VSS does not contain any values for this. When applying the capacity values of the regulations, attention is paid to the additional parameters available in the standard in each case, such as the gradient of the route or its location in relation to urban areas.

A CTM moves vehicles forward by one cell on a route divided into cells between two time steps if the traffic flow is undisturbed. The previously mentioned specifications for the cell length of 250 m and for time steps of 10 s were chosen regarding the resulting plausible speeds, which thus add up to 90 km/h - a value that approximates reality well for the total collective of vehicles, especially in congested conditions, particularly since the manner in which the demand is modeled corrects any resulting deviations. For the CTM at hand, the determination was made that one truck-like vehicle is equivalent to 1.5 car-like vehicles. However, if the number of vehicles to be shifted in a cell is so high that shifting them to the next cell would correspond to an overshoot of the roadway capacity, the excess vehicles are not shifted, and congestion is initiated. This can occur permanently due to an increase in traffic volume at a junction or due to a decrease in capacity, e.g., because of a lane reduction, or temporarily as a result of an accident. If the congestion in the cell above the bottleneck causes a maximum traffic density to be reached there in the event of a traffic jam, its capacity is also downgraded and the congestion spreads further upstream. It dissipates when the traffic demand upstream drops to below the remaining capacity or when the capacity downstream is raised.

The traffic flow model has been extended to include the function of mapping traffic flows in closed network meshes. For this purpose, a route section is divided into two route sections in both directions of travel. A new type of partial intersection, each with an inflow and outflow edge, reconnects the divided route sections. It models traffic flows and congestion wave movements by accounting for the time offset from a modeling interval that occurs when a CTM closes a mesh. The determination of which section to model is split to subsequently close the mesh is arbitrary. Because the computational effort increases when congestion occurs frequently at the mesh closure, it is appropriate to provide mesh closures at sections that are rarely affected by congestion.

The described model was extensively tested and validated. It was shown that the model is very well suited for traffic situation modeling and short-term traffic condition forecasting. It reasonably models the traffic with the input demand and also plausibly generates the congested traffic or congestion at the respective location. The propagation of congestion is done by the model according to reality. It should be noted that the accurate modeling of the traffic demand is of central importance for this. This in turn requires the availability of reliable measurement data. Of similar importance is the accurate quantification of route capacities. It should also be noted that at the beginning of a simulation run, the modeled network must first be filled with traffic, so that the demand in the model network can only be correctly represented after a certain model runtime.

The validation also showed that the modeling of the mesh closure was successful: both the transfer of vehicles in the direction of travel and, more importantly, the modeling of congestion against the direction of travel across the mesh closure ran smoothly.

A further validation step demonstrated the online capability of the model with regard to an application in traffic management: For this purpose, data from calendar week 16 of 2019 were fed to the traffic flow model as pseudo-online data. Starting at any point during a model run, the pseudo-current point in time, historical inflows and outflows averaged from calendar weeks 13 to 15 of 2019 were fed into the traffic flow model so that a short-term forecast was determined. Corresponding test runs were successful.

The CTM can serve as an objective decision support tool for the operator by recognizing or predicting potential situations and specifying measures with the associated activation



and deactivation of circuits in a spatially and temporally precise manner. Exemplified by the following use cases, the model is expected to provide value in terms of switching strategies and predictive capability:

- Congestion warning or detour: for the activation and deactivation conditions of the individual measures, in particular the parameters congestion length, location of the congestion and event duration are required, which can be taken from the model. It is also possible to extend the model to include other parameters such as travel time increase.
- Foreseeable traffic congestion, e.g. due to a work site: if the route capacity of the work site traffic routing is known, tactical measures can be taken to mitigate the traffic consequences.
- Sudden traffic disruptions such as accidents: traffic consequences can be modeled quickly so that operational measures can be taken to mitigate the traffic consequences.
- Foreseeable decreasing traffic congestion: when traffic congestion subsides, traffic can be directed back to the main route at an early stage.
- Develop and evaluate new traffic management plans.

With area-wide cell-based traffic monitoring for the trunk road network, the CTM offers proactive support for operators in monitoring traffic and switching measures.

Incorporating fleet data into the overall model could offer significant advantages in detecting incidents as well as in matching with local data in estimating remaining capacity in the event of incidents, both online and offline.



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage

Für die intelligente Verkehrssteuerung, -leitung und -lenkung auf dem Nationalstrassennetz ist eine zuverlässige und umfassende Information über die aktuelle Verkehrslage essenziell. Dazu werden seitens ASTRA auf dem Nationalstrassennetz Einzelfahrzeugdaten an lokalen Messstellen erfasst, die bis zu 5 km auseinanderliegen. Damit bieten sie zeitlich hoch aufgelöste, räumlich jedoch lückenhafte Informationen über den aktuellen Verkehrszustand im Netz.

Neben der Sicht auf die aktuelle Verkehrslage ist insbesondere im Hinblick auf präventives Verkehrsmanagement oder Alternativroutensteuerung eine Kurzfristprognose (bis ca. 2 h) erforderlich, da dadurch bei grossräumigen Massnahmen eine deutliche Qualitätsverbesserung erzielt werden kann. Eine robuste Kurzzeitprognose wird beim ASTRA bisher nicht eingesetzt.

Eine Möglichkeit zur flächendeckenden Rekonstruktion der aktuellen Verkehrslage sowie zur Ermittlung einer Kurzzeitprognose stellen Verkehrsflussmodelle dar. Während makroskopische Umlegungsmodelle basierend auf Quelle-Ziel-Matrizen mit einer räumlich vergleichsweise groben Auflösung meist von Knotenpunkt zu Knotenpunkt primär zu Planungszwecken eingesetzt werden, sind mikroskopische wie makroskopische Verkehrsflussmodelle unter Verwendung von Zuflüssen an den Netzrändern dazu in der Lage, räumlich-zeitlich differenziert die Dynamik des Verkehrsgeschehens insbesondere auf Autobahnen und Fernstrassen abzubilden.

Gemäss den Abwägungen in Kapitel 2 soll in diesem Projekt mit einem angepassten Cell Transmission Model (CTM) ein makroskopisches Verkehrsflussmodell für Nationalstrassen entwickelt und evaluiert werden, das gekoppelt mit den bereits verfügbaren zeitlich hoch aufgelösten Verkehrsdaten ein detailliertes Verkehrslagebild (räumlich und zeitlich) einschliesslich Kurzzeitprognose (Prognosehorizont ca. 2 h) liefern wird. Ein solches Modell, das auch eine belastbare Reisezeitprognose innerhalb des Prognosehorizonts ermöglicht, stellt eine deutliche Erweiterung der bisherigen Werkzeuge in der angewandten Verkehrsflussmodellierung dar.

Die Verkehrsnachfragemodellierung erfolgt auf Basis der gemessenen Einzelfahrzeugdaten an den vorhandenen Stützstellen des Netzes, die zu Zu- und Abflüssen an den Modellrändern und an Anschlussstellen verarbeitet werden. Das neben dem Verkehrsflussmodell benötigte Netzmodell wird aus GIS-Daten gewonnen. Die Teilmodelle werden so aufeinander abgestimmt, dass belastbare Ergebnisse bei minimiertem händischem Aufwand für die Kalibrierung erzielt werden. In diesem fundamentalen Aspekt liegt ein wesentliches Forschungsziel des Projekts.

Hauptfokus des Projekts ist zunächst die Modellierung im Hochleistungsstrassennetz, eine spätere Anwendung auch im Hauptverkehrsstrassennetz ist möglich.

Darüber hinaus soll die Zuverlässigkeit der Modellergebnisse hinsichtlich der Aussagegüte der beiden Anwendungszwecke Verkehrssteuerung und Verkehrsprognose untersucht werden, inwieweit diese einen Mehrwert bei der Echtzeit-Berechnung der Kurzfristprognose und der Stauwellenberechnung besitzen.

Durch den Einsatz von lokal erfassten Einzelfahrzeugdaten zur Rekonstruktion der aktuellen Verkehrslage für das gesamte betrachtete Netz sowie zur Kurzfristprognose können wesentliche Bausteine des Verkehrsmanagements erweitert und verbessert werden. So kann beispielsweise die häufig im Verkehrsmanagement eingesetzte Glättung und Trendextrapolation, die in der Praxis nur unzureichende Qualität in der Kurzfristprognose erzielt, ersetzt werden. Zudem können durch das Modell weitere lokale Zählstellen simuliert werden (Definition von virtuellen Zählstellen), die dann im

Verkehrsmanagement als Eingangsgrößen für die Verkehrssteuerung für die klassischen Regelungsalgorithmen dienen können. Würde sich der formulierte Ansatz bestätigen, liessen sich darauf aufbauend auch vollkommen neue Regelungsalgorithmen ergänzen, mit dem Vorteil des Streckenbezugs der Daten anstatt der derzeit verwendeten lokalen Stützstellen. Darüber hinaus ist das Modell in der Lage, Reisezeitinformationen zu ermitteln, die im Verkehrsmanagement verwendet werden können.

Grundsätzlich soll im Forschungsprojekt quelloffene Standardsoftware genutzt werden, so dass der technische Entwicklungsaufwand minimal und auf die spezifische verkehrstechnische Fragestellung beschränkt bleibt.

Aus der beschriebenen Ausgangslage ergeben sich im Projektkontext folgende Forschungsfragen:

- Wie kann ein gezielt erweitertes CTM das zeitlich hoch aufgelöste, räumlich jedoch sehr lückenhafte Verkehrslagebild, das sich aus den beim ASTRA erhobenen Einzelfahrzeugdaten ergibt, räumlich hoch aufgelöst vervollständigen?
- Mit welcher Genauigkeit gelingt eine Kurzfristprognose des Verkehrszustands auf Autobahnen mithilfe eines erweiterten CTM (Prognosehorizont z.B. 2h), auch und insbesondere hinsichtlich Verkehrsmanagement und Alternativroutensteuerung?
- Inwieweit können aus dieser Vervollständigung heraus Reisezeiten einschliesslich ihrer Kurzfristprognosen für verschiedenste Relationen belastbar abgeleitet werden?

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse des Forschungsprojekts und erläutert die Möglichkeiten der praktischen Umsetzung.

## 1.2 Zielsetzung

Die wesentlichen Ziele des Forschungsvorhabens sind

- die Entwicklung und Implementierung eines prototypischen Gesamtmodells zur verbesserten Verkehrslageschätzung und -kurzfristprognose (2h),
  - dessen Netzmodell geometrisch aus GIS-Daten generiert wird,
  - das detaillierte Verkehrsinformationen nutzt, wie sie aus Einzelfahrzeugdaten gewonnen werden können, und von Floating Car Data, die eine besondere Ergebnisgüte liefern,
  - dessen Verkehrsflussmodell auf einen räumlich-zeitlich diskretisierten makroskopischen Ansatz zurückgreift,
  - das die Streckenkapazitäten aus historischen lokalen und fahrzeugseitig generierten Verkehrsdaten festlegt,
- die Evaluierung des prototypischen Modells anhand historischer Verkehrsdaten,
- die Erarbeitung eines Konzepts für Massnahmen des Verkehrsmanagements, die in Anbetracht der verbesserten Verkehrslageschätzung und -prognose positive Effekte auf Verkehrsfluss, -sicherheit und -emissionen haben können

auf der Grundlage der fundierten Kenntnis des Standes von Wissenschaft und Technik.

Aufgrund des deterministischen Charakters des eingesetzten Verkehrsflussmodells können Aspekte der Stochastik ausschliesslich durch Variation der modellierten Verkehrsnachfrage oder Streckenkapazitäten abgebildet werden.

## 2 Grundlagenermittlung

### 2.1 Forschungsbedarf

Um die erste Forschungsfrage „Wie kann ein gezielt erweitertes CTM das zeitlich hoch aufgelöste, räumlich jedoch sehr lückenhafte Verkehrslagebild, das sich aus den beim ASTRA erhobenen Einzelfahrzeugdaten ergibt, räumlich hoch aufgelöst vervollständigen?“ zu beantworten, werden im ersten Schritt die Möglichkeiten von Verkehrsmodellen genauer analysiert.

Das zu entwickelnde Verkehrsmodell soll die Möglichkeiten im Verkehrsmanagement erweitern und verbessern. Anschliessend wird daher der Stand des Wissens zum Thema Verkehrsmanagement und Verkehrsbeeinflussung zusammengestellt, mit dem Schwerpunkt auf überregionale Verkehrsmanagement-Strategien.

In einem weiteren Schritt werden die übernommenen Verkehrsdaten und verfügbare kartographische Daten und Tools analysiert. Ausserdem wird eine Auswahl eines relevanten Ausschnitts des Autobahnnetzes in der Schweiz als potenzielles Testfeld für das zu entwickelnde Verfahren vorgenommen.

### 2.2 Verkehrsmodellierung und -prognose – Stand des Wissens

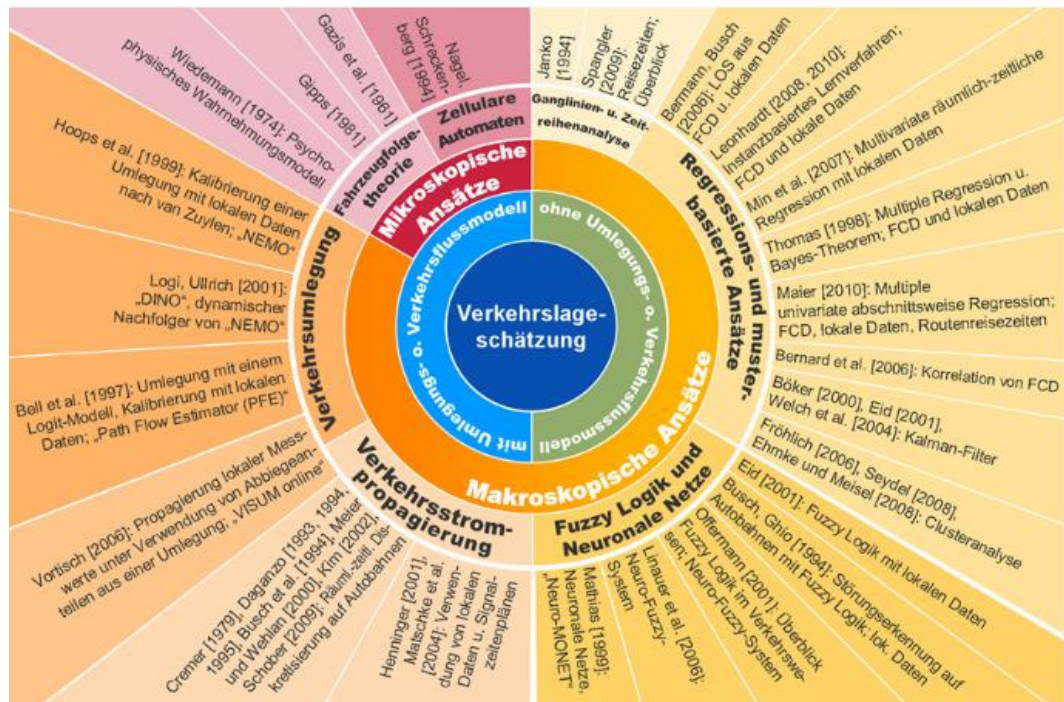
Modelle im Allgemeinen und damit auch Verkehrsmodelle bilden die Wirklichkeit vereinfacht nach. Verkehrsmodelle dienen

- der Vervollständigung eines Datenbestands um nicht erhobene oder nicht erhebbare Informationen – im Folgenden „Datenvervollständigung“ genannt – und/oder
- der Berechnung bisher nicht eingetretener Verkehrsszenarien, beispielsweise als Grundlage für kurz-, mittel- oder langfristig verkehrswirksame Massnahmen – im Folgenden „Prognose“ genannt.

Abhängig von der Zielsetzung sowie von verfügbaren Eingangsdaten zur Beschreibung von Verkehrsnachfrage und -angebot wurden in der Vergangenheit zahlreiche Modellansätze entwickelt und angewandt. Während Planungsmodelle insbesondere langfristige Entwicklung adressieren, die massgeblich durch strukturelle Veränderungen hervorgerufen werden, zielen Verkehrslageschätzer darauf, aktuelle Verkehrsinformationen oder kurzfristige Prognosen zur Verfügung zu stellen und damit für die verbesserte Auswahl von Massnahmen des Verkehrsmanagements eine belastbare Grundlage zu liefern.

Unter Beachtung der hier vorliegenden Projektziele wird nachfolgend der Stand des Wissens hinsichtlich der Verkehrslageschätzer aufgezeigt. In Maier [1, 2] wird ein Überblick über diesbezüglich entwickelte und eingesetzte Verkehrsmodelle gegeben (grafisch aufbereitet in Abb. 1). Dabei wird zunächst unterschieden nach Ansätzen, die ein Verkehrsfluss- oder -umlegungsmodell einsetzen oder es eben nicht tun. Die, die es nicht tun, durchsuchen historische Verkehrsdaten nach Mustern und Zusammenhängen, um damit aus unvollständigen aktuellen Daten einen vollständigen Datensatz zu schätzen oder kurzfristige Prognosen zu treffen. Vertreter dieser Ansätze sind in Abb. 1 auf der rechten Seite gruppiert. Zu ihnen zählen Anwendungen

- der Ganglinien- und Zeitreihenanalyse,
- der Regressions- und Musteranalyse und
- Ansätze basierend auf Fuzzy Logik und neuronalen Netzen.



**Abb. 1:** Zusammenstellung der gesichteten Verfahren zur Verkehrslageschätzung aus Maier [1, 2]

Ansätze, die kein Verkehrsfluss- oder -umlegungsmodell einsetzen, arbeiten ausschliesslich datengetrieben, weswegen sie häufig mit dem Begriff der Künstlichen Intelligenz in Verbindung gebracht werden. Vorteile solcher Ansätze sind der geringe Aufwand zur Kalibrierung und die Offenheit bezüglich jedweder Datenquelle. Nachteilig ist, dass sie ein über die Zeit im Wesentlichen unverändertes Verkehrsangebot voraussetzen. Sie sind nicht dafür geeignet, für gänzlich unbekannt verkehrliche Szenarien Prognosen zu erstellen. Damit sind sie als alleinstandende Lösung beispielsweise für Prognosen vor der Einrichtung von Arbeitsstellen, zur Schätzung der Verkehrslage bei einem Unfall z.B. mit Fahrstreifensperrungen, bei seltenen Wetterereignissen oder für Überlegungen zum Ausbau der Verkehrsinfrastruktur nicht geeignet. Ansätze ohne Verkehrsfluss- oder -umlegungsmodell verarbeiten und modellieren stets makroskopische Kenngrössen. Sie beschreiben also ausschliesslich die Eigenschaften von Verkehrsströmen und nicht die Bewegungen einzelner Fahrzeuge.

Zu Ansätzen zur Verkehrslageschätzung, die ein Verkehrsfluss- oder -umlegungsmodell verwenden (in Abb. 1 auf der linken Seite gruppiert), zählen

- mikroskopische Verkehrsflussmodelle, die die Bewegung einzelner, an definierten Stellen in einem Netz zu- und abfliessender Fahrzeuge nachbilden,
- Verkehrsumlegungsmodelle, die die Verkehrsnachfrage aus Quelle-Ziel-Matrizen zu Fahrten auf einem Wegenetz verarbeiten, so dass räumlich-zeitlich diskretisierte Verkehrsmengen sowie damit korrelierte Geschwindigkeiten und somit makroskopische Kenngrössen ausgegeben werden können, und
- makroskopische Verkehrsflussmodelle (in Abb. 1 unter Verkehrsstrompropagierung aufgeführt), die aus an definierten Stellen im Netz zu- und abfliessenden Fahrzeugmengen Verkehrsströme bilden und diese räumlich-zeitlich diskretisiert durchs Wegenetz propagieren, so dass modellierte Verkehrsstärken sowie streckenauslastungsabhängige Reisezeiten und davon abgeleitete Geschwindigkeiten ausgegeben werden können.

Mikroskopische Verkehrsflussmodelle bilden die Bewegungen einzelner Fahrzeuge in Zeitschritten, meist von maximal einer Sekunde, unter Verwendung von Fahrzeugfolgmodellen ab. Während zelluläre Automaten (Nagel, Schreckenberg [3], erfolgreich eingesetzt z.B. zur Verkehrsmodellierung auf dem Autobahnnetz in Nordrhein-Westfalen) neben der Zeit auch die Strecke in Segmente einteilen und damit diskretisieren,

bilden psycho-physische Ansätze die Strecke stetig ab, so dass auch Geschwindigkeiten stufenlos modelliert werden können (z.B. in VISSIM; Wiedemann [4]). Damit steigen die – auch bei zellularen Automaten nicht unwesentlichen – Aufwände zur Modellierung des Fahrverhaltens weiter an. Ebenso gestaltet sich die Netzmodellierung bei mikroskopischen Ansätzen zur Abbildung des Verkehrsangebots aufwändig, das sich aus dem Zusammenwirken des Netzmodells mit dem Fahrverhaltensmodell einschliesslich der jeweiligen Parametrierung ergibt. Weiterhin stellt die Routenwahl der simulierten Fahrzeuge hohe Anforderungen ans Verkehrsnachfragemodell.

Mikroskopische Verkehrsflussmodelle können Stochastizitäten abbilden. Je nach Anwendung kann dies als Vor- oder als Nachteil betrachtet werden. Da bei Online-Anwendungen häufig die Rechenzeit ein massgebliches Kriterium ist und stochastische Effekte bei zunehmender Berücksichtigung aktueller Daten zurückgehen, ist der Bedarf an der Abbildung stochastischer Effekte bei einer Verwendung zur Verkehrssteuerung gering.

Derzeit eingesetzte mikroskopische Verkehrsflussmodelle nutzen in der Regel räumlich und zeitlich aggregierte Daten, auch wenn als Datengrundlage Einzelfahrzeugdaten zur Verfügung stehen würden. Die zeitliche Verteilung der Fahrzeuge, die aus den Einzelfahrzeugdaten direkt hervorgeht, wird damit nicht verwendet und muss in der Prognose wieder berechnet werden. Die direkte Nutzung von Einzelfahrzeugdaten in Verkehrsflussmodellen ist noch nicht ausreichend erforscht.

Umlegungsmodelle greifen zur Abbildung der Verkehrsabläufe auf Quelle-Ziel-Matrizen zurück. Weil diese kaum dynamisch zur Verfügung gestellt werden können, sondern auf langfristigen Erhebungen aufbauen, werden Umlegungsmodelle vorwiegend zu Zwecken der Verkehrsplanung eingesetzt. Die Ansätze gemäss Bell et al. [5], Hoops et al. [6] sowie Logi und Ullrich [7] passen die Ergebnisse aus einer Umlegung mit aktuellen Verkehrsdaten an und erweitern ihre Anwendung so für Zwecke des Verkehrsmanagements. Vortisch [8] kombiniert Umlegungen für verschiedene Tagestypen, aus denen mithilfe aktueller Daten eine passende Umlegung ausgewählt wird, mit einem makroskopischen Verkehrsflussmodell.

Makroskopische Verkehrsflussmodelle verschieben Fahrzeugmengen in Zeitschritten von einem Streckenabschnitt im Netz zum nächsten und greifen dabei auf physikalische Modelle zurück. Nach Schnabel und Lohse [9] ist die Adaption der Kontinuumstheorie auf den Strassenverkehr nach Lighthill und Whitham [10] die bekannteste Anwendung. Auch das CTM nach Daganzo [11, 12, 13], unterteilt die Zeitachse wie die Strecke in Segmente. Sofern die Streckenkapazität im Modell dies zulässt, werden die Fahrzeuge aus einem Streckensegment in einem Zeitschritt um ein Streckensegment nach vorn bewegt, ebenso fließen an den Rändern des Netzmodells in einem Zeitschritt eine bestimmte Anzahl Fahrzeuge zu und ab. Maier [14, 15] zeigte in einer Vorab-Untersuchung zum Staugeschehen infolge mehrerer Arbeitsstellen in einem Autobahn-Netzausschnitt, dass mit einer geeigneten räumlich-zeitlichen Auflösung und auf der Grundlage lokaler Verkehrsdaten das Staugeschehen zutreffend mit einem CTM abgebildet werden kann. Am Modell konnte gezeigt werden, dass die Parametrierung der Streckenkapazität von erheblicher Bedeutung für die Qualität der Modellergebnisse ist. Das zeigte sich bei einer vergleichenden Verkehrsmengenuntersuchung vor und nach Einrichtung von Arbeitsstellen.

Nachfolgende Beiträge fassen Entwicklungen aus dem Zeitraum seit 2010 zusammen:

Bauer et al. [16] halten fest, dass sich ausgehend „von den Anforderungen von Verkehrsmanagement, Verkehrsteilnehmern und [Navigations-]Diensteanbietern an eine Kurzfristprognose [...] zeigt [...], dass für netzweite Anwendungen Verkehrsmodelle mit dynamischer Umlegung und Lernfähigkeit zielführend sind [...]. Aus technischer Sicht sind als Input-Daten eine Kombination von FCD, stationären Online-Zählern und Ereignismeldungen besonders vielversprechend. Das grösste Potenzial, als Eingangsdaten für eine verbesserte Berechnung der Verkehrslage und -prognose zu dienen, wird in FCD und in auf GPS-Ortung basierten Floating Phone Data gesehen.“

Alecsandru et al. [17] stellen fest, dass zahlreiche Forscher ein CTM für verschiedenste Zwecke einsetzen, obgleich Daganzo zunächst eher an die Modellierung einzelner Streckenabschnitte dachte. Auch bei weitaus breiteren Anwendungen bleiben die Grundprinzipien des Ansatzes aber unberührt. So verknüpfen Liz und Tao [18] in einen CTM Autobahnen und Streckenzüge sowie teilweise lichtsignalisierte Knotenpunkte. Papapanagiotou et al. [19] modellieren mit einer CTM die Anzahl von Halten und Wartezeiten in städtischen Netzen. Auch Rohde [20] erweitert ein CTM zur Anwendung an lichtsignalisierten Knotenpunkten. Dabei gelingt es ihm, einen sich an- und abmeldenden Bus am Knotenpunkt abzubilden.

In Diegmann [21] wird ein Modell aufgeführt, das historische stundenfeine Umlegungen mit aktuellen lokalen Daten koppelt, so dass netzweit aktuelle Verkehrsmengen modelliert werden können. Goves et al. [22] schätzen die Verkehrslage mit einem Neuronales Netz, ebenso Chan [23] und Olson et al. [24]. Rajendran und Ayyasamy [25] stellen einen muster- und regressionsbasierten Ansatz vor. Damit zeigt sich, dass auch Beiträge aus den Jahren zwischen 2010 und 2020 im Schema gemäss Abb. 1 ihren Platz finden.

Im Rahmen dieses Vorhabens kommt ein CTM und damit ein makroskopisches Verkehrsflussmodell zum Einsatz. Dafür spricht, dass ein CTM in Anbetracht der Projektziele ausreichend detaillierte Modellergebnisse liefern kann und dass es im Gegensatz zu den Ansätzen ohne Verkehrsfluss- und Umlegungsmodell dazu in der Lage ist, auch bei unbekanntem Szenarien hinsichtlich Verkehrsangebot und/oder Nachfrage belastbare Ergebnisse zu liefern. Zudem ist ein CTM weniger rechenaufwändig sowie weniger aufwendig und empfindlich bei der Kalibrierung als mikroskopische Verkehrsflussmodelle. Im Vergleich zu Umlegungsmodellen ermöglicht ein CTM die direktere Verarbeitung lokal erhobener Verkehrsdaten, so dass hinsichtlich der Verkehrsnachfragemodellierung weitaus weniger Modellannahmen zu treffen sind.

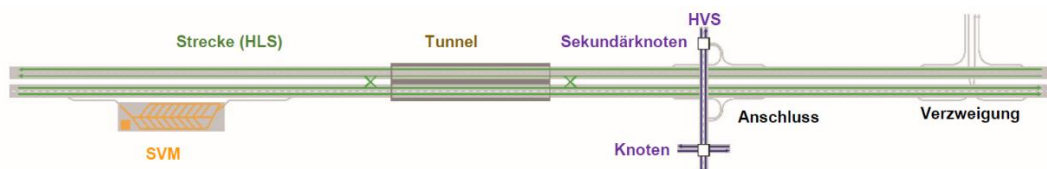
## 2.3 Verkehrsmanagement

Die Hauptfunktion des Verkehrsmanagements ist die koordinierte Beeinflussung des Verkehrs für einen sicheren und flüssigen Verkehrsablauf auf den Nationalstrassen. Dafür werden gemäss ASTRA Kopfrichtlinie Verkehrsmanagement auf Nationalstrassen [26] vier Grundfunktionen definiert:

- Das „**Informieren**“ der Strassennutzenden
- Das „**Lenken**“ des Verkehrsflusses
- Das „**Leiten**“ zur Beeinflussung des motorisierten Verkehrs
- Das „**Steuern**“ zur Beeinflussung der Verkehrsströme an Knoten, Tunneln sowie Zu- und Abfahrtsrampen

Das ASTRA grenzt dabei auf den Nationalstrassen verschiedene Netzelemente mit jeweils unterschiedlichen Anforderungen an die VM-Massnahmen ab (siehe Abb. 2) [26]:

- Strecke (Hochleistungsstrasse)
- Tunnel
- Verzweigungen, Anschlüsse und Sekundärknoten (Hauptverkehrsstrasse)
- Abstellplätze und Warteräume für den schweren Güterverkehr (SVM)



**Abb. 2:** Netzelemente auf dem Nationalstrassennetz gemäss Richtlinie 15003 [26]

Darüber hinaus lassen sich im Verkehrsmanagement unterschiedliche Beeinflussungstypen kategorisieren. Zum einen gibt es knotenpunktbeeinflussende Massnahmen, wie bspw. eine lichtsignalgesteuerte Rampendosierung. Damit ist es

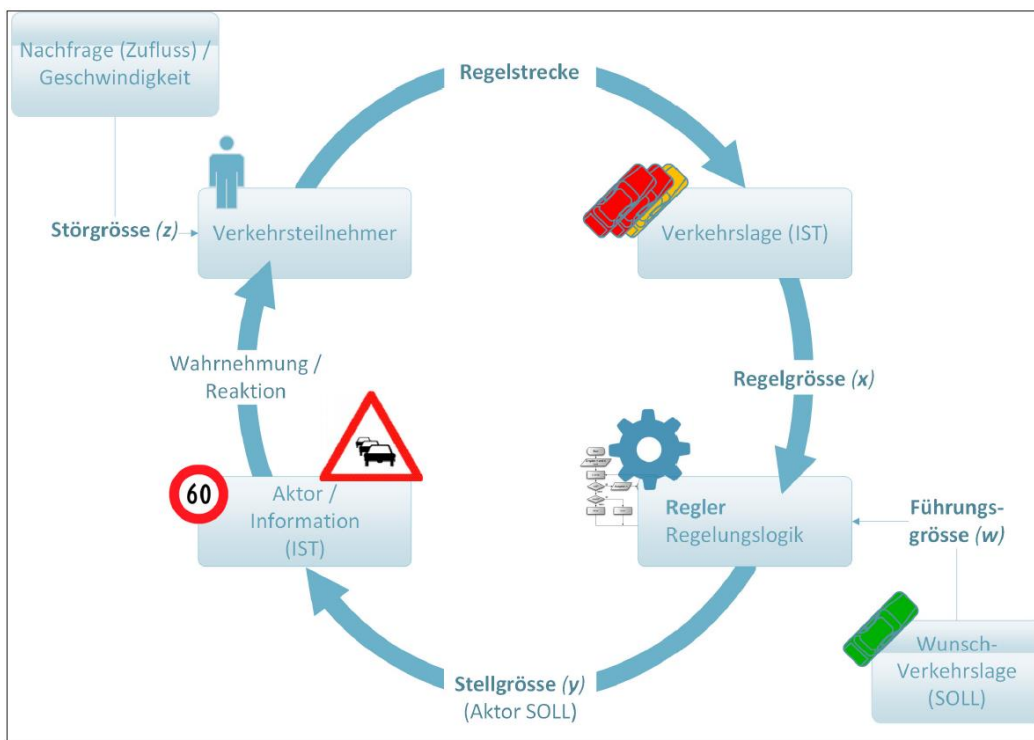


möglich bereits überlastete Streckenabschnitte gezielt zu entlasten und somit den Verkehrsfluss zu verbessern [26].

Eine weitere Möglichkeit zur kollektiven Beeinflussung des Strassenverkehrs ist die Verwendung einer streckenbezogenen Beeinflussungsanlage. Diese informiert den Fahrer mittels dynamischer Signalisation entlang eines Streckenabschnitts über potenzielle Gefahren oder Ereignisse und kann den Verkehr situationsabhängig durch Geschwindigkeitsbeschränkungen und Überholverbote beeinflussen. Eine exemplarische Massnahme für eine Verbesserung des Verkehrsflusses und zur Reduzierung des Unfallrisikos kann eine Geschwindigkeitsharmonisierung oder ein Überholverbot für Lastwagen vor einem stromabwärts überlasteten Streckenabschnitt sein [26, 28].

Der Hauptfokus in der vorliegenden Untersuchung liegt auf dem Einsatz von Netzbeeinflussungsanlagen (NBA) zur Umlenkung von Verkehrsströmen. Im Gegensatz zu den vorherigen Möglichkeiten kollektiver Beeinflussungsmöglichkeiten sind hier überregionale Faktoren auf Nationalstrassenebene zu berücksichtigen. Die Funktionsweise sowie die möglichen Umsetzungsmöglichkeiten werden im folgenden Kapitel näher beschrieben.

Das ASTRA hat darüber hinaus eine Richtlinie für die verkehrstechnische Regelungslogik und dessen Umsetzung innerhalb des Verkehrsmanagements in der Schweiz definiert [27] und den zugehörigen Regelkreis anhand folgender Darstellung veranschaulicht.



**Abb. 3:** Verkehrstechnischer Regelkreis gemäss ASTRA Richtlinie 15019 [27]

Neben den Betriebszuständen auf Verkehrsmanagementebene werden auch Betriebszustände auf Sicherheitsebene sowie zu „lokalen und allgemeinen Anordnungen“ behandelt. Grundsätzlich wird die Regelungslogik fahrtrichtungsgetrennt aufgebaut und ist stromaufwärts gerichtet. Jeder Aktor bzw. jeder Sensor ist einer fest vordefinierten Regelungslogik zugeordnet und funktioniert einzelaggregatbezogen. Dabei ist die Regelungslogik sowohl für eine (semi-) automatische als auch auf eine manuelle Verarbeitung ausgelegt. Die parametrierbaren Werte müssen dabei verkehrstechnisch übergreifend sowie lokal (z.B. querschnitts- bzw. gerätebezogen) unabhängig definierbar sein. Für den Fall, dass sich mehrere Betriebszustände überlagern wird über ein Abgleichverfahren ein resultierender Gesamtbetriebszustand ermittelt [27].

Für die Entwicklung des CTM zur Optimierung der Netzbeeinflussung ist die Berücksichtigung vorhandener Regelungslogiken essenziell. Mit den zusätzlichen Informationen aus dem CTM kann die Regelungslogik optimiert und das Hauptziel einer besseren Funktionsweise der Beeinflussungsanlagen erreicht werden. Verkehrsprognosen können durch die einzelnen Verkehrszellen des Modells räumlich genauer bestimmt werden, und mit den peripheren Verkehrszellen anderer Nationalstrassenabschnitte und angrenzender Hauptverkehrsstrassen lassen sich kapazitätsorientierte Alternativrouten bestimmen. Die Anwendbarkeit eines CTM in NBAs bietet demnach grosses Potenzial, da die nötigen Verkehrskenngrössen innerhalb der einzelnen Zellen modelliert werden können. Dadurch, dass die Daten aktuell und präzise sind, können mehr Informationen genauer übermittelt und verarbeitet werden. Das Ziel der Netzbeeinflussungsanlage, eine gleichmässige Auslastung der einzelnen Verkehrszellen sowohl auf dem lokalen Streckenabschnitt als auch auf den umliegenden Nationalstrassen zu erreichen, kann so mittels eines CTM berechnet werden. Dafür wird im Folgenden die Einsatzmöglichkeit der Netzbeeinflussung näher erläutert.

### 2.3.1 Netzbeeinflussung

„Netzbeeinflussungsanlagen (NBA) sind kollektive Leit- und Informationssysteme zur situationsabhängigen Beeinflussung des Strassenverkehrs. Mit ihnen können Verkehrsströme auf weniger ausgelastete oder verträglichere Routen verlagert werden.“ - [28]

In der Regel wird Netzbeeinflussung als Teil des dynamischen Verkehrsmanagements vor allem auf Nationalstrassen in Form von Wechseltextanzeigen (WTA) und Wechselwegweiser (WWW) umgesetzt und soll die Strassenverkehrsteilnehmer bei Ereignissen wie bspw. Überlastungen und Störungen (Baustellen, Unfälle, Tunnelsperrung, usw.) im nachfolgenden Streckenbereich auf Alternativrouten hinweisen. Im Allgemeinen liegt das Ziel einer NBA darin, die Auslastung des verfügbaren Strassennetzes möglichst gleichmässig auf umliegende Routen zu verteilen, um Störungen im Verkehrsablauf zu vermeiden. Daher sind bei der NBA für die Erreichung eines Netzoptimums immer mehrere Strecken auf Nationalstrassen beeinflusst. Innerhalb des Wirkbereiches der NBA werden für weiterführende Informationen zur Umleitungsursache und Alternativroute vor allem frei programmierbare WTA verwendet [28].

Als Einsatzbereiche kommen u.a. Streckenabschnitte mit hoher Überlastungs- und Unfallwahrscheinlichkeit sowie sich in Tunnelnähe befindliche Entscheidungspunkte in Frage. Dabei sind das Vorhandensein geeigneter Alternativrouten mit ausreichenden Kapazitäten und ein hoher Anteil an Durchgangsverkehr erforderlich. Die Standortwahl für eine NBA fällt grundsätzlich in Bereiche relevanter Entscheidungspunkte und erfordert eine konsistente Führung auf der Alternativroute [28].

Neben den verschiedenen Ausführungsarten der NBAs besitzen diese eine erforderliche technische Ausstattung. Diese setzt sich aus

- Sensoren zur Erfassung des Verkehrszustandes auf der Standard- und der Alternativroute,
- Wechselwegweiser (WWW) sowie WTA,
- Verkehrsrechner und Lokalsteuerung sowie
- Kommunikationseinrichtungen zwischen Sensoren, WWW sowie WTA und Steuerungssystemen in Lokalsteuerungen, des übergeordneten Systems und dem Verkehrsrechner.

zusammen. Die Steuerung der NBA kann dabei automatisiert oder manuell erfolgen [28].

Die Wirkung der NBA hängt von vielen Einflüssen ab (Grund der Umleitung, Länge und Art der Alternativroute, Fahrerkollektiv, Umfeldbedingungen, Erfahrungen der Fahrer, Informationen anderer Systeme, uvm.), daher lassen sich Wirkungsanalysen nur sehr aufwändig und situationsbezogen durchführen. Durch die Anwendung von NBAs lassen sich Staus zeitlich verkürzen oder verhindern, sodass bei freien Kapazitäten auf der

Alternativroute kollektive Reisezeitreduktionen/-rückgänge erzielbar sind. Reisezeitreduktionen/-rückgänge gehen bspw. bei einer günstigen Umwegsituation zur Umfahrung von Staus mit Kraftstoffeinsparungen einher [28].

Nach dem deutschen Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (heute BMVI) [28] ist der volkswirtschaftliche Nutzen von VM-Anlagen bereits bei Zeiträumen unter zehn Jahren erreicht, auch wenn die Längen der Alternativroute über 150 % der Normalroutenlänge liegt. Eine erforderliche Nutzungshäufigkeit wird dabei jedoch nicht genannt. Allerdings müssen die positiven Wirkungen mit den negativen Folgewirkungen (Verkehrsqualität, Emissionen) im nachgeordneten Netz abgewogen werden. Durch die zunehmenden Verfügbarkeiten anderer Informationssysteme (bspw. dynamische Navigationssysteme im Fahrzeug) sinkt die Bedeutung der NBA.

Für eine höhere Akzeptanz und Befolgung der Alternativroutenvorschläge der NBA gibt es entscheidende Erfolgsfaktoren. So wirken sich bspw.

- die Angaben zu Ursachen und Folgen (Staulänge, Reisezeitdifferenz),
- die Erkennbarkeit der Umleitungssituation (bspw. durch Blinklichter an den Wechseltextanzeigen) sowie
- ein zuverlässiger und fehlerfreier Betrieb positiv aus.

Dabei ist zu beachten, dass die Akzeptanz, bzw. die Befolgsrate bei zunehmender Komplexität der Alternativroute (ausgedrückt durch die Anzahl der Abbiegevorgänge) sinkt [28, 29].

### 2.3.2 Betrieb von Verkehrsmanagement in der Schweiz

Die operative Schaltzentrale des Verkehrsmanagements auf den Nationalstrassen in der Schweiz bilden die nationale VMZ-CH sowie die regionalen Verkehrsleitzentralen. Diese befassen sich mit der laufenden Analyse der aktuellen Verkehrslage und entscheiden über Auswahl und Anordnung zweckmässiger Verkehrsmanagementmassnahmen. Die einzelnen Aufgaben der Akteure für planbare Ereignisse wie Baustellen oder regelmässig auftretender Pendlerstau sowie unvorhersehbare Ereignisse werden von der VMZ-CH festgelegt [30].

Die Erarbeitung von VMPs erfolgt auf Bundesebene durch ASTRA mit Abstimmung der betroffenen Kantone. Dazu gehören ebenso die internationalen VMPs der angrenzenden Länder. Nicht hinzu gehören die kantonalen VMPs ausserhalb des Nationalstrassennetzes, dies liegen ausschliesslich in der Zuständigkeit der jeweiligen Kantone [30].

Zusätzlich zu den regulären VMPs werden bei Bedarf, wie etwa bei Baustellen, temporäre VMPs erstellt. In Baustellensituationen entscheidet die VMZ-CH, ob temporäre VMP nötig sind, wonach die ASTRA-Filialen diese erarbeiten und bei der ASTRA-Zentrale zur Genehmigung einreichen. Jeder VMP ist nach dem gleichen standardisierten Schema aufgebaut und beinhaltet die folgenden fünf Schritte [30]:

1. **Detektion:**  
Erfassung von Verkehrsdaten wie Kapazität und durchschnittlicher Tagesverkehr mit Ganglinien sowie Dokumentation der vorhandenen Detektionseinrichtungen.
2. **Ereigniserkennung**  
Typisierung häufig wiederkehrender Ereignisse und dessen Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen.
3. **Szenariowahl**  
Vordefinition von bis zu sechs Szenarien mit mehreren Eskalationsstufen, getrennt nach definierten Schwellwerten, räumlicher Ausdehnung, Ereignisdauer sowie resultierender Reisezeitverlust. Diese beziehen sich sowohl auf prognostizierte als auch auf bereits eingetretene Überlastungen. Weiterhin werden mögliche Alternativrouten für die entsprechenden Szenarien festgelegt.
4. **Massnahmenzuordnung**  
Festlegung der zweckmässigen Massnahmen zur Bewältigung des jeweiligen Ereignisses, dabei erfolgt die Zuordnung durch die Ereignisdauer, das Ausmass (z.B.

Staulänge), den Ereignisort sowie möglicher Alternativrouten. Die Operatoren der VMZ-CH können Verkehrsmanagement-Massnahmen innerhalb des Nationalstrassennetzes eigenständig anordnen. Es ist Rücksprache mit der von der Massnahme betroffenen Behörde (Ausland/kantonaler Polizei/VMZ-CH) je nach Gebietsbetroffenheit erforderlich.

#### 5. Aktion

Umsetzung der festgelegten Massnahmen sowie Regelung der Zuständigkeiten für die Durchführung der Aktion. Mittlerweile führt die VMZ-CH die meisten Aktionen selbst aus, dazu gehört u.a. das Schalten von WTAs und WWWs.

Dabei handelt es sich um einen iterativen Prozess, welcher solange wiederholt wird, bis ein optimierter Verkehrsfluss abhängig von den lokalen Verkehrszustände vorhanden ist.

### 2.3.3 Zusammenfassung

Im Rahmen des Verkehrsmanagements gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, den Verkehrsfluss zu optimieren. Unter Berücksichtigung der vom ASTRA definierten vier Grundfunktionen und Gliederung von Nationalstrasseninfrastruktur in Netzelemente lassen sich bedarfsgerechte Beeinflussungsmöglichkeiten anwenden. Dabei wird in diesem Projekt das Hauptaugenmerk auf die Netzbeeinflussung gelegt, für dessen erfolgreichen Einsatz bestimmte Voraussetzungen zu erfüllen sind. So sind präzise und aktuelle Daten aus dem relevanten Netzausschnitt inklusive der Umleitungsstrecken erforderlich. Mit dem CTM lassen sich die Verkehrsgrössen für die Streckensegmente zwischen den Messquerschnitten prognostizieren, womit sich mit dem vordefinierten Verkehrsmanagement abhängig von den vorliegenden Szenarien entsprechende Massnahmen für einen optimalen Verkehrsfluss treffen lassen.

## 2.4 Datengrundlage für die Modellierung von Verkehrsnachfrage und Netz

Zu Beginn des Projekts wurden Verkehrsdaten aus einem relevanten Netzausschnitt (vgl. Kapitel 2.5) des hochrangigen Netzes für die erste Jahreshälfte 2019 vom ASTRA an die Projektbeteiligten übergeben. Diese Daten enthalten erfasste Einzelfahrzeuge, die an lokalen Messstellen des ASTRA aufgezeichnet wurden. Die Messstellen liegen mitunter bis zu 5 km entfernt voneinander und zu den nächsten Anschlussstellen. Diese Daten bieten damit zeitlich hoch aufgelöste, jedoch räumlich lückenhafte Informationen über den aktuellen Verkehrszustand im Netz.

Die Datensätze von Januar 2019 bis Juni 2019 enthalten je Detektor und Tag eine Text-Datei, die folgende Informationen beinhaltet (siehe Abb. 4):

- Fortlaufende Nummer der detektierten Fahrzeuge
- Datum und Zeitstempel [TTMMJJ HHMM sec 1/100sec]
- Fahrsteifen Nummer des Fahrzeuges
- Fahrtrichtung
- Zeitlicher Brutto-Abstand (Fahrzeugfront-Fahrzeugfront) in [sec]
- Zeitlicher Netto-Abstand (Fahrzeugfront-Fahrzeugheck) in [sec]
- Geschwindigkeit [km/h]
- Fahrzeuglänge [cm]
- Fahrzeugklasse nach SWISS 10
- Chassishöhe

035254	200707	1017	45	48	000000	3	1	2.2	2.1	116	483	3	M
035255	200707	1017	46	09	000000	1	1	3.8	3.1	112	430	3	L
035256	200707	1017	46	25	000000	2	1	2.7	2.6	120	498	3	M
035257	200707	1017	46	99	000000	2	1	0.7	0.5	119	518	3	L
035258	200707	1017	51	21	000000	2	1	4.2	4.0	127	468	3	L
035259	200707	1017	51	27	000000	1	1	5.1	5.0	111	532	5	L
035260	200707	1017	53	60	000000	2	1	2.3	2.2	115	448	3	H
035261	200707	1017	54	07	000000	4	1	10.2	10.0	107	514	3	L
035262	200707	1017	55	00	000000	2	1	1.3	1.2	115	522	5	L
035263	200707	1017	54	90	000000	1	1	3.6	3.4	119	1157	8	H
035264	200707	1017	55	60	000000	4	1	1.5	1.3	104	399	3	L
035265	200707	1017	56	51	000000	2	1	1.5	1.3	114	536	5	M
035266	200707	1017	57	70	000000	2	1	1.1	1.0	113	515	3	L

-----	Chassishöhe (VL, L, M, H)
-----	Fahrzeugklasse nach SWISS 10:
1	Bus, Car
2	Motorrad
3	Personenwagen
4	Personenwagen mit Anhänger
5	Lieferwagen
6	Lieferwagen mit Anhänger
7	Lieferwagen mit Auflieger
8	Lastwagen
9	Lastenzug
10	Sattelzug

-----	Fahrzeuginnenlänge (cm)
-----	Geschwindigkeit (km/h)
-----	Abstand Fahrzeugfront-Fahrzeugheck (sec)
-----	Abstand Fahrzeugfront-Fahrzeugfront (sec)
-----	Fahrtrichtung (1=Normal 2=Gegenrichtung)
-----	Fahrstreifen-Nr.
-----	Reserve-Code
-----	Zeit (1/100 sec)
-----	Zeit (sec)
-----	Zeit (HHMM)
-----	Datum (TTMMJJ)
-----	Fortlaufende Nummerierung der Fahrzeuge

**Abb. 4:** Inhalt einer beispielhaften Text-Datei mit den Einzelfahrzeugdaten aus dem ASTRA Netz

Die Fahrzeugklassen nach SWISS 10 unterteilen sich in die folgenden zehn verschiedenen Fahrzeuggruppen:

1. Bus, Car
2. Motorrad
3. Personenwagen
4. Personenwagen mit Anhänger
5. Lieferwagen
6. Lieferwagen mit Anhänger
7. Lieferwagen mit Auflieger
8. Lastwagen
9. Lastenzug
10. Sattelzug

Zusätzlich zu den Datensätzen wurden zwei weitere Dokumente zur genaueren Spezifikation der Daten übergeben. Eine Konfigurationsdatei gibt Aufschluss über die genaue Konstellation der Nutzung der Fahrstreifen, welche dann in den Detektordaten durch eine Nummer wieder zu finden ist. Diese Fahrstreifennummern geben an, ob es sich z.B. um einen Normalfahrstreifen, einen Überholstreifen oder einen Pannestreifen handelt. Ausserdem findet man die Information über die Anzahl der Fahrstreifen gesamt und je Richtung in dieser Datei. Zusätzlich sind der Konfigurationsdatei die Koordinaten je Messstelle und der Messstellentyp zu entnehmen. In dem zweiten Dokument findet man die Korrespondenz zwischen den verschiedenen Nummerierungen der Messstellen, nach denen die Datensätze benannt sind, ebenso enthalten ist der Standort der Detektoren. Zur Hilfe der Verortung und Anordnung auf den Streckenabschnitten der Detektoren wird das online GIS-Tool des ASTRA genutzt.

Für die Erstellung des Netzmodells werden Informationen aus dem Online-Angebot des Bundesamts für Landestopografie swisstopo verwendet (<https://map.geo.admin.ch>, Thema «ASTRA») und mit Informationen aus weiteren, frei verfügbaren Kartendiensten ergänzt.

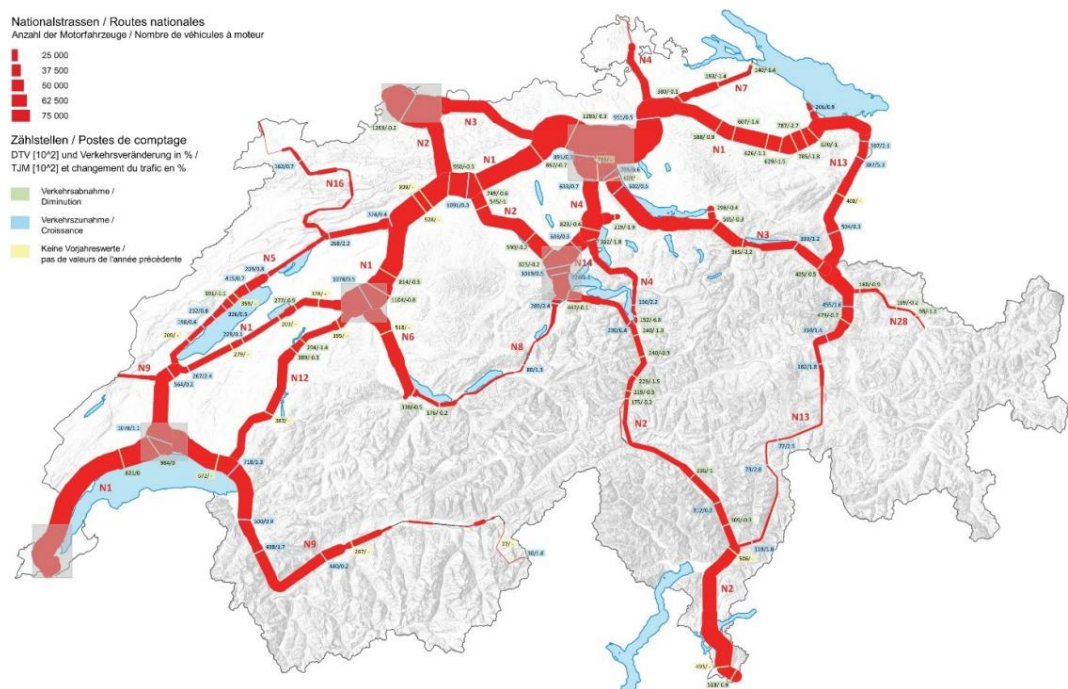
## 2.5 Auswahl des Testfelds

Für die Auswahl des Testfeldes wurden die Statistik zu Verkehrsentwicklung und Verkehrsfluss gemäss ASTRA [31] herangezogen. Der jährlich publizierte Bericht fasst die

wichtigsten Kenngrössen und deren Entwicklung auf den Schweizer Nationalstrassen zusammen. Im Fokus für die Auswahl eines Testfelds steht einerseits die Fahrleistung und Verkehrsbelastung der Strecken, andererseits die Informationen zum Stauaufkommen. In Abb. 5 ist der durchschnittliche Tagesverkehr durch die Dicke der Netzkanten visualisiert.

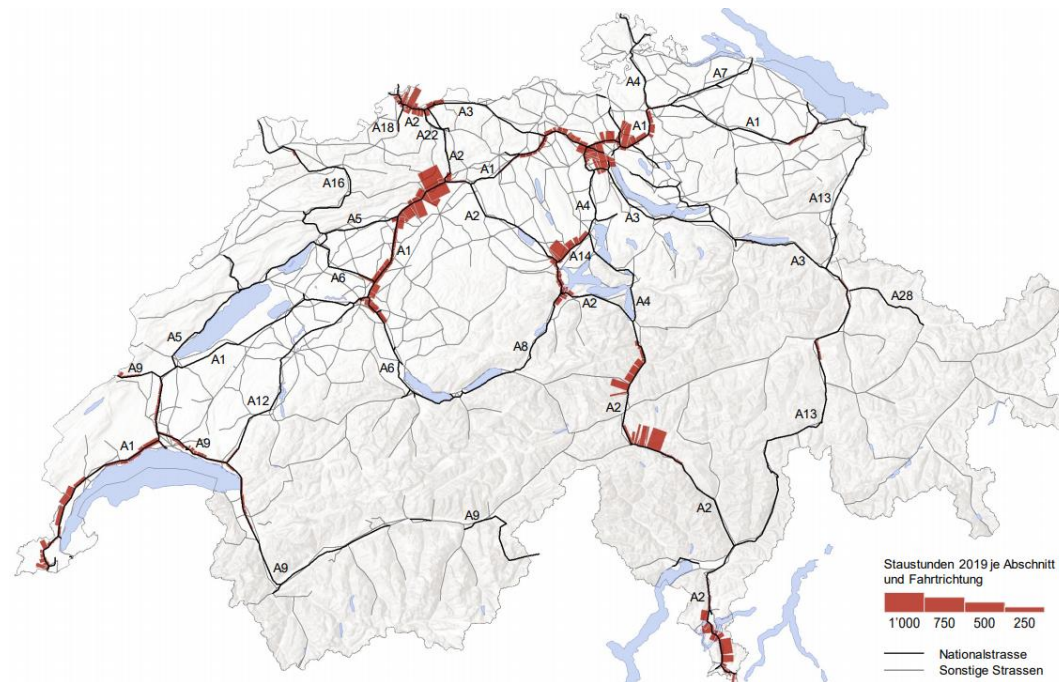
Der Blick auf die Karte in Abb. 5 mit den durchschnittlichen täglichen Verkehrsmengen im Nationalstrassennetz zeigt die regionalen Aufkommensschwerpunkte laut ASTRA-Statistik [31]:

- Region Zürich mit der A1 zwischen Aarau und der Verzweigung Birrfeld sowie weiter mit der A1/A3 zwischen den Verzweigungen Birrfeld und Limmattal und danach weiter auf der A1 die Nordumfahrung und der Streckenabschnitt zwischen der Verzweigung Zürich-Nord bis nach Winterthur. Dazu kommt die Westumfahrung (A3/A4) zwischen den Verzweigungen Limmattal, Zürich-West und Zürich-Süd.
- Region Basel mit der A2/A3 zwischen Landesgrenze (A2 Kleinhüningen resp. A3 Euro Airport) via Osttangente und weiter zwischen den Verzweigungen Gellert, Hagnau und Augst.
- Region Bern mit der A1 zwischen Weyermannshaus und Schönbühl sowie mit der A6 zwischen Rubigen und der Verzweigung Wankdorf.
- Region Luzern mit der A2 zwischen Emmen-Nord und Stans sowie mit der A14 zwischen den Verzweigungen Rütihof und Rotsee.
- Region Lémanique (Genève –Lausanne –Montreaux) mit der A1 zwischen Landesgrenze Genève (Bardonnex) und Lausanne (Villars-Ste-Croix) sowie mit der A9 zwischen Lausanne (Villars-Ste-Croix) und Bex.
- Im Tessin hebt sich die Region des Sottoceneri mit der A2 zwischen Lugano und Chiasso hervor.



**Abb. 5:** Belastungen im Gesamtnetz 2019 - Durchschnittlicher Tagesverkehr gemäss ASTRA-Statistik [31]

Auch Abb. 6 spiegelt diese Belastung der Aufkommensschwerpunkte mittels Stautunden wider. Dort ist auch zu erkennen, dass der Bereich um Zürich und um Oftringen deutlich mehr von Staus betroffen ist als andere Streckenabschnitte im Nationalstrassennetz.



**Abb. 6:** Stautunden im Gesamtnetz 2019 – Stautunden je Streckenabschnitt und Fahrtrichtung gemäss ASTRA Statistik [31]

Zusätzlich ist es für die Untersuchungen besonders interessant, wenn in dem Testfeld auch Bereiche enthalten sind, die mögliche Umfahrungen von Verkehrssituationen aufweisen können, wie es in Netzmaschen der Fall ist. Als hoch belastete und daher interessante Netzmasche hat sich in den Untersuchungen der Bereich Oftringen-Zürich-Luzern (A1, A3, A2, A4, A14) hervorgehoben.

Mit Blick auf die Stautunden der einzelnen Regionen (siehe Abb. 6) ist die Region um Zürich ein verkehrlich sehr stark belasteter Bereich. Eine Anbindung des Streckenabschnitts der A1 Richtung Winterthur ist aufgrund der hohen Stautundenwerte sinnvoll. Auch um Basel (siehe Abb. 6) ist das Verkehrsaufkommen sehr hoch und es kommt zu vielen Stautunden. Hier wäre ein Streckenabschnitt der A3 um Basel bis zum Flughafen Basel, wie in Abb. 6 zu sehen, noch mit an das Netz mit anzubinden. Auch die Verteilung der Stautunden um Luzern ist ebenso erhöht im Vergleich zum restlichen Netz. Auch hier ist es interessant, das Stück der A2 und A8 bis Alpnach-Nord mit an das Netzmodell mit anzuschliessen, da sich hier die Stautunden neben der A14 noch deutlich häufen.

Damit wird der dargestellte Bereich in Abb. 7 als der zu untersuchende Netz-Ausschnitt festgelegt. Es sind die Aufkommensschwerpunkte im Hinblick auf den durchschnittlichen Tagesverkehr und viele Bereiche mit Häufungen der Stautunden enthalten. Ausserdem beinhaltet der Ausschnitt eine Netzmasche, in der auch Umfahrungen und Szenarien durch Verkehrsmanagementpläne existieren. In Tab. 1 sind die Streckenabschnitte unterteilt dargestellt und mit deren einfacher Länge aufgeführt.

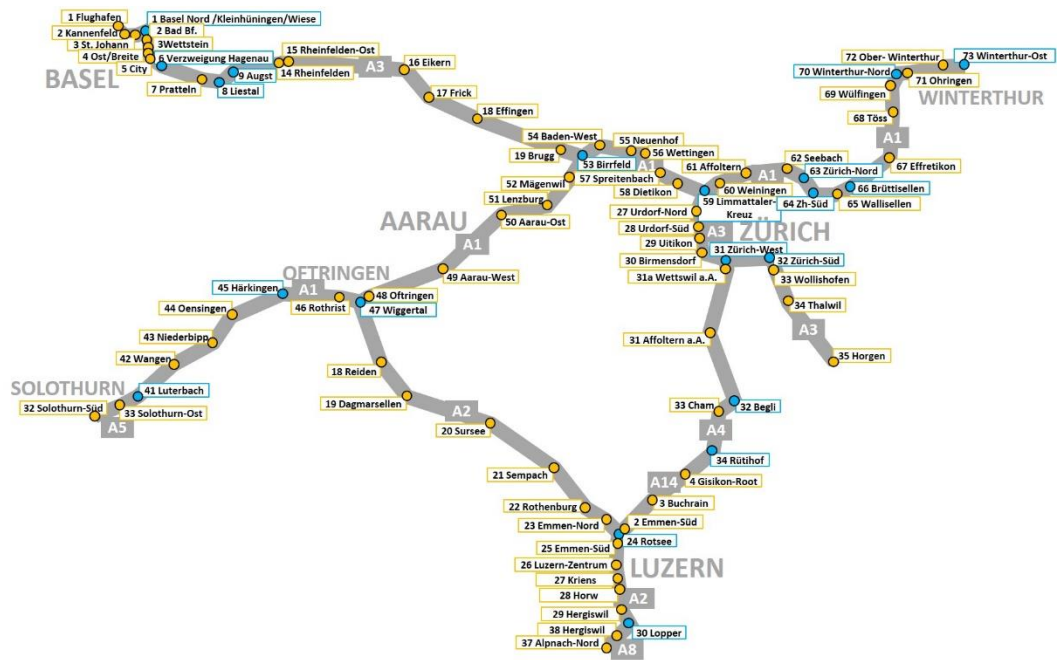


Abb. 7: Karte mit Netzausschnitt der Untersuchung

Tab. 1: Streckencharakteristik Testfeld

Abschnitt Nr.	Strecke	Nationalstrasse	Länge
1	Basel-Flughafen Birrfeld	A3	64 km
2	Solothurn-Süd Winterthur-Ost	A1 und A5	113 km
3	Oftringen Alpnach-Nord	A2 und A8	59 km
4	Limmattaler-Kreuz Horgen	A3	27 km
5	Zürich-West Rotsee	A4 und A14	40 km



## 3 Erstellung des Netzmodells

### 3.1 Strecken

Das Netzmodell, das als Grundlage für das CTM in Netzen zu erstellen ist, setzt sich zunächst zusammen aus fahrtrichtungsbezogenen Strecken, die jeweils begrenzt werden durch Autobahnknotenpunkte oder die Ränder des Netzausschnitts. Im Beispiel gemäss Abb. 8 sind die erforderlichen Eingaben für die Strecke zwischen dem Autobahnkreuz Limmattal und dem Autobahndreieck Zürich-West in einer Excel-Tabelle zu erkennen:

- Erste Zeile mit der ID (s.u. und vgl. Kapitel 3.2) und Bezeichnung der Strecke
- Zweite Zeile mit den Namen der Knotenpunkte bzw. der Anschlussstelle(n) im Zuge der Strecke, die jeweils einen Streckenabschnitt begrenzen
- Dritte Zeile mit einer Streckenkilometrierung, die bei Fahrtrichtung entgegen der Kilometrierung mit einem negativen Vorzeichen zu versehen ist
- Vierte und fünfte Zeile mit einer Vorerst-Eingabe der Streckenkapazität und mit der Anzahl der Fahrstreifen im Streckenabschnitt zwischen den Anschlussstellen in derselben und in der darauffolgenden Spalte, die gemäss Kapitel 5 später genauer und über die Streckenlänge differenzierter bestimmt werden kann
- Zeilen sechs bis acht mit IDs
  - für den Zufluss zum Streckenabschnitt (ID des nachfolgenden Streckenabschnitts gemäss Zeile 7 um 1000 erhöht, bei Kilometrierung entgegen der Fahrtrichtung mit negativem Betrag),
  - für den Streckenabschnitt selbst (entspricht der Nummer der flussaufwärtigen Anschlussstelle, in der Regel zusammengesetzt aus Autobahnnummer und Nummer der Anschlussstelle) und
  - für den Abfluss am Ende des Streckenabschnitts (ID des nachfolgenden Streckenabschnitts um 2000 erhöht, bei Kilometrierung entgegen der Fahrtrichtung mit negativem Betrag)
 (bei Fahrtrichtung entgegen der Kilometrierung jeweils mit negativem Vorzeichen)

7a	A3 Limmattaler Kreuz - AD Zh-West					
AS-Name	AK Limmatt	AS Urdorf-N	AS Urdorf-S	AS Uitikon	AS Birnen	AD ZH-West
Strecken-km	0.0	1.8	4.3	5.6	7.2	9.6
Kapazität	4100	4100	4100	4100	5900	5900
Anz. Fahrstreifen	2	2	2	2	3	3
Zufluss	1003.059	1003.027	1003.028	1003.029	1003.030	1003.031
BAB.AS-Nummer	3.059	3.027	3.028	3.029	3.030	
Abfluss	2003.027	2003.028	2003.029	2003.030	2003.031	

**Abb. 8:** Beispiel für die Modellierung eines Streckenzugs im Netzmodell

Die Reihenfolge bei der Streckenmodellierung wird so festgelegt, dass eine Strecke erst dann modelliert wird, wenn die flussabwärts verknüpften Strecken bereits modelliert sind. Folglich wird mit den Strecken begonnen, die flussabwärts an die Ränder des betrachteten Netzausschnitts angrenzen. Anschliessend wird flussaufwärts Strecke für Strecke modelliert und in der Strecken-ID entsprechend nummeriert (im Beispiel gemäss Abb. 8] Ziffer «7» links oben, Buchstabe «a» gemäss Kapitel 3.2). Netzmaschen sind an einem geeigneten Punkt zu trennen. Im vorliegenden Netzausschnitt existiert eine Netzmasche, die an der Anschlussstelle Dagmersellen getrennt wird. Das Schliessen dieser Masche im Verkehrsflussmodell ist Gegenstand von Kapitel 6.2

## 3.2 Knotenpunkte

Autobahnknotenpunkte, an denen Strecken verbunden werden, werden aus zahlreichen Strecken zusammengesetzt, die an maximal dreiarmligen Teilknotenpunkten verknüpft werden. Da Strecken richtungsbezogen sind, gibt es nur drei Arten von Teilknotenpunkten:

- Teilknotenpunkte mit zwei Zuflüssen und einem Abfluss
- Teilknotenpunkte mit einem Zufluss und zwei Abflüssen
- Teilknotenpunkte mit einem Zufluss und einem Abfluss

An Knotenpunkten werden zu jeder Strecke mit einer Nummer gemäss Kapitel 3.1 (jede dieser Strecken ist in Abb. 9] farblich kodiert und beispielhaft nummeriert) mehrere Strecken im Kontext des jeweiligen Knotenpunkts im Netzmodell angelegt, so dass alle Verknüpfungen abgebildet werden können. Abb. 9 zeigt die Strecken in einem Knotenpunkt und ihre Verknüpfungen. Die zusätzlich angelegten Strecken erhalten anhand der Buchstaben a-e sowie mit «/» und «//» Benennungen, die zusammen mit der Nummerierung gemäss Kapitel 3.1 die Strecken-ID ergeben.

Die Verknüpfungen werden in einer Tabelle mit Angabe der Teilknotenpunktart und der IDs beteiligter Strecken modelliert.

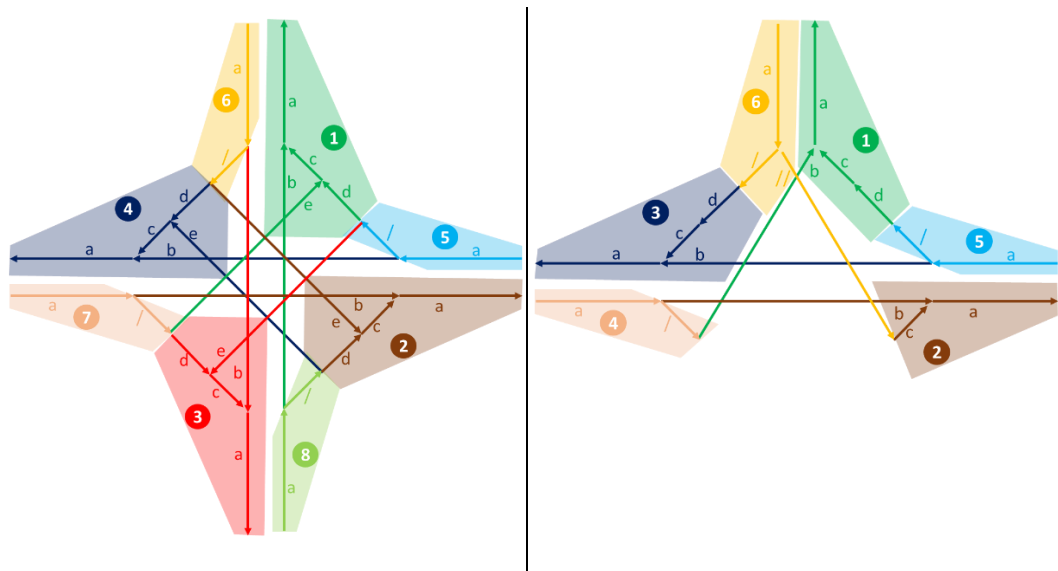


Abb. 9: Modellierung von Knotenpunkten (Autobahnkreuz links, Autobahndreieck rechts)

## 3.3 Detektion

Die Tabelle aus der Streckenmodellierung (vgl. Kapitel 3.1), bei der alle zehn Zeilen (davon sind aktuell 8 inhaltlich belegt) eine neue Strecke beschrieben wird, wird so umgeschrieben, dass Zuflüsse, Streckenabschnitte und Abflüsse für alle Strecken untereinanderstehen (vgl. Abb. 10). Strecken werden dabei jeweils getrennt durch eine «-1». Zur Hinterlegung lokaler Messstellen im Netzmodell wird diese umgeschriebene Tabelle aus der Streckenmodellierung um einige Spalten ergänzt:

- Eine Spalte für die ID der Messstelle auf einer Zuflussrampe, auf einem Streckenabschnitt oder auf einer Abflussrampe (wenn keine Messstelle vorhanden ist, wird ein «X» verzeichnet)
- In den darauffolgenden Spalten die Referenzierung der Fahrstreifennummern, die den Streckenquerschnitt bzw. die Rampe betreffen (Quelle: übergebene Datei „2019 03 28 Import old BD Access\_ZS config.xlsx“)

Dieser Arbeitsschritt ist Voraussetzung dafür, dass relevanten Daten aus den übergebenen

Detektionsprotokollen bei der Verkehrsnachfragemodellierung (vgl. Kapitel 4) gezielt aufgerufen, verarbeitet und zugeordnet werden können.

	-1 X			
7a_A3 Limmattaler Kreuz - AC	1003.059 X			
	3.059 CH570	1	2	3
	2003.027 CH586	1	2	
AS Urdorf-Nord	1003.027 X			
	3.027 CH194	7	1	2
	2003.028 CH561	2		
AS Urdorf-Süd	1003.028 CH561	1		
	3.028 CH301	2	3	4
	2003.029 X			
AS Uitikon	1003.029 X			
	3.029 CH562	6	5	4
	2003.03 CH563	2	3	
AS Birmensdorf	1003.03 CH563	1		
	3.03 CH565	6	5	4
AD ZH-West	2003.031 X			
	-1 X			

**Abb. 10:** Beispiel für einen Streckenabschnitt mit verzeichneter Detektion

### 3.4 Generierung des Netzmodells

Für das später eingesetzte CTM zur Nachbildung des Verkehrsflusses müssen die Strecken in Zellen unterteilt werden. Die Länge dieser Zellen ist frei wählbar, gilt aber [zunächst] einheitlich für den gesamten modellierten Netzausschnitt. Die Wahl der Zellenlänge ergibt sich aus der Abwägung modellierter Zeitintervalle und Fahrzeuggeschwindigkeiten (vgl. Kapitel 5).

Bei der Unterteilung der Zellen werden mit der Streckenkilometrierung sowie Vorerst-Eingaben der Streckenkapazität und der Fahrstreifenanzahl Informationen aus der Streckenmodellierung (Kapitel 3.1) herangezogen. Die Anzahl der Zellen zwischen zwei Anschlussstellen ergibt sich aus der ganzzahligen Rundung des Quotienten aus Streckenkilometerangaben und gewählter Zellenlänge. Damit ergibt sich für die Beispielstrecke aus Abb. 8 der Tabellenauszug gemäss Abb. 11 im Netzmodell für das CTM mit einer gewählten Zellenlänge von 250 m. Jede Zeile steht dabei für eine Zelle.

-1	-1	-1	-1	-1
3.059	0	4100	4100	2
0	0.25	4100	4100	2
0	0.5	4100	4100	2
0	0.75	4100	4100	2
0	1	4100	4100	2
0	1.25	4100	4100	2
0	1.5	4100	4100	2
3.027	1.75	4100	4100	2
0	2	4100	4100	2
0	2.25	4100	4100	2
0	2.5	4100	4100	2
0	2.75	4100	4100	2
0	3	4100	4100	2
0	3.25	4100	4100	2
0	3.5	4100	4100	2
0	3.75	4100	4100	2
0	4	4100	4100	2
3.028	4.25	4100	4100	2
0	4.5	4100	4100	2
0	4.75	4100	4100	2
0	5	4100	4100	2
0	5.25	4100	4100	2
3.029	5.5	4100	4100	2
0	5.75	4100	4100	2
0	6	4100	4100	2
0	6.25	4100	4100	2
0	6.5	4100	4100	2
0	6.75	4100	4100	2
0	7	4100	4100	2
3.03	7.25	5900	5900	3
0	7.5	5900	5900	3
0	7.75	5900	5900	3
0	8	5900	5900	3
0	8.25	5900	5900	3
0	8.5	5900	5900	3
0	8.75	5900	5900	3
0	9	5900	5900	3
0	9.25	5900	5900	3
-1	-1	-1	-1	-1

**Abb. 11:** Darstellung einer Strecke fürs CTM

Die Tabellen für verschiedene Strecken werden untereinander geschrieben, erneut abgetrennt durch Einträge «-1». Folgende Informationen werden dabei zusammengestellt:

- Spalte 1 – sofern am Zellenanfang eine Anschlussstelle verortet ist: ID der Anschlussstelle; ist keine Anschlussstelle verortet, so steht hier «0»
- Spalte 2 – Streckenkilometer zu Beginn der Zelle
- Spalten 3 und 4 – Streckenkapazität in der Vorerst-Festlegung; die Information wird doppelt vorgehalten, damit die Streckenkapazität während einer Verkehrsflussmodellierung variiert werden kann, der ursprüngliche Wert aber hinterlegt bleibt und später wieder aufgerufen werden kann
- Spalte 5 – Fahrstreifenanzahl in der Vorerst-Festlegung

Detaillierte Festlegungen von Streckenkapazitäten und Fahrstreifenanzahl können in dieser Tabelle differenziert nach den Zellen hinterlegt werden.

Ebenso fürs CTM benötigt werden weiterhin

- die Tabelle mit Informationen zur Verknüpfung der Strecken (vgl. Kapitel 3.2) und
- die Tabelle gemäss Abb. 10 (Kapitel 3.3) mit Aufführung der Streckenabschnitte, Zu- und Abflüsse sowie Informationen zu lokalen Messstellen.

## 4 Verkehrsnachfragemodellierung

Präambel: Dieses Kapitel beschreibt, wie durch Zu- und Abflüsse an den Netzrändern das Verkehrsflussmodell gemäss Kapitel 6 mit einer Verkehrsnachfrage versorgt wird. Unter „Verkehrsnachfragemodellierung“ wird hier die Aufbereitung verfügbarer Messdaten zu diesen Zu- und Abflüssen verstanden. Damit unterscheiden sich die methodischen Schritte zur Abbildung der Verkehrsnachfrage massgeblich von denen, wie sie bei der Verkehrsnachfragemodellierung im Rahmen von Planungsmodellen zur Anwendung kommen.

Bei der späteren Verkehrsflussmodellierung sollen im Netzmodell realitätsnahe Verkehrsverhältnisse simuliert werden. Als Anhaltspunkt dafür gelten die Verkehrsmengen, die sich anhand der verfügbaren Einzelfahrzeugdaten rekonstruieren lassen. Sie beziehen sich in aller Regel auf einen Messquerschnitt im Zuge eines Streckenabschnitts zwischen zwei Anschlussstellen, zwischen einer Anschlussstelle und einem Knotenpunkt oder zwischen zwei Knotenpunkten. Es liegen Einzelfahrzeugdaten von zahlreichen, aber nicht von allen Streckenabschnitten im untersuchten Netzausschnitt vor.

Die Verkehrsnachfrage wird in der vorgesehenen Modellumgebung durch Zu- und Abflüsse an den Rändern initialisiert. Ränder sind zum einen Autobahnquerschnitte, die das Netzmodell begrenzen, zum anderen die Zu- und Abflussrampen aller Anschlussstellen im Netzausschnitt. Solange die Verkehrssimulation frei fliessenden Verkehr errechnet, können die Verkehrsmengen streckenabschnittsbezogen lediglich mit einem Zu- oder Abfluss zwischen zwei Streckenabschnitten, der die Verkehrsmengenunterschiede zwischen beiden Streckenabschnitten ausgleicht (Bilanzkorrektur), korrekt dargestellt werden. Sobald jedoch Staus modelliert werden, ist diese Form der Verkehrsnachfragemodellierung zu einfach: So wirken sich beispielsweise Abflüsse an Anschlussstellen, über die sich ein Stau erstreckt, unmittelbar auf die Staulänge aus. Diese Abflüsse würden aber bei einer ausschliesslichen Bilanzkorrektur an den Anschlussstellen unterschätzt.

In der Konsequenz sind die Zu- und Abflüsse an den Anschlussstellen aus den übergebenen Einzelfahrzeugdaten bestmöglich anzunähern. Wo streckenabschnittsbezogene Verkehrsdaten fehlen, bedarf es ausserdem einer plausiblen Abschätzung dort anliegender Verkehrsmengen.

Damit ergeben sich für die Verkehrsnachfragemodellierung folgende Arbeitsschritte:

1. Analyse verfügbarer Dateien
2. Datenbereinigung
3. Zeitliche Aggregation der Verkehrsdaten
4. Wo Verkehrsdaten fehlen: Modellierung streckenabschnittsbezogener Verkehrsmengen
5. Modellierung von Zu- und Abflüssen
6. Abhängig vom Anwendungsfall: Ermittlung der Verkehrsdaten für einen bestimmten Simulationsfall, z.B. für eine Durchschnittswoche

### 4.1 Analyse verfügbarer Dateien

Zunächst wird überprüft, für welche der 88 Messquerschnitte im Netzausschnitt (nicht fahrtrichtungsbezogen, teilweise incl. Rampen) an welchen der 181 Tage von Januar bis Juni 2019 Dateien vorliegen.

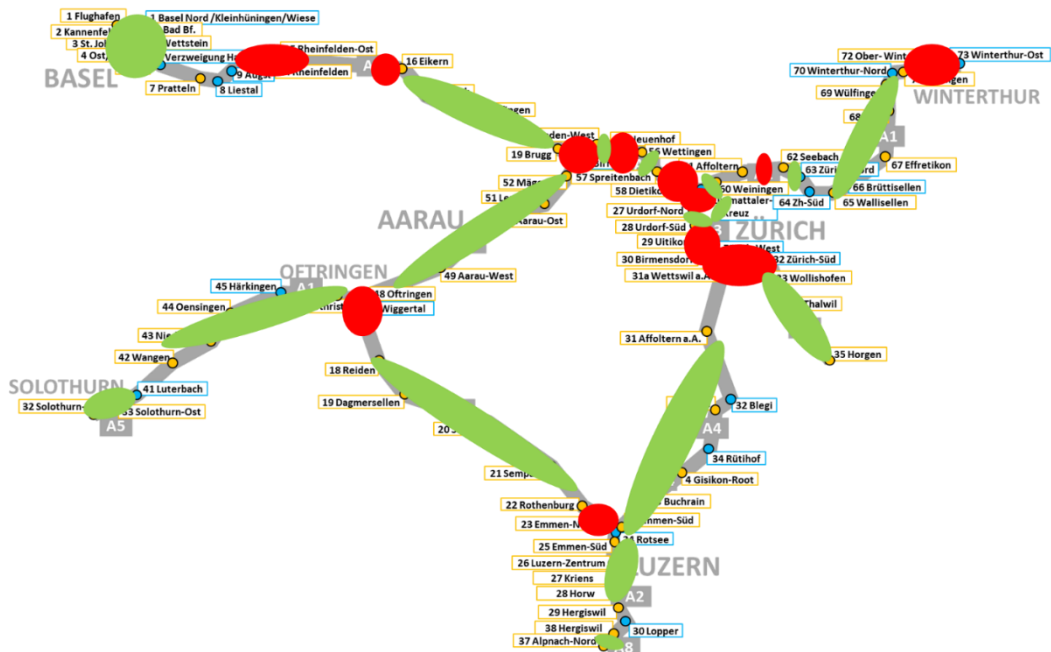
In Abb. 12 ist erkennbar, für welche Bereiche im Testfeld Daten vorliegen und wo dies nicht der Fall ist. Insbesondere zu folgenden existieren keine Verkehrsdaten:

- die A1 zwischen dem Autobahndreieck Birrfeld und dem Autobahnkreuz Limmattal,

- die A3 zwischen dem Autobahnkreuz Limmattal und dem Autobahndreieck Zürich-Süd und
- Bereiche der Knotenpunkte Wiggertal, Birrfeld und Limmattal. (Zählstellen sind im Schweizer Nationalstrassennetz weit überwiegend auf den Stammstrecken und damit nicht auf Rampen verortet.)

Der Abschnitt der A2 zwischen Härkingen und Augst wird aufgrund der Datenlage nicht berücksichtigt.

In den genannten Bereichen von A1 und A3 treten gemäss Abb. 6 Staus auf. Das wird erwähnt, weil die Bewertung des Verkehrsflussmodells im Wesentlichen an der zutreffenden Abbildung von Staus erfolgt. Diese Abbildung wird mit einer lückenhaften Datengrundlage erschwert, was die Bewertungsmöglichkeiten relativiert. Ohne Daten von den Rampen der Knotenpunkte leidet die Modellierung der Verkehrsflüsse an den Verknüpfungen zwischen den Streckenabschnitten im Netz. Auch wenn das zutreffende Ergebnisse des Verkehrsflussmodells nicht ausschliesst, so ist zumindest zu erwarten, dass dadurch die Modellierung der Verkehrsnachfrage nicht unerheblich erschwert wird.



**Abb. 12:** Bereiche im Testfeld, für die Verkehrsdaten vorliegen (grün) bzw. nicht vorliegen (rot)

In Bereichen, die in Abb. 12 weder grün noch rot eingefärbt sind, existieren keine Messquerschnitte.

## 4.2 Datenbereinigung

Bei Sichtung der Einzelfahrzeugdaten (Abb. 4) und bei ersten Versuchen, sie automatisiert einzulesen und aufzubereiten, zeigte sich, dass die log-Dateien um fehlerhafte Datensätze bereinigt werden müssen.

Die bereinigten Einzelfahrzeugdaten werden in jeweils tages- und messquerschnittsbezogenen Dateien abgelegt.

## 4.3 Zeitliche Aggregation der Verkehrsdaten

Die mikroskopischen Einzelfahrzeugdaten werden zu makroskopischen aggregierten Verkehrsdaten verarbeitet und in wochen- und querschnittsbezogenen Dateien abgelegt. Ab diesem Verarbeitungsschritt haben Querschnitte einen Richtungsbezug, auch Messstellen auf Rampen werden als eigener Querschnitt betrachtet. Dies erfolgt unter

Verwendung der Fahrstreifennummern, die bei der Modellierung der Detektion gemäss Kapitel 3.3 hinterlegt wurden. Im Netzausschnitt existieren 220 solcher Querschnitte.

Die Länge des Aggregierungsintervalls kann frei gewählt werden. Festlegungen dabei sind in Abwägung mit modellierten Fahrgeschwindigkeiten und Anforderungen an die räumliche Auflösung im CTM zu treffen (vgl. Kapitel 6). Folgende Kenngrössen werden dabei ermittelt:

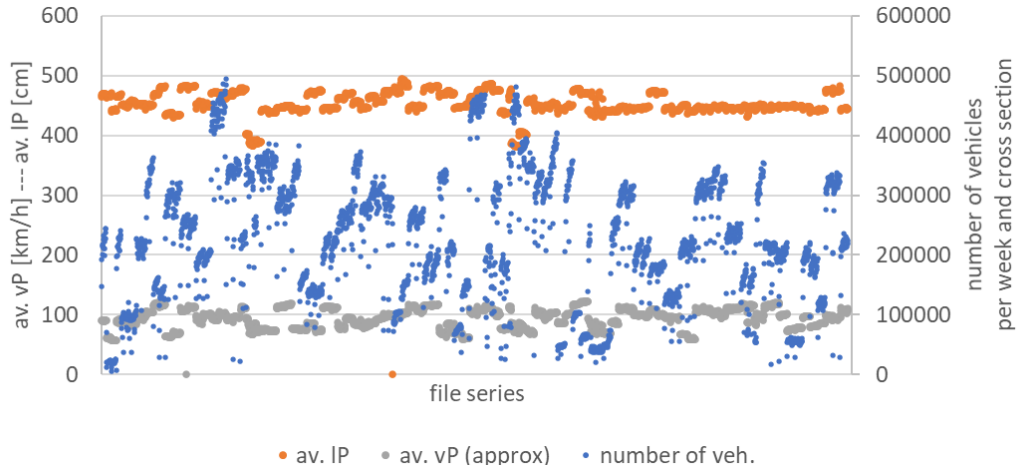
- Anfangszeit des Intervalls als Gleitkommazahl
- PW-Verkehrsstärke  $q_P$  [Fz/h]
- LW-Verkehrsstärke  $q_L$  [Fz/h]
- Bemessungsverkehrsstärke  $q_B$  [Fz/h] – ein LW geht dabei mit dem Gewicht 1,5 ein
- PW-Geschwindigkeit [km/h] – ermittelt aus den fünf PW vor Intervallende

Bei der Aggregation wird ein weiterer Filter zum Verwerfen von Einträgen mit ungeeigneten Datumsinformation verwendet.

Zusätzlich zu den aggregierten Daten wird wochen- und querschnittsbezogen eine Bilddatei mit dem Verlauf der PW-Geschwindigkeit abgelegt. Die Dateien sollen bei der Festlegung von Kapazitäten zur Modellierung des Verkehrsangebots helfen, räumlich-zeitliche Bereiche mit Störungen des Verkehrsflusses schnell ausfindig zu machen.

Ebenso werden folgende wochen- und querschnittsbezogenen Informationen insbesondere zu Zwecken der Qualitätssicherung protokolliert:

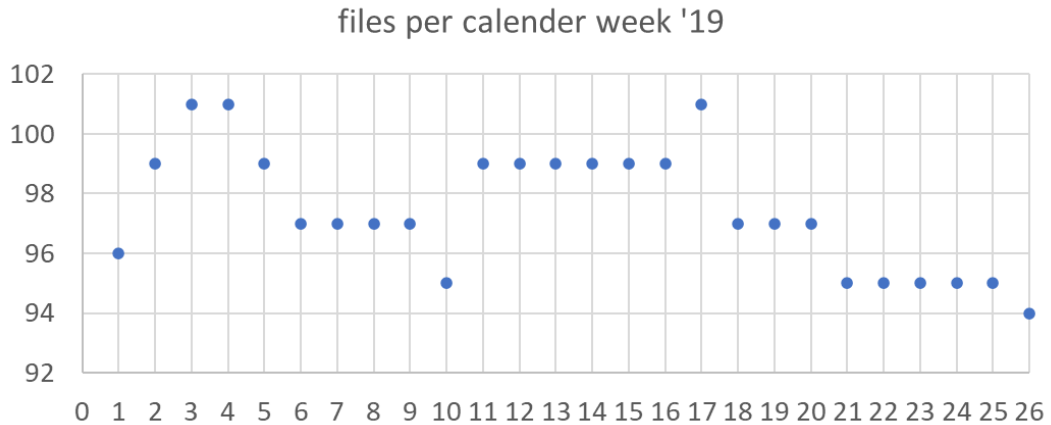
- PW-Anzahl
- LW-Anzahl
- Fahrzeuganzahl (number of veh.)
- Mittlere PW-Länge (av. IP)
- Mittlere PW-Geschwindigkeit (av. vP)
- Anzahl bei der Aggregation verworfener Zeilen



**Abb. 13:** Wochen- und messquerschnittsbezogene Kenngrössen zur Qualitätssicherung

Für 220 Querschnitte in 26 Kalenderwochen von Januar bis Juni 2019 können 5.720 Dateien, wie sie zuvor beschrieben wurden, mit aggregierten Verkehrsdaten angelegt werden. Die Daten («file series» in Abb. 13) sind sortiert nach Querschnitt und Kalenderwochen, die so entstehenden Cluster können zur groben Qualitätssicherung herangezogen werden.

Für spätere Simulationsläufe liefern insbesondere jene Kalenderwochen eine gute Grundlage, in denen vergleichsweise viele Daten vorliegen (vgl. Abb. 14) und in denen weder Ferien- noch Feiertage liegen. Nach Abzug der Wochen mit Feiertagen und Ferien (Kalenderwochen 2, 5, 11, 12, 16 und 17) erscheinen von den Kalenderwochen mit guter Datenlage die Kalenderwochen 3, 4, 13, 14 und 15 dafür zunächst am besten geeignet.



**Abb. 14:** Anzahl verfügbarer kalenderwochen- und querschnittbezogener Dateien

## 4.4 Modellierung streckenabschnittsbezogener Verkehrsmengen

Für weitere Modellierungsschritte bedarf es zeitschrittbezogener Verkehrsmengen für jeden Streckenabschnitt, der an Anfang und Ende durch eine Anschlussstelle, einen Teilknotenpunkt oder ein Testfeldende begrenzt ist. Weil Verkehrsdaten, die wie in den zuvor beschriebenen Streckenabschnitten beschrieben aufbereitet wurden, nicht für alle Streckenabschnitte vorliegen, müssen für die übrigen Streckenabschnitte Ersatzdaten modelliert werden. Dabei kommen zwei Lösungen zum Einsatz:

- Dort, wo flussauf- und flussabwärts Daten vorliegen und wo zwischen den zugehörigen Messquerschnitten keine zentralen Orte oder Autobahnknotenpunkte liegen, werden die Daten interpoliert.
  - Fehlen Daten nur an einem Streckenabschnitt, erfolgt die Gewichtung jeweils hälftig.
  - Fehlen Daten an mehreren aufeinander folgenden Streckenabschnitten, wird die Gewichtung abhängig von der Entfernung zu den beiden nächsten Messquerschnitten flussauf- und flussabwärts variiert.
- Für die übrigen Streckenabschnitte werden die Daten vom nächsten Messquerschnitt entgegen der Richtung zum Testfeldende, zum zentralen Ort oder zum Knotenpunkt übernommen:
  - Entweder mit dem Faktor 1 multipliziert, wenn es für die Verwendung eines anderen Faktors keine Informationsgrundlage gibt,
  - oder mit einem anderen Faktor, wenn beispielsweise verfügbare DTV-Werte für die relevanten Streckenabschnitte dazu Anlass gaben.

## 4.5 Ermittlung der Verkehrsdaten für einen bestimmten Simulationsfall

Abhängig von der Zielsetzung bei einem Simulationslauf kann es zielführend sein, die gemäss den vorangegangenen Streckenabschnitten erarbeiteten Verkehrsdaten weiter aufzubereiten. So können Verkehrsmengen erhöht werden, beispielsweise um allgemeine Verkehrszuwächse abzubilden oder um ein Szenario im Zusammenhang mit Veranstaltungen oder neuen Attraktoren in einem Teilnetz zu skizzieren. Ebenso können beispielsweise die Werte mehrerer Wochen gemittelt werden – zum einen, um ein durchschnittliches Verkehrsgeschehen abzubilden, zum anderen, um Datenlücken zeitlich zu schliessen.

## 4.6 Modellierung von Zu- und Abflüssen

Grundlage für die Modellierung der Verkehrsnachfrage in diesem Vorhaben sind lokale Verkehrsdaten von Messquerschnitten im Streckenverlauf. Zur Ableitung von Zu- und

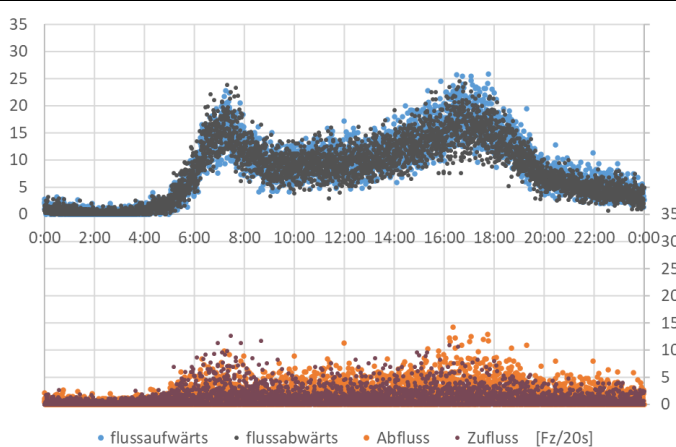


Abflüssen, die die Abbildung der Verkehrsnachfrage in der späteren Modellumgebung gewährleisten, wird folgende Methodik angewandt:

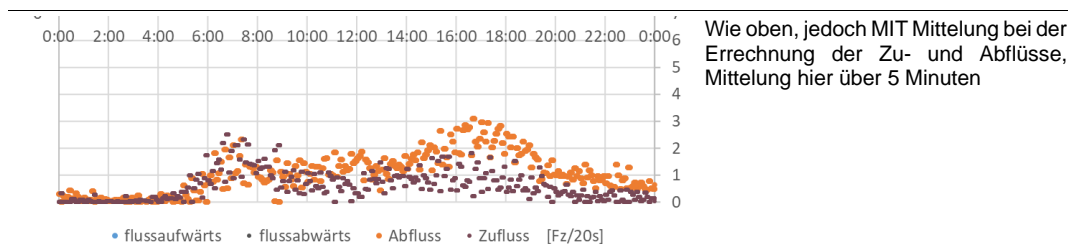
1. Die Verkehrsmengen, die jeweils zwischen zwei Anschlussstellen erhoben werden, werden abhängig von ihrem Abstand zu den benachbarten Anschlussstellen und abhängig von modellierten Fahrgeschwindigkeiten (vgl. Kapitel 6.1) zeitlich auf die Anschlussstellen projiziert. Also gehen die Verkehrsmengen an der Anschlussstelle stromaufwärts etwas früher, stromabwärts etwas später als gemessen in die modellierten Zu- und Abflüsse ein.
2. Die projizierten Verkehrsmengen werden optional über mehrere Zeitschritte gemittelt. Die Anzahl dieser Zeitschritte ist frei wählbar.
3. An jeder Anschlussstelle und an jedem Knotenpunkt wird eine Zu- und Abflussrate (ZAR) festgelegt (Kriterien werden später erläutert).
4. Zeitschrittweise wird der Abfluss  $A$  zunächst aus der ZAR und der Verkehrsmenge auf dem stromaufwärtigen Streckenabschnitt  $q_{\text{auf}}$  berechnet, der Zufluss  $Z$  aus der ZAR und der Verkehrsmenge auf dem stromabwärtigen Streckenabschnitt  $q_{\text{ab}}$ .
5. Die Differenz zwischen  $q_{\text{ab}}$  und  $q_{\text{auf}} - A + Z$  wird jeweils zur Hälfte mit  $A$  und  $Z$  zu  $A'$  und  $Z'$  verrechnet, so dass sich  $q_{\text{ab}} = q_{\text{auf}} - A' + Z'$  einstellt.
6. Ist  $A'$  oder  $Z'$  negativ, so werden beide Werte um den Betrag des negativen Wertes erhöht, so dass sich keine negativen Ab- oder Zuflüsse ergeben.

Die ZAR wird anhand folgender Ziele anschlussstellen- und fahrtrichtungsbezogen festgelegt:

- Es ergeben sich qualitativ plausible Verläufe der modellierten Zu- und Abflüsse.
  - Die Muster der resultierenden Zu- und Abflussganglinien entsprechen im Wesentlichen den Erwartungen.
  - Je nach Fahrtrichtung und Lage zu einem Ballungsraum ergeben sich maximale Zu- bzw. Abflüsse zur morgendlichen oder zur abendlichen Hauptverkehrszeit.
  - Weder Zu- noch Abflüsse betragen über einen längeren Zeitraum hinweg Null.
- Es ergeben sich quantitativ plausible Verläufe der modellierten Zu- und Abflüsse.
  - Die Stärke der Zu- und Abflüsse steht über den Modellierungszeitraum hinweg in einem plausiblen Verhältnis zu den Verkehrsstärken vor und nach einer Anschlussstelle.
  - Die Stärke der Zu- und Abflüsse spiegelt die Attraktivität der angebundenen Orte und Verkehrswege wider.
- Dort, wo es gemessene Zu- und Abflussmengen gibt, ergeben sich im Vergleich damit für die modellierten Zu- und Abflüsse ähnliche Verläufe.
- Die ZAR erscheint in Anbetracht der Attraktivität der angebundenen Orte und Verkehrswege angemessen.



**Verkehrsmengen flussaufwärts und flussabwärts und errechnete Zu- und Abflüsse OHNE Mittelung (Anschlussstelle Sempach, Fahrtrichtung Wiggertal, freitags – gemittelt aus den Kalenderwochen 13 bis 15 im Jahr 2019)**



**Abb. 15:** Errechnete Zu- und Abflüsse ohne und mit zeitlicher Mittelung

Abb. 185 zeigt beispielhaft die Wirkung der Mittelung bei der Errechnung der Zu- und Abflüsse: Ohne Mittelung ergeben sich beispielsweise

- durch Diskretisierungseffekte an den Intervallrändern,
- durch Effekte der zeitlichen Projektion,
- durch die Korrekturen im Berechnungsverfahren oder
- durch potenzielle Unzulänglichkeiten bei der Detektion

stark schwankende Zu- und Abflüsse, die immer wieder Werte von mehr als 10 Fahrzeugen in 20 Sekunden ausweisen. Diese Schwankungen werden durch die Mittelung wirksam reduziert. Je nach Aufgabenstellung kann es also sinnvoll sein, dieses Werkzeug gezielt einzusetzen.

Anmerkung: Die Verkehrsmengen sind nicht ganzzahlig,

- weil bei der Ermittlung der Bemessungsverkehrstärke LW mit dem Faktor 1,5 eingehen,
- weil bei der Mittelung der Verkehrsmengen über mehrere Wochen die Summe der Fahrzeuganzahl durch die Anzahl der eingehenden Wochen geteilt wird und
- weil bei der Errechnung der Zu- und Abflüsse in verschiedenen Arbeitsschritten dividiert wird.

Eine Rundung der ermittelten Werte wäre zwar jederzeit möglich, jedoch würden Rundungsfehler und Diskretisierungseffekte an den Intervallrändern die Interpretation späterer Modellergebnisse erschweren und die Aussagekraft der Ergebnisse potenziell verschlechtern. Die weitere Verwendung der Gleitkommazahlen ist hingegen frei von Nachteilen, wenn bei ihrer Analyse ihr modellhafter Hintergrund berücksichtigt wird.

Bei üblichen Anschlussstellen werden Zu- und Abflussraten von 10 oder 15% verwendet. Das trifft auf ca. drei Viertel der modellierten Anschlussstellen zu. Bei 5% der Anschlussstellen wird eine Rate von 50% oder mehr verwendet – dies trifft bei Anschlussstellen an sehr zentralen Orten oder an Autobahndreiecken auf, bei denen einer der drei Arme als Zu- und Abfahrt modelliert wird (z.B. das Autobahndreieck Zürich-Süd). Bei den übrigen ca. 20% der Anschlussstellen wird die Zu- und Abflussrate mit Werten zwischen 20 und 40% festgelegt. Hierbei handelt es sich um

- als Anschlussstellen modellierte Autobahndreiecke (z.B. Brüttisellen, Winterthur-Nord), um
- Anschlussstellen an Orten mit einer gewissen Zentralität (z.B. Basel-City, Luzern-Kriens) oder um
- Anschlussstellen, an denen über den Tag gesehen grössere Unterschiede hinsichtlich der Verkehrsmengen auf den Streckenabschnitten vor und nach der betrachteten Anschlussstelle beobachtet werden (z.B. Effingen, Eiken).

## 5 Ermittlung der Streckenkapazitäten

Die Streckenkapazitäten sind ein massgeblicher Bestandteil des zu entwickelnden Gesamtmodells. Sie quantifizieren das Verkehrsangebot und gehen in die Verkehrsmodellierung ein. Die Kapazitäten werden mit Hilfe der vorliegenden Verkehrsdaten von Januar bis Juni 2019 ermittelt.

### 5.1 Literatur und Regelwerke

In der Literatur und in einschlägigen Regelwerken gibt es verschiedene Ansätze, die Kapazität von Streckenabschnitten zu bestimmen. Traditionell ist die Kapazität definiert als das maximal erreichbare Verkehrsaufkommen unter definierten äusseren Bedingungen. Sie ist die Verkehrsstärke, bis zu der eine akzeptable Verkehrsqualität besteht und jenseits derer es zu einem Zusammenbruch des fliessenden Verkehrs kommt. Zusammenbruch bedeutet, dass Fahrzeuggeschwindigkeiten plötzlich sprunghaft zurückgehen und es zu stockendem Verkehr oder Stau kommt. In der klassischen Verkehrstheorie geht die Kapazität eines Streckenabschnitts aus empirischen Untersuchungen und dem Modell des Fundamentaldiagramms hervor. Sie stellt eine feste, deterministische Grösse dar und wird auch in den Regelwerken zur Bemessung von Hochleistungsstrassen genutzt. Drei der einschlägig bekannten Regelwerke werden im Rahmen dieser Untersuchung genauer analysiert: Schweizer Norm VSS 40 018a, Deutsches Handbuch für Bemessung von Strassenverkehrsanlagen (HBS) und amerikanisches „Highway Capacity Manual“ (HCM).

In der Schweiz sind die Kapazitäten für Autobahnen in der Norm VSS 40 018a festgehalten. Die darin genannten Kapazitäten lehnen sich an ältere schweizerische Richtwerte sowie an ausländische Normen (HCM und HBS) an. In der Norm gibt es für zwei- und dreistreifige Autobahnen Kapazitätswerte. Diese sind abhängig von den Strassenbedingungen (wie Fahrstreifenanzahl, Fahrstreifenbreite, seitliche Hindernisfreiheit oder Längsneigung), Verkehrsbedingungen (wie Funktion und Lage des Streckenabschnitts, Kollektiv der Fahrzeuglenker oder Schwerverkehrsanteil) und den Betriebsbedingungen (Geschwindigkeitsbeschränkungen oder Überholverbote). Das Berechnungsintervall der Kapazität liegt bei 60 Minuten. Die Werte in Tab. 2 beziehen sich auf eine trockene Fahrbahn. Dies stellt den günstigen Betriebszustand dar. [32]

**Tab. 2:** Leistungsfähigkeit für Autobahn in Abhängigkeit von Zulässiger Höchstgeschwindigkeit, Schwerverkehrsanteil und Steigung aus VSS 40018a [32]

Kapazität VSS 40018a [Fz/h]					
Fahrstreifen	Steigung	Geschwindigkeitsbeschränkung	Schwerverkehrsanteil [%]		
			≤5%	>5-15%	>15-25%
2	≤2 %	120 km/h	4.000	3.800	3.600
		100 km/h	4.000	3.800	3.600
		80 km/h	4.000	3.800	3.650
	2-4%	120 km/h	3.800	3.500	3.200
		100 km/h	3.800	3.600	3.400
		80 km/h	3.800	3.700	3.500
	>4%	120 km/h	3.550	3.150	2.800
		100 km/h	3.600	3.350	3.000
		80 km/h	3.650	3.450	3.200
3	≤2 %	120 km/h	5.800	5.450	5.100
		100 km/h	5.800	5.550	5.400
		80 km/h	5.800	5.600	5.500
	2-4%	120 km/h	5.450	5.050	4.600
		100 km/h	5.600	5.250	5.000
		80 km/h	5.650	5.500	5.300
	>4%	120 km/h	5.050	4.500	4.000
		100 km/h	5.250	4.950	4.300
		80 km/h	5.500	5.200	4.550

Das in Deutschland bekannte HBS betrachtet die Kapazität auf Autobahnen im ersten Schritt differenziert nach der Lage zu Ballungsräumen der Längsneigung der Strasse, des Schwerverkehrsanteils und der Fahrstreifenanzahl. Zusätzlich gibt es Faktoren, die die Kapazität ändern wie beispielsweise: Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Tunnel. Im HBS werden die Kapazitäten für Tageslicht und trockene Fahrbahnverhältnisse angegeben. Die Bemessungswerte gelten für eine Analyse in Stunden-Intervallen und Zwischenwerte werden interpoliert. Es werden Autobahnen mit zwei, drei und vier Fahrstreifen aufgeführt, (vgl. Tab. 3). [34]

**Tab. 3:** Leistungsfähigkeit für Autobahn in Abhängigkeit von Geschwindigkeitsbeschränkung, Tunnel, Schwerverkehrsanteil und Steigung aus dem deutschen Handbuch für Bemessung von Straßenverkehrsanlagen; TSF=Seitenstreifen temporär befahrbar

			Kapazität HBS [Fz/h]							
			außerhalb Ballungsräume				innerhalb Ballungsräume			
			Schwerverkehrsanteil [%]				Schwerverkehrsanteil [%]			
Fahrstreifen	Längsneigung	Geschwindigkeitsbeschränkung	≤5%	10%	20%	30%	≤5%	10%	20%	30%
2	≤2 %	ohne	3.700	3.600	3.400	3.200	3.900	3.800	3.600	3.400
		120 km/h	3.800	3.700	3.500	3.300	3.900	3.800	3.600	3.400
		100/80 km/h	3.800	3.700	3.500	3.300	4.000	3.900	3.700	3.500
		Tunnel	3.700	3.600	3.400	3.200	3.900	3.800	3.600	3.400
	3%	mit und ohne Tempolimit	3.600	3.500	3.300	3.100	3.800	3.700	3.500	3.300
	4%		3.400	3.300	3.100	2.900	3.600	3.500	3.300	3.100
	5%		3.100	3.000	2.800	2.600	3.300	3.200	3.000	2.800
3	≤2 %	ohne	5.300	5.200	4.900	4.600	5.700	5.500	5.200	4.900
		120 km/h	5.400	5.300	5.000	4.700	5.700	5.500	5.200	4.900
		100/80 km/h	5.400	5.300	5.000	4.700	5.800	5.600	5.300	5.000
		Tunnel	5.300	5.200	4.900	4.600	5.700	5.500	5.200	4.900
	3%	mit und ohne Tempolimit	5.200	5.100	4.800	4.500	5.600	5.400	5.100	4.800
	4%		4.900	4.800	4.500	4.200	5.300	5.100	4.800	4.500
	5%		4.500	4.400	4.100	3.800	4.900	4.700	4.400	4.100
4	≤2%	ohne	7.300	7.100	6.700	6.300	7.800	7.600	7.100	6.600
		120 km/h	7.400	7.200	6.800	6.400	7.800	7.600	7.100	6.600
		100/80 km/h	7.400	7.200	6.800	6.400	8.000	7.800	7.300	6.800
	3%	mit und ohne Tempolimit	7.100	6.900	6.500	6.100	7.600	7.400	6.900	6.400
	4%		6.800	6.600	6.200	5.800	7.300	7.100	6.600	6.100
	5%		6.200	6.000	5.600	5.200	6.700	6.500	6.000	5.500
2+ TSF	2%	100 km/h	4.700	4.500	4.400	4.200	5.200	5.000	4.700	4.400
	3%	mit und ohne Tempolimit	4.600	4.500	4.300	4.100	5.100	4.900	4.600	4.300
	4%		4.400	4.300	4.100	3.900	4.900	4.700	4.400	4.100
	5%		4.100	4.000	3.800	3.600	4.600	4.400	4.100	3.800
3+ TSF	2%	100 km/h	6.300	6.200	5.900	5.600	7.000	6.800	6.400	6.000
	3%	mit und ohne Tempolimit	6.200	6.100	5.800	5.500	6.900	6.700	6.300	5.900
	4%		5.900	5.800	5.500	5.200	6.600	6.400	6.000	5.600
	5%		5.500	5.400	5.100	4.800	6.200	6.000	5.600	5.200

Das in den USA veröffentlichte Highway Capacity Manual (HCM) unterscheidet sich in vielen Punkten vom HBS und der Schweizer Norm und ist wesentlich umfangreicher. Die Kapazität des Streckenabschnitts basiert auf Daten von 15-Minuten-Intervallen. Dabei werden u. a. die Anzahl und Breite der Fahrstreifen, der Seitenabstand und die Trassierung berücksichtigt. Im Gegensatz zum HBS basiert die Ermittlung der Verkehrsqualität nicht auf nur einem Wert. Im HCM sind die Verkehrsdichte bzw. der Belegungsgrad in Verbindung mit der durchschnittlichen lokalen Geschwindigkeit entscheidend für die Beurteilung der Qualität. [33, 35]

Wie diese drei einschlägig bekannten Richtlinien unterschiedlicher Regionen zeigen, geht in der klassischen Lehre die Kapazität eines Streckenabschnitts eine Autobahn aus dem Fundamentaldiagramm hervor. Aktuell wird der starre Ansatz zur Ermittlung der Kapazität in den Regelwerken immer mehr in Frage gestellt. Die Leistungsfähigkeit einer Strasse ist

von einigen weiteren Parametern als in den Regelwerken enthaltenen Grössen abhängig. Die Kernfrage lautet: Mit welcher Wahrscheinlichkeit als Funktion der Verkehrsstärke ist für definierte äussere Bedingungen (wie z. B. Fahrstreifenanzahl, Steigerung, Verkehrszusammensetzung, Witterung, etc.) ein Verkehrszusammenbruch auf einem Streckenabschnitt zu erwarten? Ist diese Wahrscheinlichkeitsfunktionen bekannt, könnten für die Bemessung und Bewertung der Verkehrsqualität, der Massnahmenbewertung zur Steigerung der Verkehrsqualität und für die Prognose von Verkehrszuständen wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Diese Frage beschäftigt die neue Verkehrsforschung. [33, 35]

Es wird die Kapazität darin vielmehr als eine über der Zeit veränderliche Grösse und nicht mehr fixierter deterministischer Wert gesehen. Für deutsche Autobahnen wurden in [36] bereits Erkenntnisse hinsichtlich der Anwendbarkeit verschiedener Verfahren zur Ermittlung von Kapazitätsverteilungen gewonnen. Die Kapazitätsverteilung beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Verkehrszusammenbruch bei einer bestimmten Verkehrsstärke ereignet.

Ein weiterer Ansatz zur stochastischen Beschreibung der Kapazität ist die Bestimmung der Einbruchswahrscheinlichkeit. Dazu werden die Anzahl der Intervalle, denen unmittelbar ein Geschwindigkeitseinbruch folgt, der Anzahl der Intervalle bei fließendem Verkehr für Verkehrsstärkekassen gegenübergestellt. Somit beschreibt das Verhältnis für eine bestimmte Verkehrsstärke das Risiko für einen Geschwindigkeitseinbruch [37].

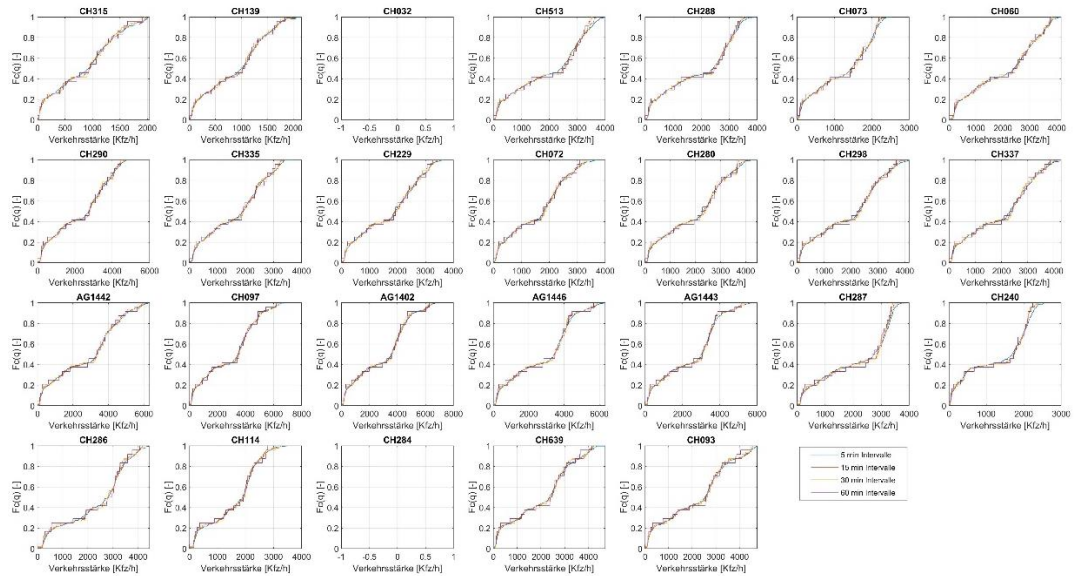
In [35] wird die Erkenntnisse zur probabilistischen Beschreibung der Kapazität überprüft und vertieft. Datengrundlage hierfür waren sowohl zeitlich als auch räumlich hoch aufgelöste Daten von österreichischen Autobahnen. Schwerpunkte der Arbeit sind eine ausführliche Literaturanalyse zur Kapazität auf Autobahnen und die statistische Analyse der Daten. [35] beinhaltet Auswertungen von Verkehrs- und Umfelddaten mit dem Ziel, ein allgemeingültiges Verfahren zur Beschreibung der Kapazität als probabilistische Grösse aufzustellen.

In [38] wird gezeigt, dass die Kapazität als Zufallsgrösse zu behandeln ist. Eine geeignete Verteilungsfunktion ist die Weibull-Verteilung. Dies wurde mit der so genannten Product-Limit-Methode aus der Statistik der Lebensdaueranalyse festgestellt. Mit diesem Ansatz lassen sich besonders trennscharf Unterschiede zwischen verschiedenen Vergleichsfällen feststellen. Die Untersuchungen auf der Grundlage eines sehr grossen Datenumfanges zeigen, dass es im Verkehrsfluss auf Autobahnen drei typische Zustände gibt: gestaut, synchron und fließend. [38]

## 5.2 Anwendung der Literatur und Regelwerke für das CTM

Die im vorhergegangenen Kapitel aufgezeigten Methoden zeigen, dass es eine Vielzahl an unterschiedlichen Möglichkeiten der Kapazitätsbestimmung gibt. Ebenfalls zeigen die drei vorgestellten Regelwerke leichte Differenzen in den Methoden zur Quantifizierung der Kapazität – es scheint nicht eindeutig zu benennen zu sein, welche Kapazität ein Streckenabschnitt hat und welche Faktoren den Wert wie beeinflussen. Ausserdem ist nicht trivial, eine dieser Methoden auf den räumlich mitunter lückenhaften Datensatz anzuwenden. Für das CTM des Netzausschnitts des ASTRA werden Kapazitäten je Zelle benötigt.

Damit ein Kapazitätswert aus den Daten abgelesen werden kann, ist es wichtig, dass im betrachteten Zeitraum auf dem detektierten Streckenabschnitt auch ein Verkehrszusammenbruch stattgefunden hat. Dies wird für den untersuchten Netzausschnitt durch eine Product-Limit-Schätzung bewiesen, nach der Methode in [38]. Beispielhaft ist die Verteilung der Kapazität der Detektoren auf der A1 für die Fahrtrichtung von Solothurn nach Winterthur in Abb. 16 zu sehen. Auch nahezu alle anderen Detektoren des untersuchten Streckenabschnittes dokumentieren mindestens einen Verkehrszusammenbruch.



**Abb. 16:** Product-Limit-Schätzung nach [38], der Detektoren der A1 zwischen Solothurn und Winterthur

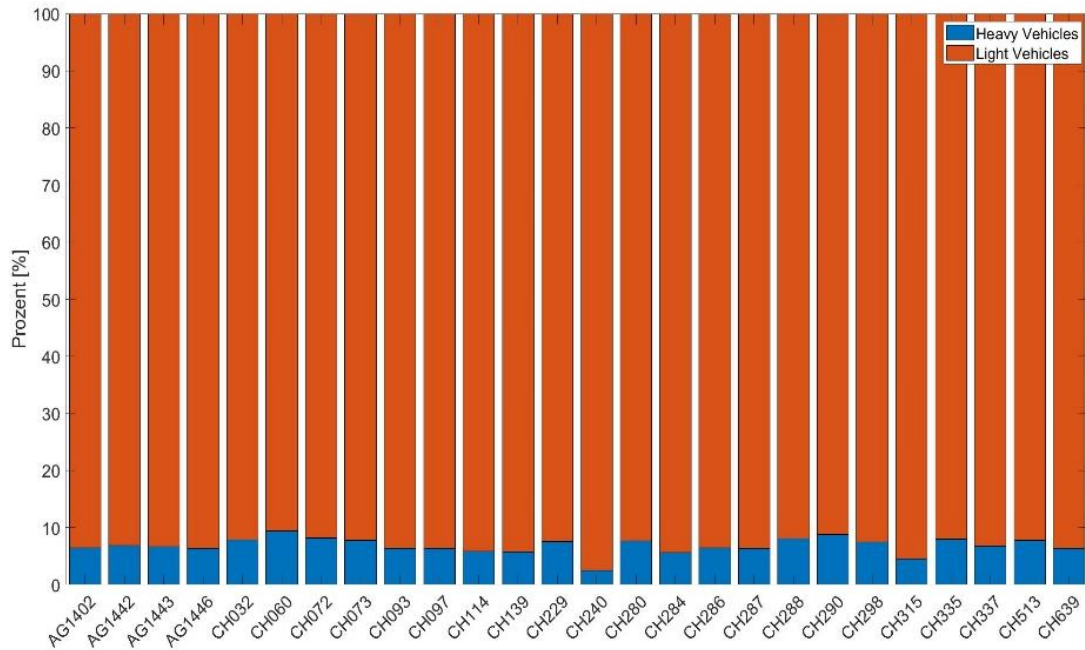
Eine freie Strecke einer Autobahn wird in sogenannte Streckenabschnitte eingeteilt. Diese wiederum bestehen aus den Zellen des CTM. Ein neuer Streckenabschnitt beginnt bei einer Änderung der folgenden Merkmale:

- Anzahl Fahrstreifen (Quelle: Daten)
- Längsneigung (Quelle: <https://www.outdooractive.com/de/> - Routenplaner)
- Verkehrsstärke oder Schwerverkehrsanteil (Quelle: Daten)
- Geschwindigkeitsregelung (Quelle: Daten & Expertenaussagen von BK)

Die minimale Länge eines Streckenabschnitts liegt bei 250 m. Dies ist jedoch parametrierbar und spiegelt die Grösse der Zellen des CTM. Strecken mit einer Steigung von mehr als 2% machen auf dem schweizerischen Nationalstrassennetz einen Anteil von 12% aus. In dem betrachteten Netzausschnitt dieses Projekts wurden folgende Strecken mit einer grösseren Steigung als 2% gelistet:

- A3 Wollishofen – Horgen 2-4%
- A1 bei Wangen an der Aare bis Boningen-Oftringen

Der Schwerverkehrsanteil (SVA) wird in % der Gesamtzahl der motorisierten Fahrzeuge angegeben. Er enthält auch die sogenannten langsamen Fahrzeuge wie Wohnwagengespanne. In dem betrachteten Netzausschnitt beläuft sich der SVA immer auf ca. 10% und liegt damit mittig in der Spanne von >5-15%, was in den Kapazitätswerten der VSS Norm aufgelistet ist. Beispielhaft ist in Abb. 17 die Verteilung der normalen Fahrzeuge zu SV für die Detektoren der A1 von Solothurn nach Winterthur dargestellt.



**Abb. 17:** Prozentuale Verteilung des Schwerverkehrs zu normalen Fahrzeugen an den einzelnen Detektoren der A1 von Solothurn nach Winterthur

### 5.3 Definition der Kapazitäten der einzelnen Zellen

Den einzelnen Zellen des CTM werden Kapazitätswerte zugewiesen. Diese Kapazitätswerte werden zunächst vom Messquerschnitt bis zur nächsten Anschlussstelle bzw. zum nächsten stromabwärts gelegenen Messquerschnitt angewendet. Anpassungen des Kapazitätswerts werden zwischen den Anschlussstellen bzw. Messquerschnitten vorgenommen, wenn eine Änderung der Fahrstreifenanzahl, der Steigung oder der Geschwindigkeitsregelung bekannt ist. Quelle der Fahrstreifenanzahl ist [geo.admin.ch](http://geo.admin.ch), Quelle der Steigung der Strecke ist [Outdooractive](http://Outdooractive). Eine Quelle über Geschwindigkeitsregelungen ist nicht bekannt, dabei wird auf Expertenaussagen der BK zurückgegriffen und die Geschwindigkeiten der Einzelfahrzeugdaten analysiert.

Für Streckenabschnitte mit zwei oder drei Fahrstreifen werden an Streckenabschnitten ohne Detektoren die Werte der VSS Norm genutzt. An Streckenabschnitten mit mehr Fahrstreifen wird das deutsche HBS herangezogen, mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 120 km/h, falls nicht anderweitig bekannt, da die VSS dazu keine Werte beinhaltet. Beim Anwenden der Kapazitätswerte der Regelwerke wird auf die jeweils in der Norm verfügbaren zusätzlichen Parameter wie Steigung der Strecke oder Lage zu Ballungsräumen geachtet.



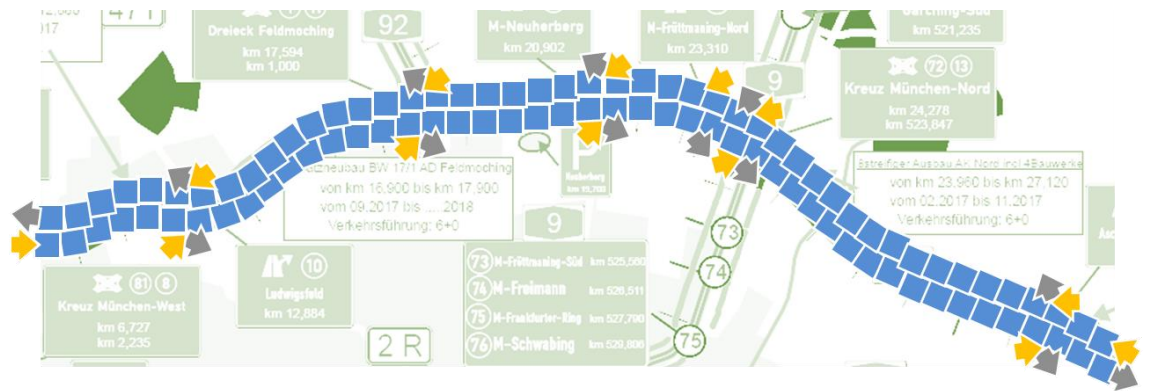


## 6 Implementierung des Cell Transmission Models

### 6.1 Verkehrsflussmodell

Das eingesetzte Verkehrsflussmodell (aufsetzend auf früheren Arbeiten auf [14, 15]) teilt Strecken in Zellen mit einer parametrierbaren Länge ein und berücksichtigt Änderungen der Verkehrsnachfrage und des Verkehrszustands in ebenso frei parametrierbaren Zeitschritten (Abb. 18). Bei ungestörtem Verkehrsfluss werden Fahrzeuge, die sich im Netz befinden, zwischen zwei Zeitschritten um ein Streckensegment nach vorn versetzt (ein PW gilt als ein Fahrzeug, ein LW als 1,5 Fahrzeuge – vgl. Kapitel 4.3. Daher sollten Zellen- und Zeitschrittlänge so gewählt werden, dass sich aus dem Quotienten von Zellenlänge und Zeitschrittlänge eine vernünftige mittlere Geschwindigkeit ergibt. Für initiale Überlegungen werden 250 m und 10 s gewählt, was zu einer modellierten Geschwindigkeit von 90 km/h führt. Dieser Wert erscheint zunächst recht gering, wird aber aus folgenden Gründen als angemessen und zielführend erachtet:

- Die modellierte Geschwindigkeit gilt sowohl für PW als auch für LW.
- Die Aufgabenstellung adressiert insbesondere die Modellierung von Staus. Diese treten vor allem während der Hauptverkehrszeiten auf, in denen Geschwindigkeiten in aller Regel abhängig von den Geschwindigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer und damit im Mittel kaum höher als die modellierten 90 km/h gewählt werden können.
- Bei einer Auswertung von Daten von der A96 in Deutschland [39] wurde festgestellt, dass bei Reisegeschwindigkeiten von 110 km/h ungestörter Verkehrsfluss vorherrscht – auf einem Streckenabschnitt mit grossen Anteilen ohne Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Bei einer Fahrt auf 50 km des Autobahnnetzes ergibt sich daraus eine Reisezeitverkürzung von ca. sechs Minuten im Vergleich zu einer Fahrt bei 90 km/h – ein zeitlicher Versatz innerhalb der Modellierung, der bei der Ableitung makroskopischer Kenngrößen vernachlässigbare Abweichungen verursacht.
- Die Zu- und Abflüsse werden gemäss Kapitel 4.6 zeitschrittweise so berechnet, dass sich bei einem Modelldurchlauf ohne künstlich erzeugte Staus an den Messquerschnitten zwischen den Anschlussstellen exakt die Verkehrsstärken einstellen, die dort real auch gemessen wurden. Die Effekte aus zeitlichen Versätzen, die sich infolge nicht ganz stimmiger Geschwindigkeitsannahmen ergeben, werden somit an den Anschlussstellen über die dortige Zu- und Abflussmodellierung korrigiert – Effekte aus höheren oder geringeren tatsächlichen Geschwindigkeiten werden durch stärkere oder schwächere Zuflüsse kompensiert. Damit ergeben sich Modellabweichungen infolge nicht ganz stimmiger Geschwindigkeitsannahmen nur in einem geringfügigen Rahmen, der aus dem Fehler der Geschwindigkeitsannahme und der Entfernung von einem Messquerschnitt zu den nächstgelegenen Anschlussstellen bestimmbar ist. Bei einer Entfernung von 5 km ergibt sich bei 126 bzw. 108 km/h (35 bzw. 30 m/s) gegenüber 90 km/h (25 m/s) eine fahrzeugbezogene Abweichung von 57 bzw. 33 Sekunden – ein Unterschied, der sich bei der Rückstaubildung infolge eines Engpasses nicht nennenswert auf die Modellergebnisse auswirkt.



**Abb. 18:** Beispiel für die Einteilung eines Streckenabschnitts in Zellen, Zu- und Abflüsse mit Pfeilen dargestellt [14, 15]

Zu- und Abflüsse an Anschlussstellen oder Knotenpunkten werden am Übergang zwischen zwei Streckensegmenten in Zeitschritten mit der eingangs parametrisierten Zeitschrittdauern zu den Fahrzeugen hinzugezählt bzw. davon abgezogen, die in diesem Zeitschritt von einer zur nächsten Zelle versetzt werden. Zu- und Abflüsse können somit räumlich in Abständen gemäss der parametrisierten Zellenlänge modelliert werden.

Es werden maximal nur so viele Fahrzeuge in die nächste Zelle versetzt, wie es der Kapazität der jeweiligen Zelle entspricht (z.B. je 10 Sekunden  $1/360$  des Stundenwerts). Befinden sich in einer Zelle mehr Fahrzeuge, verbleiben zwischen zwei Zeitschritten die Fahrzeuge in der Zelle, die über die Streckenkapazität hinausgehen. Es entsteht ein Rückstau. Innerhalb einer Zelle kann dieser Stau nur aus so vielen Fahrzeugen bestehen, wie es sich aus der Zellenlänge von 250 m, der Fahrstreifenanzahl und einer parametrierbaren durchschnittlichen fahrzeugbezogenen Aufstelllänge ergibt.

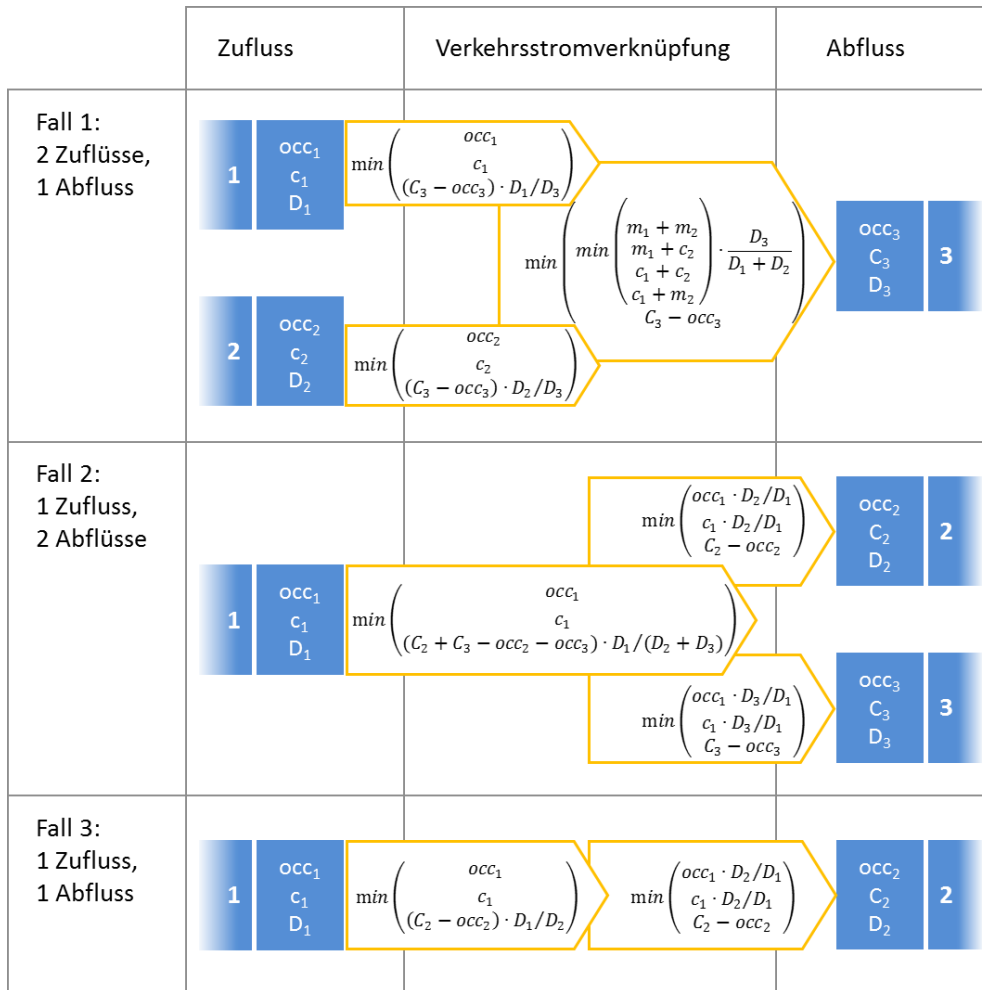
Befinden sich mehr Fahrzeuge in einem Stau, als eine Zelle aufnehmen kann, breitet sich der Stau auf die nächste flussaufwärtige Zelle aus. Die Kapazität der flussaufwärtigen Zelle wird auf den Wert der flussabwärtigen gesetzt. An Anschlussstellen zufahrende Fahrzeuge können im Modell alle einfahren – Rückstau im nachgeordneten Netz gibt es also im Modell nicht, dafür verlängern sich modellierte Rückstaus im Autobahnnetz.

Erst wenn die Anzahl der Fahrzeuge zellenbezogen wieder unter den Wert fällt, der der eigentlichen Kapazität dieser Zelle entspricht, hat sich der Stau im Segment wieder aufgelöst, so dass der Zelle wieder ihre ursprüngliche Kapazität zugewiesen werden kann.

## 6.2 Verkehrsstromverknüpfungen an Knotenpunkten

Unter Knotenpunkten werden bei den nachfolgenden Ausführungen Autobahnkreuze und Autobahndreiecke verstanden, bezüglich der Verknüpfungen modelliert werden wie in Kapitel 3.2 beschrieben. Hier werden mehrfach entweder die Verkehrsströme von zwei modellierten Streckenzügen im Zufluss zu einem Verkehrsstrom im Abfluss (Fall 1) zusammengefasst oder der Verkehrsstrom von einem Streckenzug im Zufluss auf zwei Verkehrsströme im Abfluss aufgeteilt (Fall 2). Auch die Weiterleitung eines Verkehrsstroms von einem Zuflussstreckenzug zu einem Abflussstreckenzug kann Teil der Verkehrsmodellierung an Knotenpunkten sein (Fall 3).

Zur Modellierung dieser Fälle wurde die in einem früheren Vorhaben entwickelte Methodik gemäss Abb. 19 verfeinert und erweitert. Die Verfeinerungen betrafen insbesondere Prozesse zur Propagierung von Staus entgegen der Fahrtrichtung an Knotenpunkten. Erweiterungen betrafen die Staupropagierung auch über einen Zeitschrittwechsel hinweg. Das verbessert zum einen Darstellungen an Teilknotenpunkten des Falls 2, zum anderen ist es Grundlage für das Schliessen von Maschen im modellierten Netzausschnitt.



**Abb. 19:** Modellierung von Verkehrstromverknüpfungen für drei Verknüpfungsfälle [14, 15]

**Legende zu Abb. 19:**

- occ<sub>x</sub>... Modellierte Belegung [Fz] der Zelle x, im Abfluss bereits nach Abfluss der Fahrzeuge von der ersten zur zweiten Zelle
- c<sub>x</sub>... Maximale Belegung [Fz] der Zelle x bei freiem Verkehrsfluss
- C<sub>x</sub>... Maximale Belegung [Fz] der Zelle x bei Stau
- D<sub>x</sub>... gemäss Nachfrage („Demand“) hinterlegte Belegung [Fz] der Zelle x

Die Brüche aus den Belegungen gemäss Nachfrage („D“) modellieren zum einen die Aufteilung von Verkehrsströmen an Gabelungen (Fall 2), zum anderen bewerkstelligen sie die Korrektur von Abweichungen hinsichtlich der Verkehrsmengen zwischen unmittelbar verknüpften Streckenzügen, die in der Verkehrsnachfrage hinterlegt sind. Bei der Ausbreitung von Staus über Streckenzuggrenzen hinweg weisen sie in Fall 1 zudem die veränderten Kapazitäten den letzten Elementen in den Zuflusstreckenzügen zu.

Damit wird gemäss Abb. 19 bei der Verknüpfung von Streckenzügen immer das Minimum aus der Anzahl vorhandener Fahrzeuge im Zufluss, dem maximal möglichen Fahrzeugfluss und der Aufnahmefähigkeit im Abfluss übergeben, bedarfsweise verknüpft mit dem Term für Verkehrsstromaufteilungen und zur Korrektur von Abweichungen hinsichtlich der Verkehrsmengen.

## 6.3 Maschenschluss

Das Verkehrsflussmodell ist in der Lage, Verkehrsströme auch in geschlossenen Netzmaschen abzubilden. Dazu wird ein Streckenabschnitt in beiden Fahrrichtungen jeweils in zwei Streckenabschnitte geteilt, im realisierten Netzmodell im Zuge der A 2 auf Höhe der Anschlussstelle Dagmersellen. Ein neuer Teilknotenpunkttyp verbindet die geteilten Streckenabschnitte wieder. Er basiert auf dem Teilknotenpunkttyp gemäss Fall 3 (vgl. Abb. 19), berücksichtigt jedoch auch die Zu- und Abflüsse an der anliegenden Anschlussstelle und modelliert Verkehrsströme und Stauwellenbewegungen unter Verrechnung des zeitlichen Versatzes von einem Modellierungsintervall, der bei einem CTM beim Schliessen einer Masche auftritt.

Die Festlegung, welcher Abschnitt modelltechnisch geteilt wird, um nachfolgend die Masche zu schliessen, ist letztlich beliebig. Weil die Rechenaufwände bei häufiger Staubildung am Maschenschluss anwachsen, ist es zweckmässig, Maschenschlüsse an Abschnitten vorzusehen, die vergleichsweise selten von Staus betroffen sind. So fiel die Wahl auf Dagmersellen. Auf die Modellergebnisse hat diese Festlegung jedoch keinerlei Einfluss.

Die Validierung (vgl. Kapitel 7) demonstriert die uneingeschränkte Eignung der gefundenen Lösung zur Abbildung eines Maschenschlusses.

## 6.4 Nachweis der Online-Fähigkeit mit einer Pseudo-Online-Umsetzung

Das entwickelte Modell ist für die Online-Prognose der Stauausbreitung im Zufluss zu Engpässen geeignet. Die Nachfrage im Modell bis zum aktuellen Zeitpunkt wird dabei aus Verkehrsdaten der vergangenen Stunden bestimmt, für die unmittelbare Zukunft kann sie mit historischen Zeitreihen für die Prognose modelliert werden. Für beide Zeitbereiche sind sie wie in Kapitel 4.6 beschrieben zu Zu- und Abflussganglinien zu verarbeiten.

Im Zuge der Validierung (vgl. Kapitel 7) werden Daten aus der Kalenderwoche 16 des Jahres 2019 als Pseudo-Online-Daten dem Verkehrsflussmodell zugeführt. Ab einem beliebigen Zeitpunkt während eines Modelllaufs, dem pseudo-aktuellen Zeitpunkt, finden historische Zu- und Abflüsse gemittelt aus den Kalenderwochen 13 bis 15 des Jahres 2019 Eingang ins Verkehrsflussmodell und modellieren damit Verkehrszustände, die sich aus der aktuellen Verkehrssituation heraus in den nachfolgenden Minuten und Stunden mit hoher Wahrscheinlichkeit so oder so ähnlich einstellen werden, sofern gute Annahmen für die Entwicklung der Streckenkapazitäten getroffen werden können.

## 6.5 Ausführungen zu potenziellen Modellanpassungen und -ergänzungen

### 6.5.1 Differenzierung verschiedener Fahrzeugklassen

Die Differenzierung von Fahrzeugklassen in einem Verkehrsflussmodell ist dann von Belang, wenn sich ohne eine solche Differenzierung zu grosse Abweichungen zwischen Modell und Wirklichkeit ergeben. Sie können daraus resultieren, dass allgemein gültige Geschwindigkeitsannahmen nicht auf alle Fahrzeugklassen ausreichend zutreffen. Ein CTM sieht zunächst dieselbe Geschwindigkeit für alle Fahrzeuge und damit keine Differenzierung nach Fahrzeugklassen vor.

Mit der hier entwickelten Modellumgebung ist zunächst eine Fahrgeschwindigkeit von 90 km/h umgesetzt. Dieser Wert überschätzt die Geschwindigkeiten von Lkw-ähnlichen Fahrzeugen nur geringfügig, zusätzlich liegt er unweit üblicher Geschwindigkeiten für Pkw in Ballungsräumen insbesondere zu Hauptverkehrszeiten – ein besonders stauträchtiges

Szenario. Somit ist der Wert eine gute Wahl. Für Szenarien mit höheren Pkw-Geschwindigkeiten ergeben sich zwar zunehmend Abweichungen zwischen Modell und Wirklichkeit. Ihre Grössenordnung wurde bereits in Kapitel 6.1 quantifiziert: Auf der Strecke zwischen zwei Anschlussstellen halten sie sich in einem Rahmen, der sich nicht nennenswert auf das Ergebnis der Staumodellierung auswirkt. Und durch die Korrektur resultierender Abweichungen, die durch die modellierten Zu- und Abflüsse gewährleistet ist, reichen diese Abweichungen nicht weiter als bis zu diesen benachbarten Anschlussstellen. Fahrdynamische Effekte, die darüber hinaus mit der Berücksichtigung verschiedener Fahrzeugklassen adressiert werden könnten, werden mit mikroskopischen und nicht mit makroskopischen Modellansätzen wie im Fall eines CTM abgebildet. Durch die höhere Gewichtung von Lkw-ähnlichen Fahrzeugen (ein Lkw-ähnliches Fahrzeug entspricht 1,5 Pkw-ähnlichen Fahrzeugen) wird ihr erhöhter Beitrag zum Erreichen einer Streckenkapazität und auf die Ausbreitung eines Staus entgegen der Fahrriichtung mit dem Modell gewährleistet.

Damit liefert eine weitergehende Unterscheidung nach Fahrzeugklassen bei der beschriebenen Modellierungsmethodik unter der Zielsetzung einer kurz- bis mittelfristigen Stauausbreitungsprognose keinen nennenswerten Mehrwert.

### 6.5.2 Modellierung von Bereichen mit geringeren Geschwindigkeiten (z.B. Geschwindigkeitsharmonisierung, Arbeitsstellen)

Die Modellierungsmethodik eines CTM sieht innerhalb eines Zeitschritts die Versetzung aller Fahrzeuge von einer Zelle in die nächste vor, solange die Leistungsfähigkeit einer Strecke nicht überschritten wird. Langsamfahrstellen können aufgrund der festen Zeitschritte folglich anhand verkürzter Zellen modelliert werden, deren Anzahl im Gegenzug erhöht wird, um die real unveränderte Gesamtstreckenlänge auch im Modell konstant zu halten. Die Anzahl der Fahrzeuge, die in einer solchen verkürzten Zelle im Fall eines Staus aufgenommen werden können, liegt aufgrund der geringeren Zellenlänge unter dem entsprechenden Wert für Zellen mit der üblichen Geschwindigkeit.

Aufgrund der räumlichen Diskretisierung bei einem CTM sollte dabei eine ganze Anzahl der ursprünglichen Zellen im Netzmodell auf eine ganze Anzahl neuer Zellen aufgeteilt werden. So kann beispielsweise eine Zelle zu zwei Zellen aufgeteilt werden (wodurch die modellierte Geschwindigkeit hier halbiert wird), oder drei Zellen können beispielsweise durch fünf ersetzt werden, dann bei einem Rückgang der Geschwindigkeit um 40% auf dem betroffenen Streckenabschnitt. Die Neuaufteilung mehrerer Zellen sollte dabei nicht über eine Anschlussstelle hinweg erfolgen, es können jedoch vor und hinter einer Anschlussstelle separate Neuaufteilungen durchgeführt werden. Jede zusätzliche Zelle hat dabei eine um einen Zeitschritt verlängerte Fahrzeit zur Folge.

### 6.5.3 Verfeinerung der räumlich-zeitlichen Auflösung

Die umgesetzte Modellmethodik ermöglicht ohne weiteres auch eine feinere räumlich-zeitliche Auflösung, beispielsweise bei einer konstanten Modellgeschwindigkeit von 90 km/h statt mit 250 m und zehn Sekunden mit 125 m und fünf Sekunden. Folgende Änderungen würden sich daraus ergeben:

- Die Rechenzeit würde sich etwas verlängern, wenngleich eine Zunahme der Zellenanzahl auf der freien Strecke sich weniger auf die Rechenzeit auswirkt als ein Zuwachs an Verknüpfungen in Verbindung mit Knotenpunkten.
- Die räumliche Lage von Anschlussstellen, Knotenpunkten und Engpässen könnte genauer modelliert werden.
- Bei sehr vielen Zellen im Netz wird die Handhabung des Modells erschwert.

Auf die modellierte Stauausbreitung hätte diese Änderung keinen Einfluss, weil die Ausprägung von Warteschlangen stetig modelliert wird. Somit ist bei der Verfeinerung der räumlich-zeitlichen Auflösung insbesondere das Ergebnis einer Abwägung zwischen Rechenzeit und räumlicher Detaillierung massgeblich.

#### 6.5.4 Verfeinerung der Rückstaumodellierung

Im CTM wird ein Stau modelliert, wenn mehr Fahrzeuge innerhalb eines Zeitschritts von einer in die nächste Zelle wechseln wollen, als es die Leistungsfähigkeit der Strecke zulässt. Nicht abgeflossene Fahrzeuge reihen sich dann mit einem festgelegten Bruttofahrzeugabstand flussaufwärts gleichmässig auf allen verfügbaren Fahrstreifen auf, Lkw-ähnliche Fahrzeuge 1,5-fach gewichtet. Der Bruttofahrzeugabstand im Stau wird beispielsweise mit 15 m festgelegt. Bei einer Zellenlänge von 250 m und drei Fahrstreifen stellen sich somit 50 Fahrzeuge an, bevor sich der Stau flussaufwärts in die nächste Zelle ausbreitet.

Die Annahme des Bruttofahrzeugabstands im Stau von 15 m impliziert bei Beachtung der Abstandsregel «halber Tacho» eine Geschwindigkeit im Stau von 20 bis 30 km/h. Der Wert ist zwar recht plausibel, jedoch variiert er in der Praxis, massgeblich abhängig von der Kapazität des Engpasses: Je grösser diese Kapazität im Verhältnis zur Fahrstreifenanzahl ist, desto grösser sind Geschwindigkeit und Fahrzeugabstände im Stau. Eine Modellierung des Bruttofahrzeugabstands im Stau abhängig von der Kapazität des Engpasses könnte somit die Ergebnisse des CTM verfeinern.

Darüber hinaus wird in Staus mit einer sehr geringen Kapazität im Engpass im Verhältnis zur Fahrstreifenanzahl nachverdichtet – das heisst: Der Stau hat sich schon in die flussaufwärtige(n) Zelle(n) ausgebreitet, im flussabwärtigen Staubereich rücken die Fahrzeuge mit der Zeit aber noch etwas zusammen, so dass auch dort noch Fahrzeuge aufgenommen werden können.

Zur Abbildung dieser Prozesse könnte der fix gewählte Bruttofahrzeugabstand im Stau durch eine variabelere Bestimmung ersetzt werden, beispielsweise mit folgendem Vorgehen:

- Es wird ein Bruttofahrzeugabstand bei Eintritt eines Staus definiert (z.B. 20 m).
- Es wird ein Faktor für die maximale Nachverdichtung innerhalb eines Staus definiert (z.B. 2, der minimale Bruttofahrzeugabstand sinkt damit im Beispiel auf 10 m).
- Es wird ein Faktor definiert, um den bezogen auf den Bruttofahrzeugabstand bei Stauintritt pro Modellierungsintervall im Stau nachverdichtet wird (z.B. 0,01 – nach spätestens 100 Zeitschritten ist die Nachverdichtung bei diesem Beispiel abgeschlossen).
- Abhängig von der Ausprägung eines Engpasses wird der Faktor für die maximale Nachverdichtung errechnet aus dem Minimum aus dem gemäss Punkt 2 gewählten Faktor und dem Verhältnis zwischen ursprünglicher und verbleibender Kapazität im Engpass. Nach unten wird der Faktor durch den Wert 1 begrenzt.

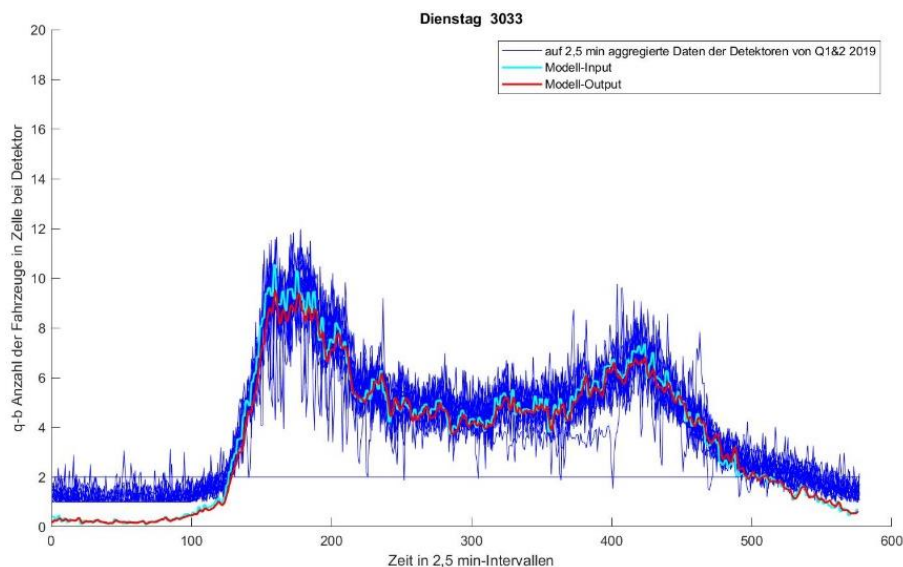
Bei einer Umsetzung der beiden Vorschläge zur Verfeinerung der Rückstaumodellierung ist die gegenseitige Beeinflussung detailliert zu analysieren. Zusätzlich sind die Auswirkungen aufs Modellergebnis dringend mit empirischen Daten abzugleichen. Grund für diese Notwendigkeit sind die potenzielle zusätzliche Dynamik und Komplexität im Modell, die aus den Verfeinerungen resultieren. Sie können die Interpretierbarkeit der Ergebnisse erschweren, ohne dabei zwingend einen Mehrwert zu liefern. Ohne diese zusätzliche Dynamik und Komplexität liefert das Modell robuste Ergebnisse, die bei sachkundiger Analyse eine klare Einordnung ermöglichen. Diesbezügliche Einschränkungen sind nur akzeptabel, wenn nachweislich verbesserte Modellergebnisse dies rechtfertigen.

## 7 Validierung

Die Ergebnisse des entwickelten Modells werden nach den ersten Simulationsdurchläufen des CTM evaluiert. Zunächst wird das CTM allgemein validiert und das Netz auf mögliche Überlastungen im Normalzustand analysiert. Anschliessend werden anhand definierter Engpässe konkrete überlastete Situationen mit dem Modell geprüft. Ebenso wird eine allgemein erhöhte und reduzierte Nachfrage einzeln und in Kombination mit verschiedenen Fahrzeugabständen zur Überprüfung der Robustheit des Modells modelliert.

### 7.1 Statistische Analyse der Datengrundlage und der Abbildung der Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage für das entwickelte CTM basiert hauptsächlich auf den Nachfragedaten der Kalenderwochen 13-15 des Jahres 2019 – wie in den vorhergegangenen Kapiteln schon erläutert. Im ersten Schritt wird geprüft, ob der Mittelwert der Verkehrsnachfrage dieser gewählten Kalenderwochen auch den Ganglinien der zugehörigen Messstellen in den restlichen Kalenderwochen des ersten Halbjahres entspricht. Abb. 20 zeigt, beispielhaft für einen Streckenabschnitt, dass die in hellblau eingefärbte Verkehrsmenge zum Start der Modellierung den dunkelblau dargestellten Mittelwert der Messstellen sehr gut wiedergibt. Die Daten der Messstellen sind in Abb. 20 wie die Eingangs- und Ausgangswerte des CTM in 2,5 min Zeitabschnitte aggregiert. Die Differenz der gemessenen Verkehrsnachfrage in den Nachtstunden ist der Interpolation zwischen Messlücken geschuldet. Die Differenz zu Beginn des Diagramms ist auf den Start des Simulationslaufs zurückzuführen – das Modell füllt sich über die ersten modellierten Stunden. Nach gut drei Stunden Modellierung sind die Modellergebnisse zufriedenstellend – dies waren in der Validierung die Stunden zwischen 0 Uhr und 3 Uhr. Zu den Hauptverkehrszeiten stimmen die Ganglinien der Verkehrsnachfrage gut mit den Ganglinien der gemessenen Daten überein.

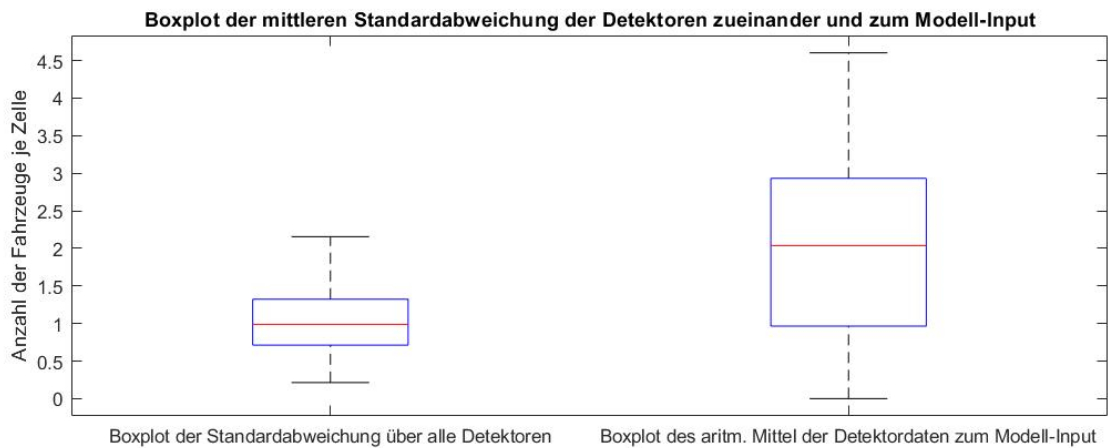


**Abb. 20:** Ganglinien für die Anzahl der Fahrzeuge je 250 m-Zelle auf dem Streckenabschnitt 3.033 (Anschluss Wollishofen) an einem Dienstag – Beispielhafter Vergleich der Daten der Messstellen an dem Streckenabschnitt mit den Modell Eingangs- und Ausgangsgrößen

Ebenso ist der zweite Schritt der Validierung in Abb. 20 gut zu erkennen: der Abgleich von Modellinput in Hellblau – also der Verkehrsnachfrage – zum Output des Modells in rot. Die ersten Simulationen wurden mit dem CTM mit der durchschnittlichen Nachfrage aus KW 13-15 von 2019 und ohne künstlich hervorgerufenen Engpass analysiert – daher ist ein Übereinstimmen von Input und Output wünschenswert. Dies ist durch die Validierung aller

Wochentage und Streckenabschnitte, bei denen die Messstellen im ersten Halbjahr Daten lieferten, geprüft und gegeben. Auch eine numerische Auswertung zeigt diese Übereinstimmung. Es sind vereinzelte Streckenabschnitte vorhanden, für die aufgrund fehlender oder defekter Detektion keine Daten vorhanden sind. Bei diesen Streckenabschnitten wurden Annahmen für die Nachfrage getroffen. Diese können durch gute Ortskenntnis und Erfahrung noch konkretisiert werden und das Modell der Realität noch näherbringen.

Für eine statistische Analyse wurde die Standardabweichung aller Messwerte je Streckenabschnitt und je Zeitzelle (Woche, Tag, Uhrzeit) zueinander und die Abweichung des Mittelwertes zum Modell-Input (abhängig von Woche, Tag, Uhrzeit) veranschaulicht. Abb. 21 zeigt einen Boxplot der mittleren Standardabweichung der Messwerte zueinander (links) und im Vergleich zum Modell-Input (rechts). Die Standardabweichung ist gemittelt über alle Netzabschnitte mit Detektor berechnet. Eine Zusammenfassung der Varianz dieser Werte kann Tab. 4 entnommen werden. Es wird deutlich, dass im Mittel eine Abweichung von ca. 5 Fahrzeugen auf einem Zeitabschnitt von 2,5 Minuten besteht. Für die Berechnungen mit dem CTM ist es wichtig die Streuung in den Daten zu kennen um Ausreisser in der Nachfrage, wenn nötig vor dem Einsatz lokal anzupassen.



**Abb. 21:** Boxplot der mittleren Standardabweichung der Detektordaten zueinander und zur Nachfrage des Modells

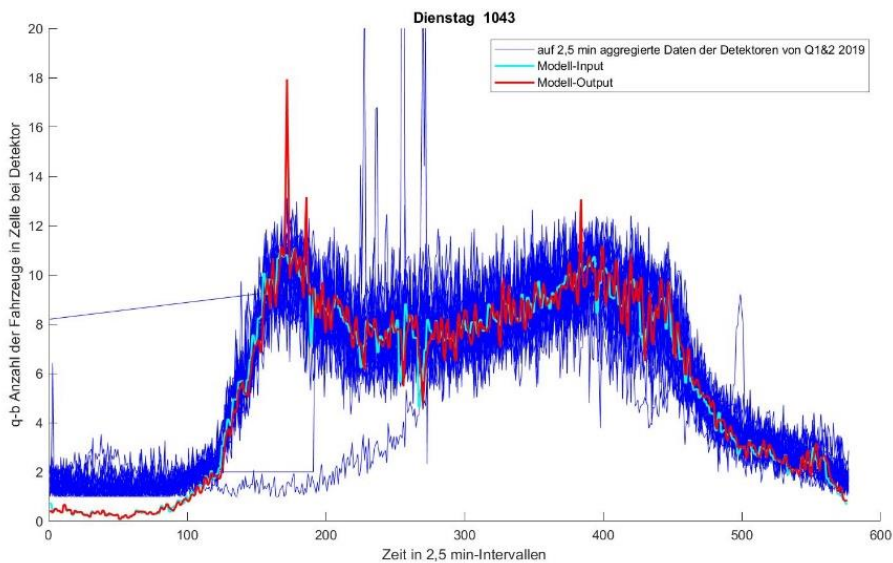
**Tab. 4:** Parameter der statistischen Analyse der Detektordaten je Streckenabschnitt im Modellierungs-Netz

Parameter	Anzahl der Fahrzeuge je 2,5min Zeitintervall in Bezug auf die die Detektordaten	Anzahl der Fahrzeuge je 2,5min Zeitintervall in Bezug auf den Modell-Input
Maximale Varianz	29,9	18,9
Mittlere Varianz	1,0	3,6
Maximale Standardabweichung	5,4	4,3
Mittlere Standardabweichung	1,0	1,9



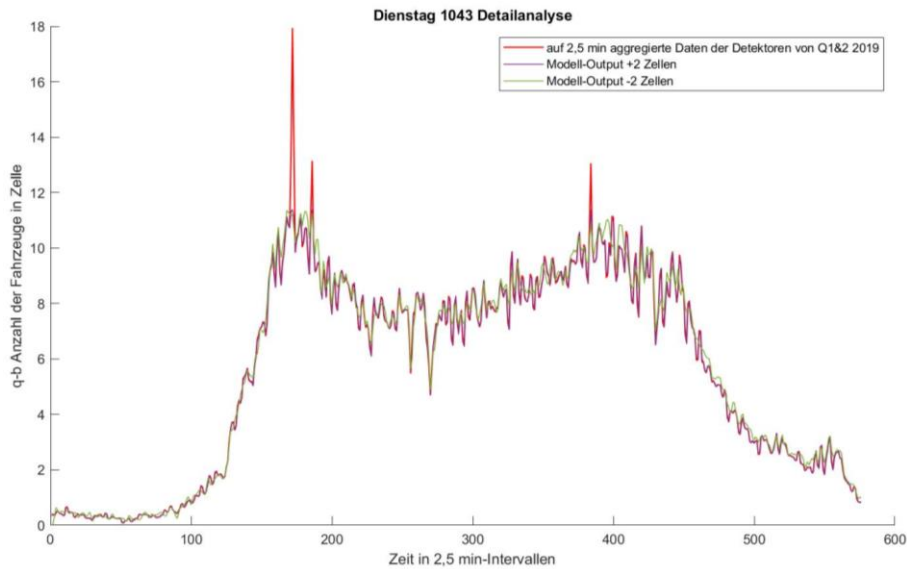
## 7.2 Detaillierte Analyse einzelner überlasteter Streckenabschnitte

Abb. 22 stellt beispielhaft einen Streckenabschnitt dar, der mit der gemittelten Nachfrage (hellblau) an der Kapazitätsgrenze agiert und in dem je nach Wochentag ohne weitere künstlich plazierte Störung ein Stau bzw. dichter Verkehr vorliegt. Diese Verkehrssituation ist sehr deutlich von der modellierten Nachfrage und der Kapazität an diesem Streckenabschnitt abhängig. An dieser Stelle und bei vergleichbaren Phänomenen gilt es nochmal zu prüfen, ob dieses Verhalten – also kurzzeitige Überlastungen ohne konkrete Störereignisse – an dieser Stelle im realen Netz auch zu diesen Zeiten auftritt. Dies kann durch detaillierte Datenanalyse oder aufgrund von Ortskenntnissen von Expertinnen und Experten des Schweizer Nationalstrassennetzes bestätigt oder widerlegt werden. Je nach Ergebnis der Untersuchung kann die Nachfrage oder die Kapazität des CTM an dieser Stelle angepasst werden.

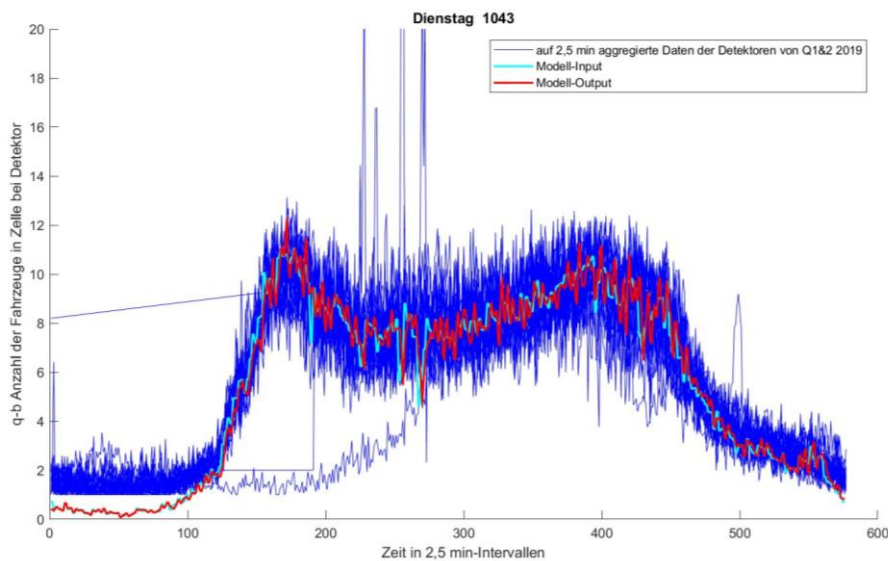


**Abb. 22:** Ganglinien für die Anzahl der Fahrzeuge je 250 m-Zelle auf dem Streckenabschnitt 1.043 (Anschluss Niederbipp) an einem Dienstag – Beispielhafter Vergleich der Daten der Messstellen an dem Streckenabschnitt mit den Modell Eingangs- und Ausgangsgrößen: Verkehrsnachfrage und Verkehrsdichte

Der Engpass in Abb. 22 ist mit einem kurzzeitigen Anstieg ("im Zeitbereich von 160 bis 170 2,5 min-Intervallen) der Verkehrsdichte und seinem raschen Abbau im stromabwärtigen Netz charakterisiert. Abb. 23 zeigt diesen Anstieg aus Abb. 22 in rot nochmals, dazu in grün und lila die modellierte Anzahl der Fahrzeuge zwei Zellen stromabwärts und -aufwärts des Streckenabschnitts mit dem kurzzeitigen Anstieg. Dabei wird deutlich, dass sich der Stau in diesen Zellen schnell auf- und auch wieder abbaut, da die Überlastung in den Zellen stromaufwärts und -abwärts nicht mehr erkennbar ist. Abb. 24 zeigt, dass sich die kurzzeitigen Anstiege und erhöhten Spitzen zu den Hauptverkehrszeiten durch eine Anpassung der Kapazität an dem Netzabschnitt auflösen lassen. Dies kann auf Basis von Ortskenntnis über den Verkehrszustand zu den Hauptverkehrszeiten für gewünschte Streckenabschnitte durchgeführt werden.

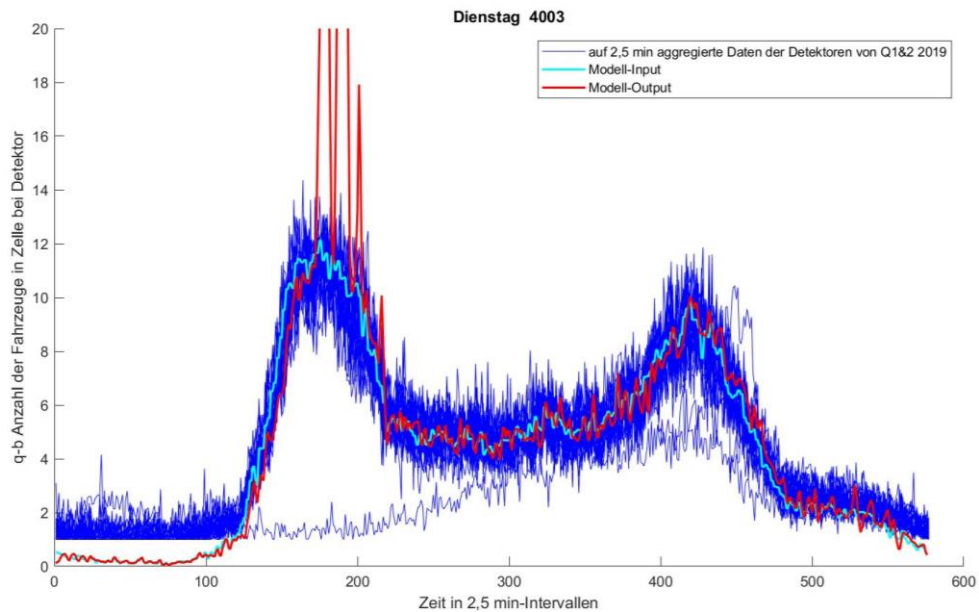


**Abb. 23:** Ganglinien für die Anzahl der Fahrzeuge je 250 m-Zelle auf dem Streckenabschnitt 1.043 (Anschluss Niederbipp) an einem Dienstag – Beispielhafter Vergleich der Zellen stromaufwärts (lila) und –abwärts (grün) an dem Streckenabschnitt mit einer leicht überhöhten modellierten Ganglinie (rot)

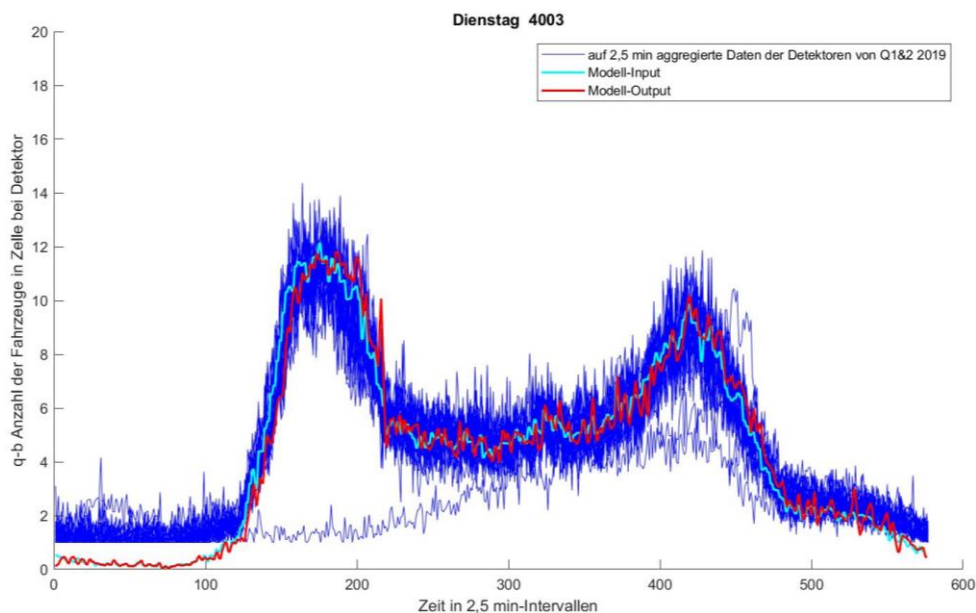


**Abb. 24:** Ganglinien für die Anzahl der Fahrzeuge je 250 m-Zelle auf dem Streckenabschnitt 1043 (Anschluss Niederbipp) an einem Dienstag mit angepasster Kapazität von 4100 Kfz/h auf 4200 Kfz/h – Beispielhafter Vergleich der Daten der Messstellen an dem Streckenabschnitt mit den Modell Eingangs- und Ausgangsgrößen

An einem weiteren Streckenabschnitt gibt es ebenfalls zu den Hauptverkehrszeiten Spitzen in den Modellergebnissen, die in der Realität nicht nachvollziehbar sind. Auch an diesem Streckenabschnitt wird in der Validierung getestet, ob diese kurzzeitigen Anstiege in rot in Abb. 25 (im Zeitbereich von 150 bis 200 2,5 min-Intervallen) durch eine Erhöhung der Kapazität an dieser Stelle behoben werden können. Abb. 26 zeigt, dass der übermäßige Anstieg der Verkehrsdichte nicht mehr erhalten ist. Das Netz kann die Nachfrage an dieser Stelle mit einer Erhöhung der Kapazität um 200 Kfz/h bedienen. Dies zeigt, dass das Modell durch Zuhilfenahme von korrekten weiteren Messwerten oder auf Basis von Ortskenntnis entsprechend einmalig angepasst werden kann – jedoch auch, dass das Modell wie auch das reale Verkehrsgeschehen sehr sensitiv auf die Kapazität reagiert. Die Kapazität eines Streckenabschnittes oder die Nachfragematrix sind die am besten geeigneten Parameter, um das Modell zu justieren.



**Abb. 25:** Ganglinien für die Anzahl der Fahrzeuge je 250 m-Zelle auf dem Streckenabschnitt 4.003 (Anschluss Gisikon-Root) an einem Dienstag – Beispielhafter Vergleich der Daten der Messstellen an dem Streckenabschnitt mit den Modell Eingangs- und Ausgangsgrößen. Hinterlegte Kapazität: 4100 Kfz/h



**Abb. 26:** Ganglinien für die Anzahl der Fahrzeuge je 250 m-Zelle auf dem Streckenabschnitt 4.003 (Anschluss Gisikon-Root) an einem Dienstag – Beispielhafter Vergleich der Daten der Messstellen an dem Streckenabschnitt mit den Modell Eingangs- und Ausgangsgrößen. Hinterlegte Kapazität: 4300 Kfz/h

### 7.3 Analyse der Dichte der Fahrzeuge

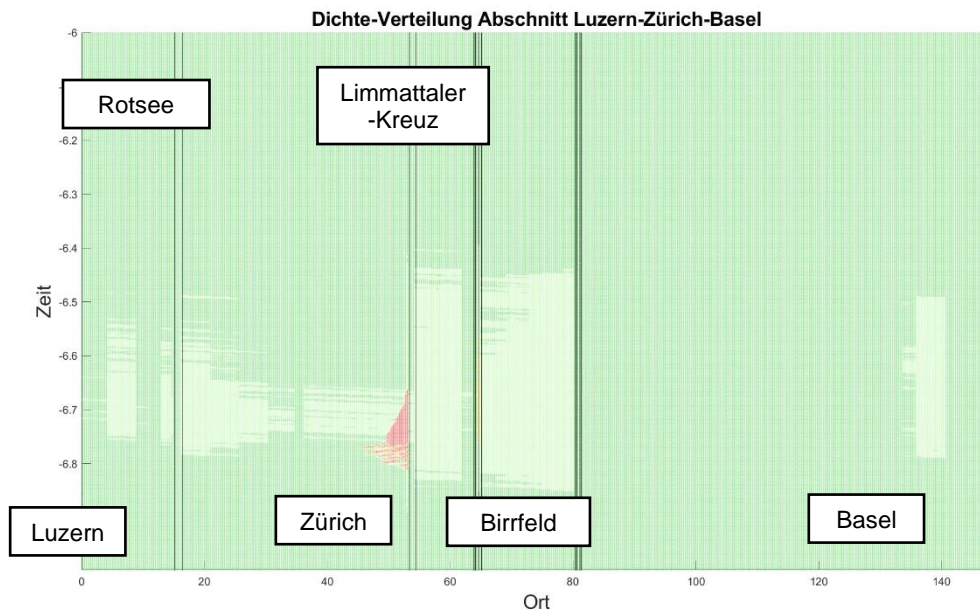
Neben der Auswertung der Nachfrageganglinien bietet das Modell die Möglichkeit, Konturplots mit der Verkehrsdichte (Anzahl der Fahrzeuge je 250 m-Zelle) für jeden Streckenabschnitt darzustellen. Die Analyse dieser Konturplots bildet den dritten Schritt

der Validierung. Abb. 27 beinhaltet einen Konturplot ohne platzierte Störung von einem Sonntag auf dem Streckenabschnitt Luzern-Zürich-Basel. In diesem Konturplot sind die Autobahnkreuze- und -dreiecke als dickere schwarze Linien dargestellt. Die Farbe der Zelle je 2,5 min und 250 Meter stellt das Verhältnis zwischen modellierter Verkehrsdichte und der Verkehrsdichte bei maximaler Verkehrsstärke dar. Liegt dieser Wert bei 1, entspricht die Verkehrsstärke der Kapazität. Liegt er über 1, bildet sich eine Störung. Legende:

- -0.01 - 0.55 Anteile der Fahrzeuge je Zelle – dunkelgrün
- 0.55 - 0.9 Anteile der Fahrzeuge je Zelle – grün
- 0.9 - 0.99 Anteile der Fahrzeuge je Zelle – gelb
- 99 – 2 Anteile der Fahrzeuge je Zelle – orange
- 2 – 1000 Anteile der Fahrzeuge je Zelle – rot

Der einzige rote, also verdichtete Streckenabschnitt des Dichte-Konturplots in Abb. 27 ist für einen Sonntag im ersten Moment überraschend. Daher wird diese Stelle genauer analysiert. Nach dem Kontrollieren der Nachfrage und Kapazität an diesem Streckenabschnitt stellt sich heraus, dass an dieser Stelle zum Beispiel-Zeitraum keine Daten aus Messstellen vorliegen. An diesem Streckenabschnitt wird der Input von benachbarten Messstellen herangezogen und eine Annahme getroffen. Dabei kann es zu fehlerbehafteten Nachfragewerten kommen, die nicht mit der Kapazität zusammen passen, was wiederum zum Stau bzw. verdichtetem Verkehr im Modell führen kann.

Abhilfe für diese Problematik schafft, ebenso wie bei den Überlastungsspitzen zu den Hauptverkehrszeiten aus den vorherigen Abbildungen, das Anpassen der Kapazität oder der Nachfrage auf Basis von empirisch ermittelten Daten, Ortskenntnis oder Erfahrung.

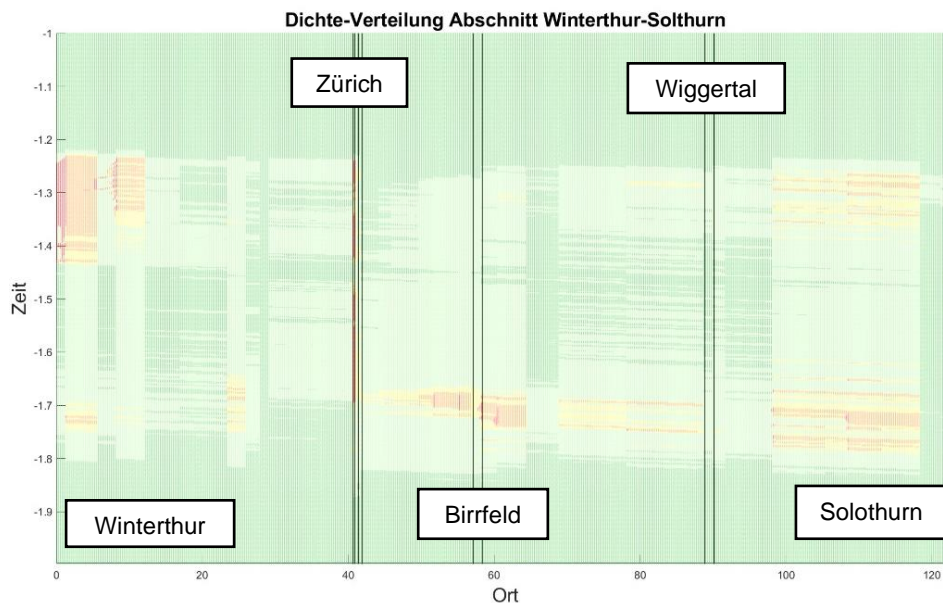


**Abb. 27:** Dichte-Konturplot der Fahrzeuge an einem Sonntag ohne implizierten Stau auf dem Streckenabschnitt Luzern-Zürich-Basel

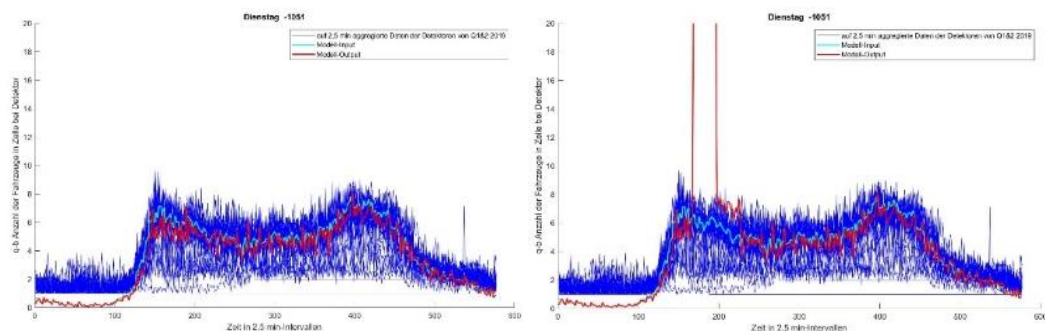
## 7.4 Modellergebnisse mit künstlich platziertem Stau

In einem vierten Schritt der Validierung wird im CTM ein Stau künstlich impliziert, indem die Kapazität an dieser Stelle von 4 100 Kfz/h auf 500 Kfz/h in den Morgenstunden reduziert wird. Es werden der Dichte-Konturplot und die Ganglinie der Modellparameter analysiert. In Abb. 28 ist der Verkehrsdichte-Konturplot auf dem Streckenabschnitt, in dem der Engpass platziert wird, für den Fall ohne Kapazitätsreduktion dargestellt. Abb. 29 zeigt die Ganglinien der Modellergebnisse mit Engpass an einer Anschlussstelle (Anschluss Lenzburg) stromaufwärts der indizierten Störung: In rot ist darin wieder die modellierte Verkehrsdichte über der Zeit an einem Streckenabschnitt dargestellt. Die Störung ist

zwischen den Anschlussstellen Aarau Ost und Aarau West platziert. Im Vergleich der beiden Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass sich in der rechten Abbildung in der morgendlichen Hauptverkehrszeit ein Stau gebildet hat. Er baut sich wieder ab, nachdem die Kapazität wieder angehoben und der künstliche Engpass somit behoben wird.

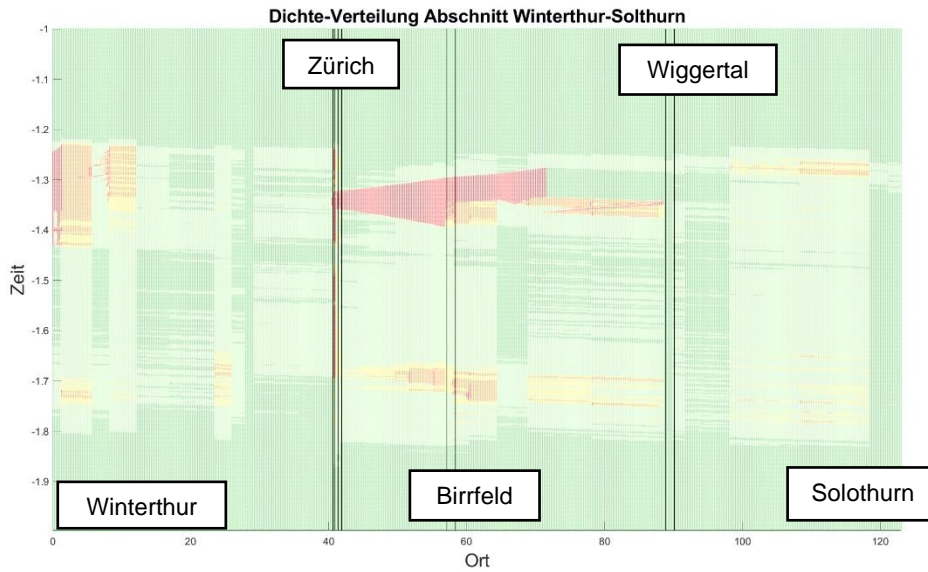


**Abb. 28:** Dichte-Konturplot der Fahrzeuge an einem Dienstag auf dem Streckenabschnitt von Winterthur nach Solothurn ohne gesetzten Engpass



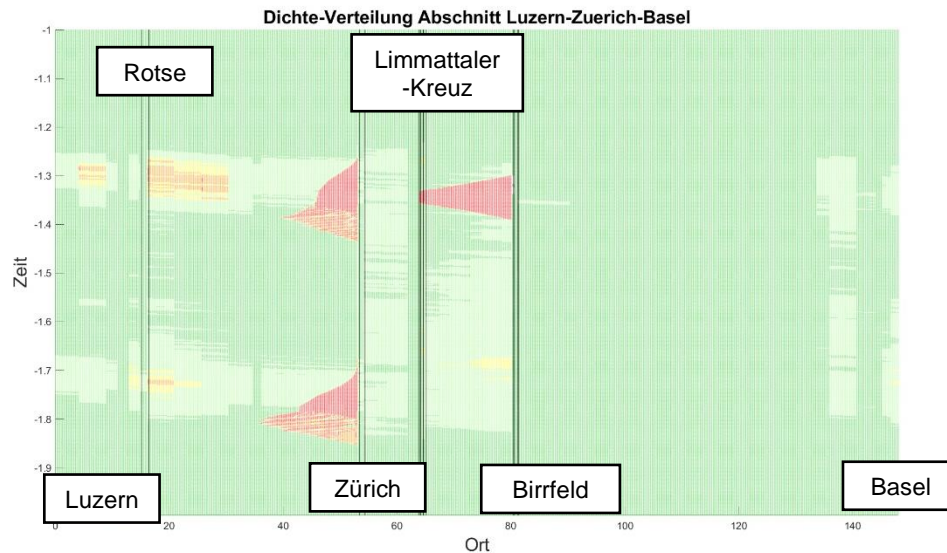
**Abb. 29:** Ganglinien für die Anzahl der Fahrzeuge je 250 m-Zelle auf dem Streckenabschnitt 1.051 (Anschluss Lenzburg) an einem Dienstag – Beispielhafter Vergleich der Daten der Messstellen (dunkelblau) an dem Streckenabschnitt mit den Modell Eingangszustand (hellblau) und Ausgangszustand (rot) links – Ausgangszustand mit Kapazität aus geographischen und empirischen Daten, 4 100 Kfz/h; rechts – Modifizierter Kapazität mit 500 Kfz/h

Der Stau wird zwischen den Anschlussstellen Aarau West und Aarau Ost vor dem Autobahndreieck Birrfeld indiziert. Der erzeugte Engpass ist in Abb. 30 bei Kilometer 70 zu erkennen. In dem Dichte-Konturplot erkennt man die typische Ausbreitung der Stauung bzw. Verdichtung des Verkehrs auf dem Streckenverlauf von Winterthur nach Solothurn stromaufwärts, auch über das Autobahndreieck Birrfeld hinweg.



**Abb. 30:** Dichte-Konturplot der Fahrzeuge an einem Dienstag auf dem Streckenabschnitt von Winterthur nach Solothurn mit gesetztem Engpass bei Streckenkilometrierung 70 zwischen Ausfahrt Aarau West und Aarau Ost

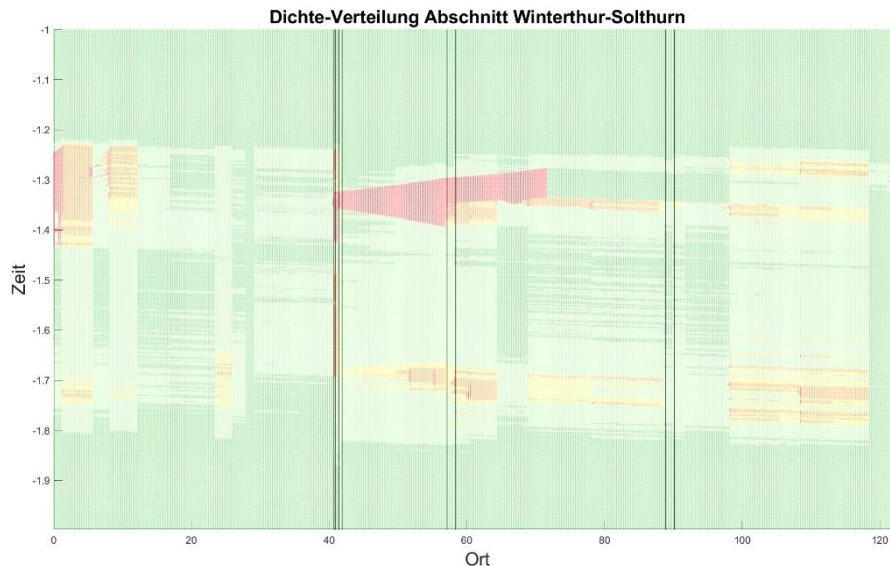
Auch eine Stauausbreitung über das Autobahndreieck Birrfeld hinaus auf den angrenzenden Streckenabschnitt ist deutlich zu erkennen. In Abb. 31 ist das Autobahndreieck Birrfeld auf dem kreuzenden Streckenabschnitt von Luzern über Zürich nach Basel bei Kilometer 80 markiert. Dort startet die Stauung im Dreieck und breitet sich stromabwärts aus. Die Stauungen, die sich zu den Hauptverkehrszeiten bei Kilometer 55 (Autobahnkreuz Zürich West) stromaufwärts bilden, sind der gemittelten Nachfrage und Kapazitätskombination geschuldet.



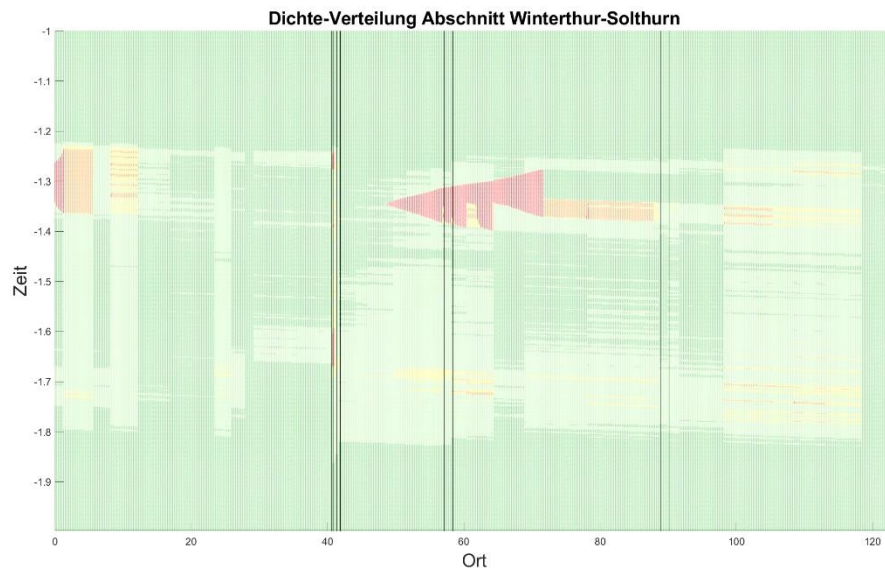
**Abb. 31:** Dichte-Konturplot der Fahrzeuge an einem Dienstag auf dem Streckenabschnitt von Luzern über Zürich nach Basel mit Auswirkungen über das Autobahndreieck hinweg der indizierten Stauung zwischen Ausfahrt Aarau West und Aarau Ost

Allgemein werden die Engpässe auch in Kombination mit einer um 10% erhöhten Nachfrage plausibel modelliert. Dabei fällt der Rückstaubereich etwas grösser aus (s. Vergleich von Abb. 30 mit Abb. 31). Bei einem verringerten Bruttoabstand der Fahrzeuge fällt der Rückstaubereich geringer aus, dies ist in Abb. 32 zu erkennen. Dort ist der gleiche Engpass modelliert wie in Abb. 29, nur mit dem Unterschied eines verringerten Bruttofahrzeugabstandes im Stau von 15 m auf 10 m. Die kurzzeitige Auflockerung des

Verkehrs und der erneute «Bauch» in Abb. 33, in dem Staubereich der Morgenspitze im Bereich von Kilometer 60 des gezeigten Streckenabschnittes, ist vermutlich auf die Situation der Zu- und Abflüsse zurückzuführen. Dieser direkt nach dem Engpass erfolgende konische Abbau des dichten Verkehrs scheint untypisch. Dieses Phänomen tritt auch bei anderen Stauungen und an anderen Wochentagen auf (Modellierung mit Fahrzeugabstand 10 m). Bei Modellierungen mit einem Bruttoabstand von 15 m erfolgt der Abbau in üblicher Form.



**Abb. 32:** Dichte-Konturplot der Fahrzeuge an einem Dienstag auf dem Streckenabschnitt von Winterthur nach Solothurn mit gesetztem Engpass bei Streckenkilometrierung 70 zwischen Ausfahrt Aarau West und Aarau Ost bei modifizierter Nachfrage von 110%



**Abb. 33:** Dichte-Konturplot der Fahrzeuge an einem Dienstag auf dem Streckenabschnitt von Winterthur nach Solothurn mit gesetztem Engpass bei Streckenkilometrierung 70 zwischen Ausfahrt Aarau Ost und Aarau West bei modifiziertem Bruttofahrzeugabstand von 15 m auf 10 m

## 7.5 Zusammenfassung

Generell kann festgestellt werden, dass das Modell auf Basis der vorliegenden Nachfragedaten im Hinblick auf die Zielsetzungen hervorragend arbeitet. Es bildet den

Verkehr mit der eingegebenen Nachfrage sinnvoll ab und erzeugt auch den verdichteten Verkehr bzw. die Staus an der jeweils indizierten Stelle plausibel. Die Ausbreitung von Stauungen erfolgt durch das Modell entsprechend der Realität. Es muss beachtet werden, dass der wichtigste Parameter in diesem Modell die Eingabe der möglichst korrekten Nachfragesituation ist und damit die Daten der Messstellen die wichtigste Grundlage bilden. Sobald keine Daten oder nur sehr wenige vorliegen, kann das Modell ohne Ortskenntnisse oder ohne die Justierung von Daten und Modellparametern durch Experten nicht endgültig optimiert und plausibilisiert werden. Denkbar wäre auch eine zusätzliche Kalibrierung des Modells - neben der Ortskenntnis von Experten - durch Hinzunahme von kontinuierlichen Verkehrsdaten (FCD), um auch an den Streckenabschnitten, an denen wenige oder keine Messstellen vorhanden sind, die Verkehrssituation plausibel nachzubilden. Ausserdem muss berücksichtigt werden, dass die Anfangsstunden des Modells nicht an jedem Streckenabschnitt ein realistisches Szenario abbilden, da das Modell erst gefüllt werden muss und somit erst nach einer gewissen Modell-Laufzeit die Nachfrage auch richtig enthält. Dies kann behoben werden, indem grössere Nachfragematrizen – über mehrere Tage hinweg – genutzt werden.



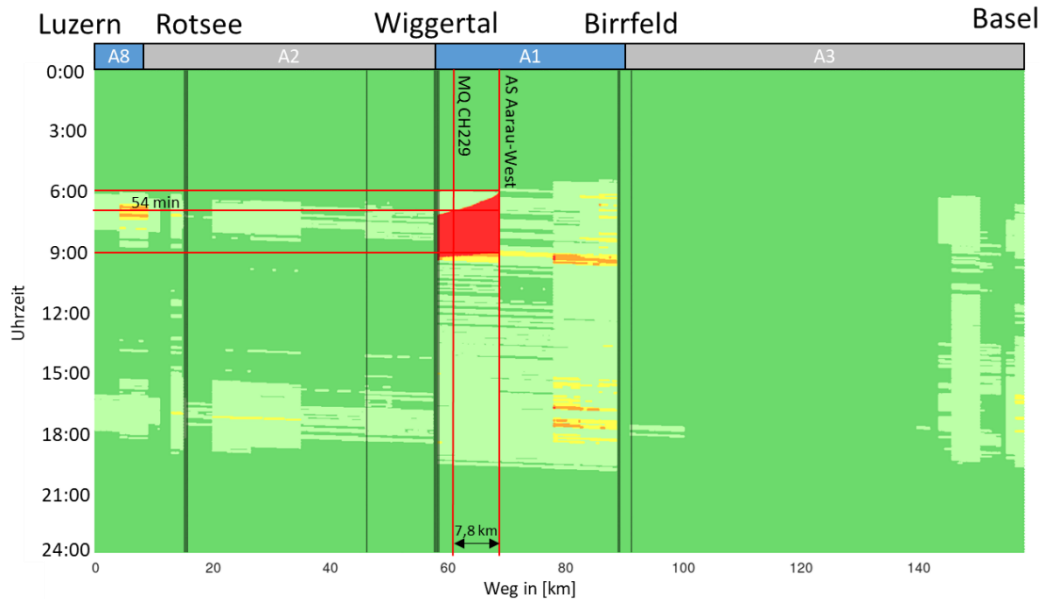
## 8 Massnahmen im Verkehrsmanagement

Das entwickelte Modell kann die Grundlage für verbesserte Entscheidungen über Massnahmen im Verkehrsmanagement sein. Aktuell entscheidet der Operator in der Verkehrsleitzentrale der Schweiz selbstständig mit Hilfe von Verkehrsdaten aus Messquerschnitten und Videokameras sowie aus Erfahrungswerten, ob und welche Massnahmen nach dem entsprechenden VMP geschaltet werden. Das CTM kann dem Operator als objektive Entscheidungshilfe dienen, indem es potenzielle Situationen erkennt bzw. prognostiziert und Massnahmen mit der zugehörigen Aktivierung und Deaktivierung von Schaltungen räumlich und zeitlich präzise vorgibt. Dafür werden im Folgenden die konkreten Nutzungsmöglichkeiten im Hinblick auf Schaltstrategien und Prognosefähigkeit dargelegt sowie die mögliche Anwendung des Modells in der Praxis veranschaulicht. Zudem wird ein Ausblick gegeben, welche weiteren Nutzungsmöglichkeiten das entwickelte Modell sowie dessen Weiterentwicklung in einer Verkehrszentrale bietet.

### 8.1 Ermittlung des Modellnutzens in Bezug auf derzeitig verwendete Schaltstrategien

Für die Analyse des Mehrwerts des aufgestellten Verkehrsmodells wurden zunächst die bereits implementierten Verkehrlenkungsstrategien (Verkehrsmanagementpläne) sowie Verkehrsleitungsmaßnahmen auf dem ASTRA-Streckennetz analysiert. Die Analyse zeigt, dass das aktuelle Modell durch Simulationen zur Unterstützung für verschiedene Massnahmen wie beispielsweise Stauwarnung oder Umleitungen verwendet werden kann. Für die Aktivierungs- und Deaktivierungsbedingungen der einzelnen Massnahmen werden insbesondere die Kenngrössen Rückstaulänge, Lage des Staus und Ereignisdauer benötigt, welche sich dem Modell entnehmen lassen. Eine Erweiterung des Modells um weitere Kenngrössen wie beispielsweise Reisezeitzunahme und/oder Sperrung einer Strecke oder Einfahrt sind ebenfalls möglich.

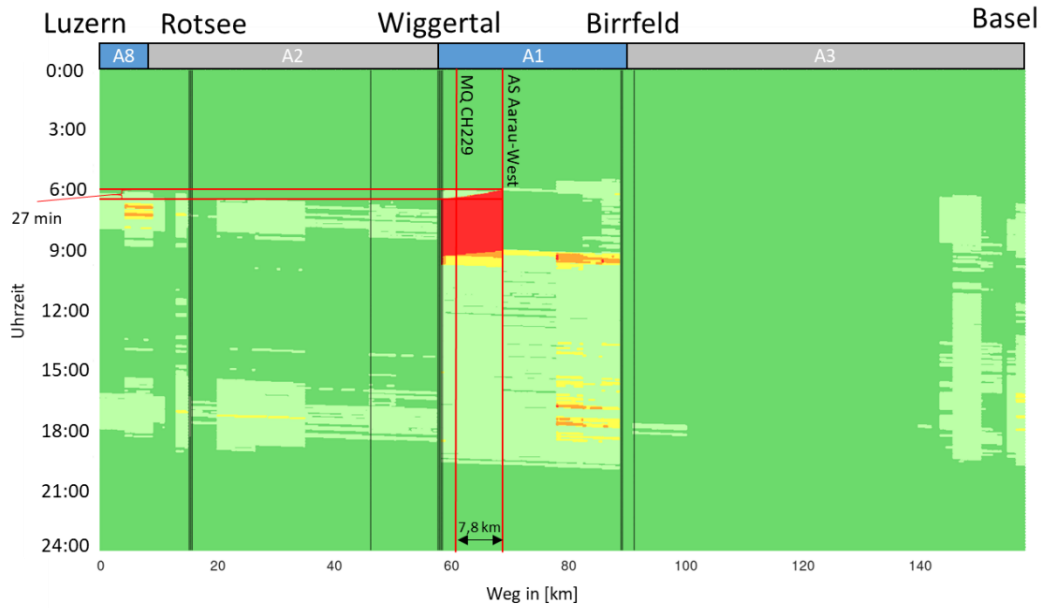
Der Nutzen des Modells wurde anhand des Szenarios «Verkehrsüberlastung» betrachtet, welches durch verschiedene Situationen hervorgerufen werden kann, wie beispielsweise aufgrund von Kapazitätseinschränkungen durch Unfälle oder Baustellen. Des Weiteren kann es durch eine Erhöhung der Verkehrsnachfrage im Normalbetrieb zu Verkehrsüberlastungen kommen, beispielsweise verursacht durch eine Grossveranstaltung oder Urlaubsverkehr. Für die Analyse des Modellnutzens wurde zunächst eine Evaluierung des prototypischen Modells anhand historischer Verkehrsdaten durchgeführt. Dazu wurden Konturplots für alle Streckenabschnitte erstellt und analysiert. Anschliessend wurden die genannten Situationen der Verkehrsüberlastung (erhöhte Verkehrsnachfrage sowie Kapazitätseinschränkungen durch Unfälle und Baustellen) im Modell erstellt und hinsichtlich der Verbesserung des Arbeitsablaufs von Verkehrsmanagementplänen untersucht. Die folgende Abb. 34 zeigt die Situation „Baustelle“ (Fahrstreifensperrung; reduzierte Kapazität abhängig von der Anzahl verbleibender Fahrstreifen) auf der Route von Luzern über Aarau nach Basel [A8; A2; A1; A3].



**Abb. 34:** Konturplot Luzern - Aarau - Basel mit Fahrstreifensperrung am Anschluss Aarau-West; Donnerstag (Baustelle)

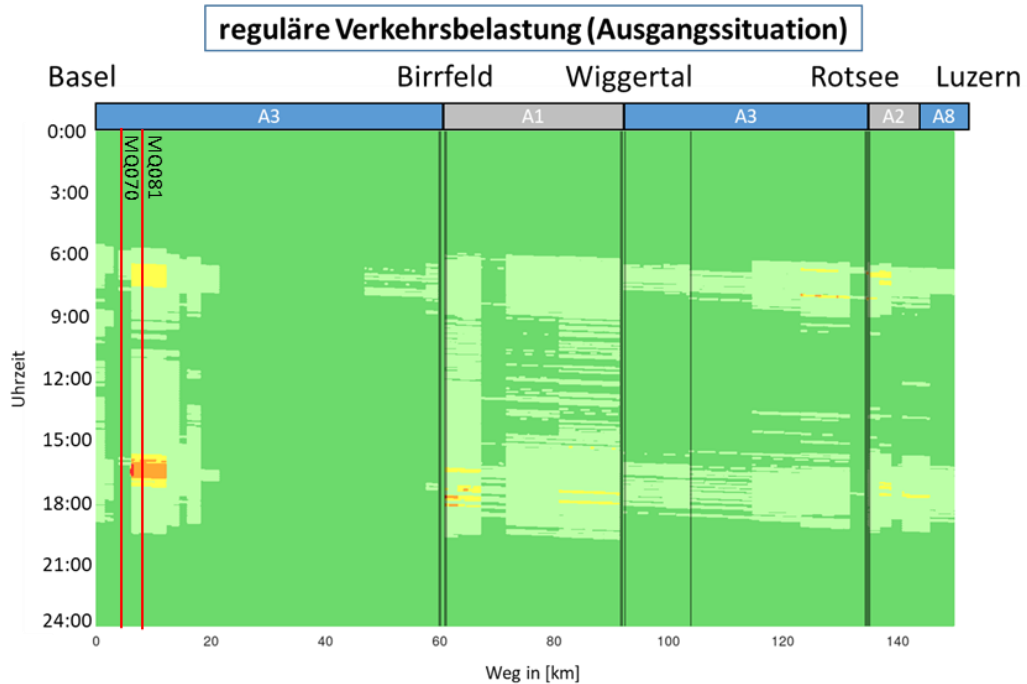
Für das Szenario wurde auf Höhe des Anschluss Aarau-West die Kapazität halbiert, wodurch ein Stau verursacht wird. Der nächstliegende Messquerschnitt (CH229) ist 7,8 Kilometer entfernt. Aufgrund der Entfernung wird der Stau am MQ erst nach ca. 54 Minuten detektiert. Allerdings muss erwähnt werden, dass in der Regel Störungen früher erfasst werden, wie beispielsweise durch Kamerabilder, Informationen durch die Polizei oder Staumelder. Im Modell wird im Gegensatz zu den herkömmlichen, automatisierten Erkennungsverfahren eine Rückstaulänge von einem Kilometer bereits nach ca. 10 Minuten vorhergesagt. Das betrachtete Szenario (Modellierung der baustellenbedingten Kapazitätsreduktion) bestätigt, dass baustellenbedingte Störungen im Verkehrsablauf durch das Modell frühzeitig erkannt und entsprechende präventive Massnahmen ergriffen werden können. Das CTM kann darüber hinaus die Auswirkungen schon bei der Planung einer baulichen Massnahme mit Sperrung einer oder mehrerer Fahrstreifen durch Modellierung einer entsprechenden Kapazitätsreduktion auf das stromaufwärtsliegende Netz abbilden. In diesem Fall reduziert das CTM für die Dauer der Kapazitätseinschränkung die vorhandene Kapazität z.B. abhängig von der verbleibenden Fahrstreifenanzahl, ggf. mit weiter kapazitätseinschränkenden Faktoren abhängig von der Baustellensituation (z. B. Auswirkung der reduzierten Fahrstreifenbreite oder von Verschwenkungen).

Die zweite untersuchte Situation wird durch plötzlich auftretende Verkehrsbehinderungen wie Unfälle hervorgerufen, welche durch naheliegende Messquerschnitte oder Kamerabilder erfasst sowie durch die zuständige Kantonpolizei gemeldet werden. Abb. 35 zeigt die Auswirkung eines Unfalls am Anschluss Aarau-West auf der Route von Luzern über Aarau nach Basel [A8; A2; A1; A3]. Durch die bewusst gewählte (grosse) Entfernung von 7,8 km zwischen der Unfallstelle und dem nächstliegenden Messquerschnitt (CH229) würden etwa 27 Minuten bis zu einer MQ-bezogenen Detektion vergehen. Im Gegensatz dazu erfasst das CTM bei Modellierung des Unfalls in Form einer erfassten Kapazitätsreduktion eine Rückstaulänge von einem Kilometer bereits nach 5 Minuten, wodurch präventive Massnahmen ergriffen werden können. Eine Meldung durch die Kantonpolizei oder Kamerabilder hängt von verschiedenen Faktoren ab und dauert in der Regel auch mehr als 5 Minuten.



**Abb. 35:** Konturplot Luzern - Aarau - Basel mit Verkehrsüberlastung am Anschluss Aarau-West verursacht durch einen Unfall; Donnerstag

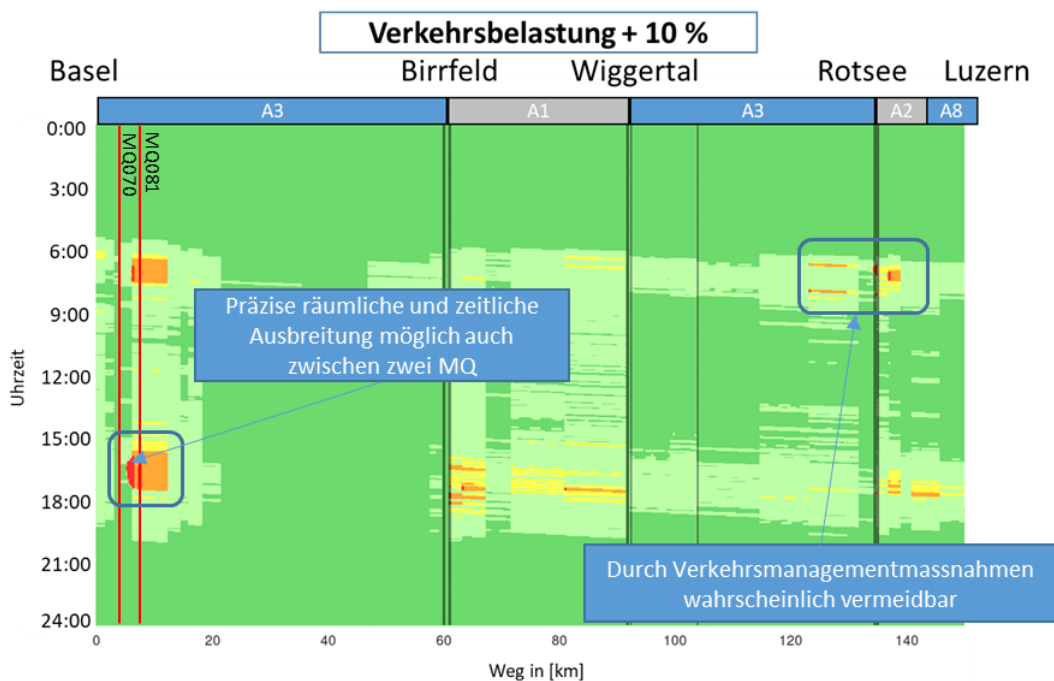
Des Weiteren kann der Operator unmittelbar mit Hilfe des Verkehrsmodells, ausgehend vom Unfallort, die Staufortpflanzungsgeschwindigkeit sowie die Auslastung des nahe liegenden Streckennetzes bestimmen und frühzeitig verkehrliche Massnahmen einleiten. Für die Ermittlung der Staugeschwindigkeit werden aktuell zwei aufeinanderfolgende Messquerschnitte benötigt, weil für die Berechnung sowohl die Entfernung der Messquerschnitte als auch die benötigte Ausbreitungszeit zwischen den Messquerschnitten erforderlich ist. Damit kann bei einer hohen Staufortpflanzungsgeschwindigkeit die Massnahme angepasst oder vorgelagert werden, bevor der Stau stromaufwärts den dritten Messquerschnitt passiert.



**Abb. 36:** Konturplot Basel - Aarau - Luzern; Donnerstag (Ausgangssituation)

Zuletzt wurde die Situation „Verkehrsüberlastung durch Zunahme der Verkehrsnachfrage“ untersucht. Hierfür wurde zunächst die aktuelle Ausgangssituation des Konturplots Basel – Aarau – Luzern [A3; A1; A3; A2; A8] betrachtet (vgl. Abb. 36). Dabei zeigte sich, dass es sowohl vormittags als auch nachmittags zu Verkehrsstärken nahe der Streckenkapazität kommt, die mit der gewählten Parametrierung sogar zu kleinen Stauungen führen können.

Aus Abb. 37 ist zu entnehmen, dass durch die in diesem Fall um 10% erhöhte Verkehrsnachfrage Verkehrsstörungen entstehen und sich die Störungen der Ausgangssituation stärker ausprägen. Die neuen leichteren Störungen sind durch gezielte verkehrliche Massnahmen potenziell vermeidbar. Des Weiteren zeigt das vorliegende Beispiel, dass aufgrund der Entfernung zwischen den Messquerschnitten die räumliche und zeitliche Störungsausbreitung ohne Modell nicht präzise abgebildet werden kann. Damit können durch den Operator proaktiv verbesserte Massnahmen nach dem VMP geschaltet werden. Zudem kann das Verkehrsmodell bei vorhersehbaren Überlastungen (z.B. durch Ereignisse o.ä.) herangezogen werden und mittels Prognose eine Grundlage für die Aktivierung hinterlegter verkehrlicher Massnahmen bieten (s. Kapitel 8.2).



**Abb. 37:** Konturplot Basel - Aarau – Luzern; Donnerstag (Vergleich)

## 8.2 Beurteilung und Nutzung der Prognosefähigkeit

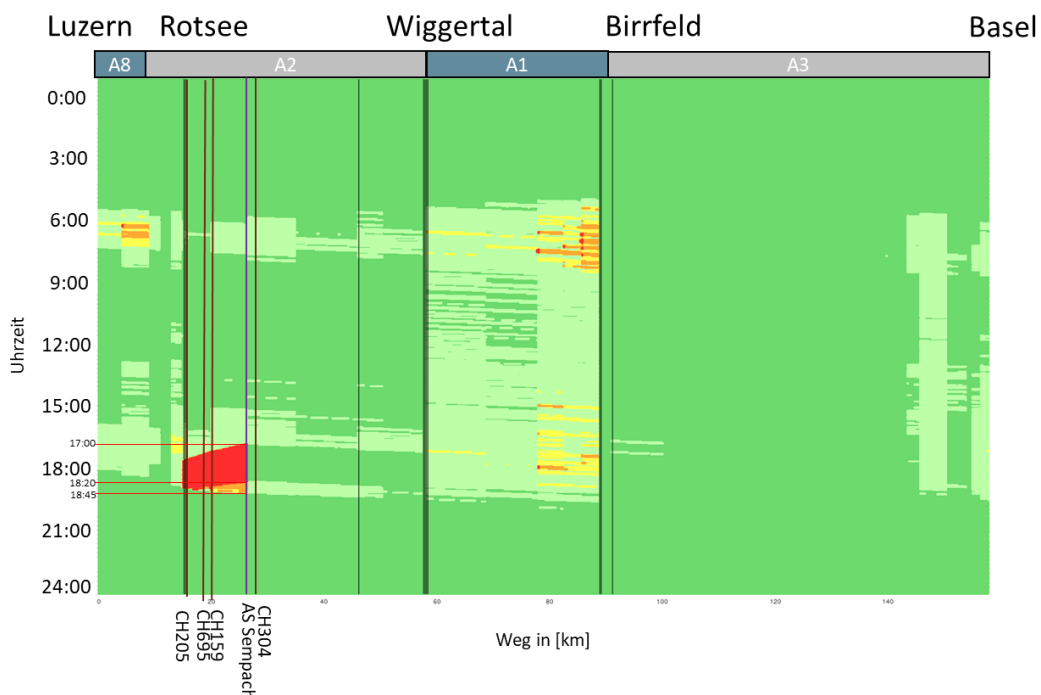
Bei der Prognose muss zwischen verschiedenen Prognosehorizonten unterschieden werden:

- Kurzfristig: Prognosehorizont bis 2 Stunden
- Mittelfristig: Prognosehorizont zwischen 2 Stunden und 1 Tag
- Langfristig: Prognosehorizont ab einem Tag

Das entwickelte Modell eignet sich für alle Prognosehorizonte. Allerdings können Störungen, verursacht durch unvorhersehbare Verkehrereignisse wie beispielsweise durch einen Unfall, nicht mittelfristig oder langfristig prognostiziert werden. Im Gegensatz dazu lassen sich Störungen, verursacht durch vorhersehbare Ereignisse wie beispielsweise Arbeitsstellen sowohl kurzfristig als auch mittel- und langfristig mit dem Modell prognostizieren. Zudem ist die Prognosegenauigkeit des Modells von der Datengrundlage abhängig. Je vollständiger und aktueller die Datengrundlage, desto zuverlässiger ist die Prognose. Das aktuell vorliegende Modell beruht auf drei Kalenderwochen des Kalenderjahres 2019, weshalb sich damit zum Beispiel die verkehrlichen Auswirkungen des Urlaubsverkehrs nicht abbilden lässt. Allerdings ist eine solche Prognose mit Einbindung weiterer Verkehrsdaten und entsprechender Modellkalibration aus anderen Zeiträumen möglich.

Im Hinblick auf die Prognosefähigkeit des CTM wurden ein Vergleich zwischen den Konturplots des Verkehrsmodells und den Messquerschnittsdaten (Rohdaten) durchgeführt. Hierfür wurden zunächst die folgenden vier Störungen (z.B. Unfallereignisse) aus dem Meldungs-Report der Kalenderwoche (KW) 16 ausgewählt:

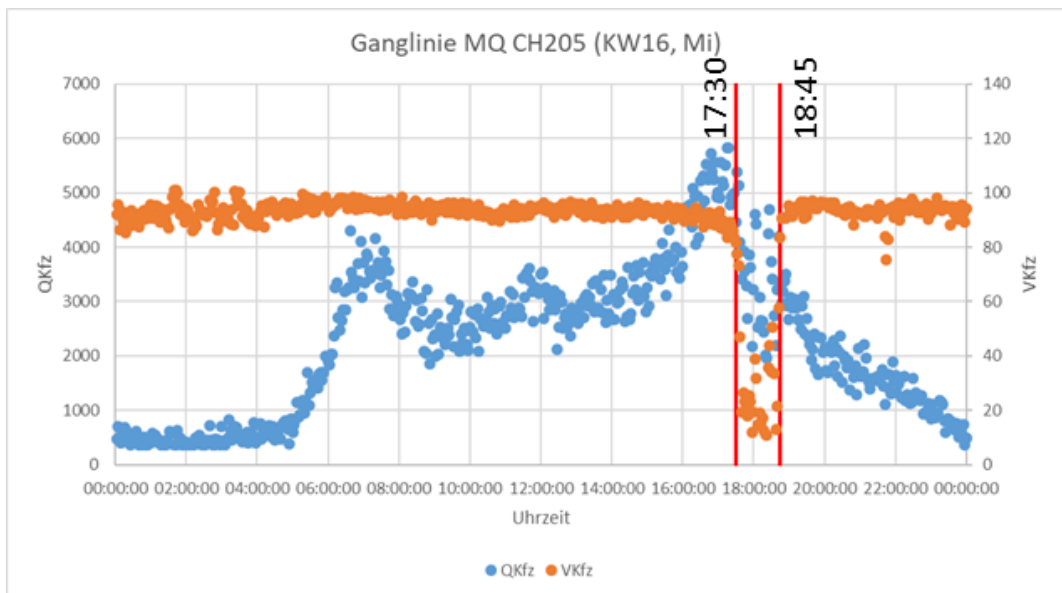
1. Unfall zwischen Anschluss Dagmersellen und Reiden am Montag, den 15.04.19
2. Unfall zwischen Anschluss Aarau-West und Anschluss Aarau-Ost am Dienstag, den 16.04.19
3. Unfall zwischen Anschluss Rothenburg und Anschluss Sempach am Mittwoch, den 17.04.19
4. Unfall zwischen Anschluss Sempach und Raststätte Luzern-Neuenkirch am Mittwoch, den 17.04.19



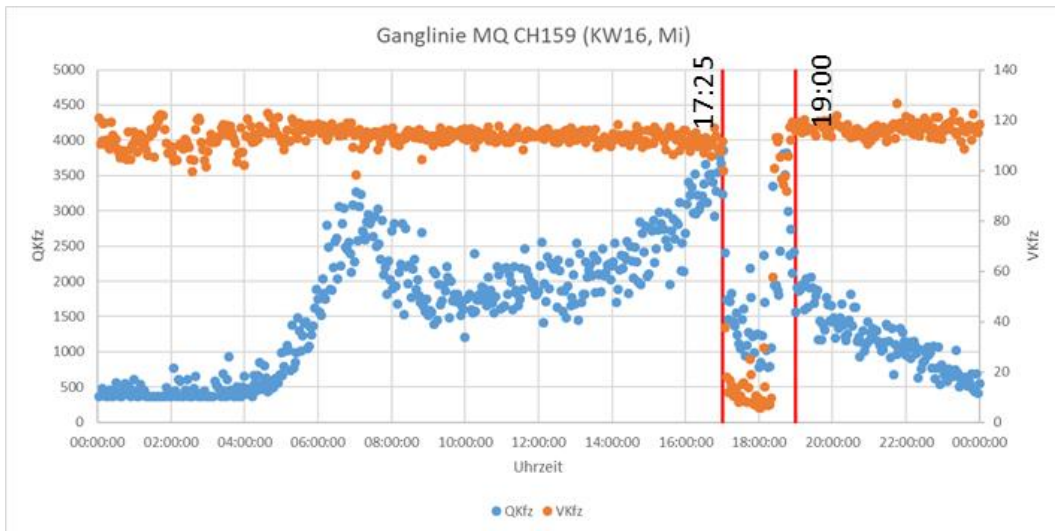
**Abb. 38:** Konturplot Luzern-Aarau-Basel; KW13-KW15 2019

Die Auswertung der vier Störungsereignisse zeigte ähnliche Ergebnisse, weshalb im Folgenden ausschliesslich die Auswertung des Unfalls zwischen Anschluss Rothenburg und Anschluss Sempach in Fahrtrichtung Basel am Mittwoch, den 17.04.19 beispielhaft beschrieben wird.

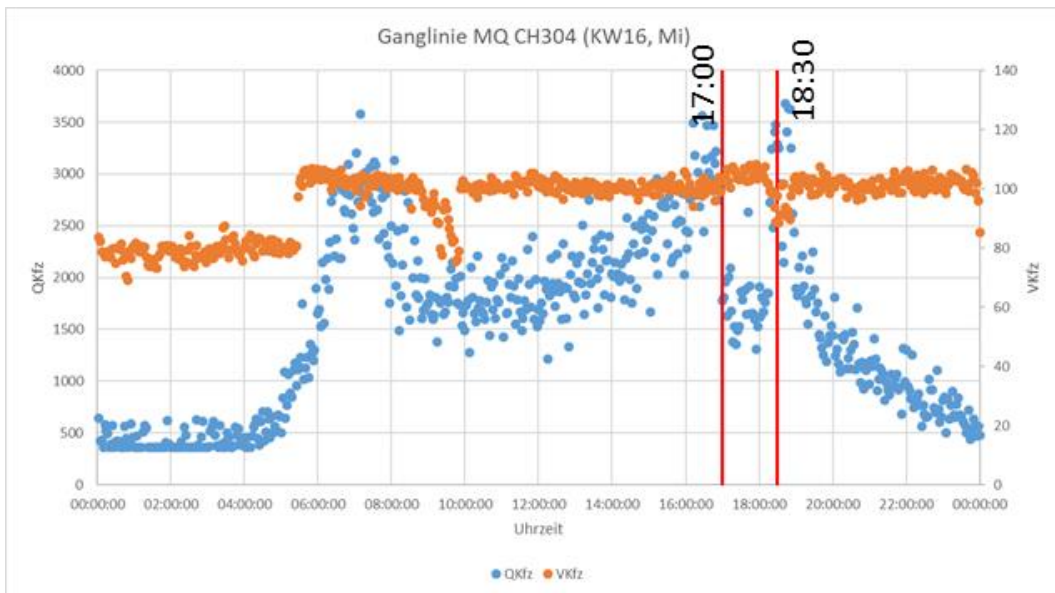
Ein Unfall mit Fahrstreifensperrung führte laut Meldungs-Report zu einer Störung von 17:15 Uhr bis 19:00 Uhr. Zunächst wurde die Störung auf dem Streckenabschnitt von Luzern nach Basel [A8; A2; A1; A3] mittels CTM auf Basis der KW13-15 dargestellt (vgl. Abb. 38). Hierfür wurde die Kapazität im Bereich des Anschluss Sempach von 4100 Kfz/h auf 1800 Kfz/h zwischen 17:00 Uhr und 18:45 Uhr reduziert. Die angenommene Reduzierung auf 1800 Kfz/h konnte aus der Ganglinie des MQ CH304 (nach der Unfallstelle) abgelesen werden (vgl. Abb. 41). Neben dem MQ304 liegen im Bereich der Störung die Messquerschnitte CH159, CH695 und CH205. Dem Konturplot (Abb. 38) ist zu entnehmen, dass durch die Kapazitätseinschränkung ein Rückstau entsteht, welcher sich über alle Messquerschnitte erstreckt. Des Weiteren kann der zeitliche Verlauf der Störung abgelesen werden. Vergleich man die visualisierte Störung des CTM mit den Ganglinien der Messquerschnitte (vgl. Abb. 39; Abb. 40; Abb. 41) zeigt sich, dass das Modell den Störungsverlauf zeitlich und räumlich ähnlich prognostiziert. Allerdings zeigt dieses Beispiel im CTM keine Verkehrsbeeinträchtigung nach der Störungsstelle (Ausbreitung des Staus in Fahrtrichtung). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das CTM für vorhersehbare Ereignisse, wie beispielsweise Störungsereignisse, zuverlässige Prognosen liefert.



**Abb. 39:** Ganglinie für den MQ CH205 (KW16; Mi)



**Abb. 40:** Ganglinie für den MQ CH159 (KW16; Mi)



**Abb. 41:** Ganglinie für den MQ CH304 (KW16; Mi)

### 8.3 Überführung des CTM in die Praxis

Die Nutzung des CTM als zusätzliches «Offlinemodul» in der Praxis in einer Verkehrszentrale ermöglicht verschiedene Anwendungsmöglichkeiten. Neben dem hauptsächlichen Verwendungszweck der Unterstützung des Verkehrsmanagements kann es beispielsweise auch für die Entwicklung und Evaluierung neuer Verkehrsmanagementpläne herangezogen werden. Im Folgenden werden die aktuellen Unterstützungsmöglichkeiten des Modells im Hinblick auf das Verkehrsmanagement zusammengefasst und aufgezeigt sowie Bereiche benannt, in denen das Modell weiterentwickelt werden kann. Kursiv markierte Massnahmen lassen sich mit weiteren Anpassungen des Modells umsetzen.

- Verkehrsinformationen ohne Empfehlung
- Umleitung
- Tunnelsperrung temporär
- *Tunnelsperrung, Überleitung mit Gegenverkehr*
- Gelbblinken des Tunnels

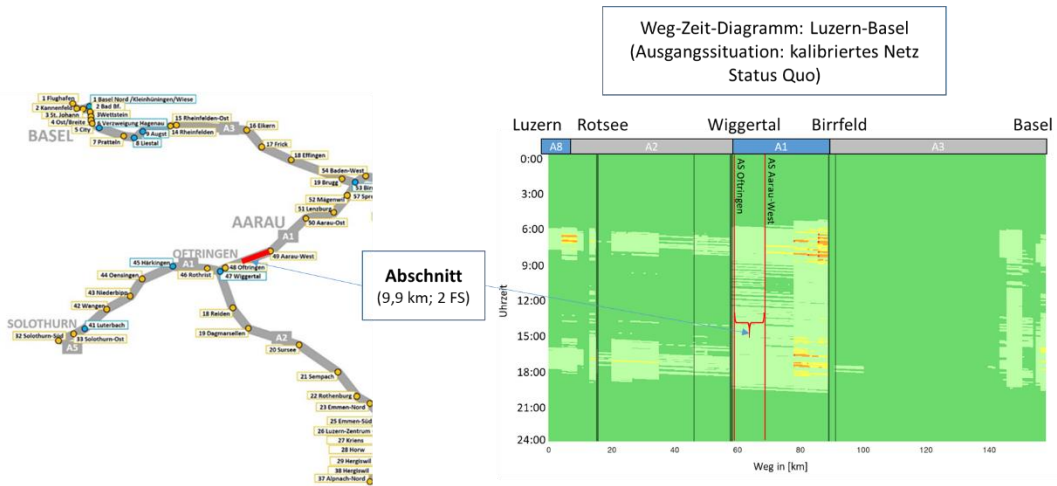
- Stauwarnung
- Geschwindigkeitsreduktion
- *Fahrstreifensperrung*

Diese Massnahmen sowie die Verkehrsprognose lassen sich aktuell mit der «Offlineversion» des Modells umsetzen. Eine Liveanbindung des Modells in einer Verkehrszentrale wäre ebenfalls denkbar. Dann lassen sich beispielsweise Aktivierungs- und Deaktivierungsbedingungen des VMP (Triggerbedingung) an das CTM knüpfen, welche dann nicht mehr manuell mit der «Offlineversion» des CTM nachgebildet werden müssten. Mit der Aktivierung bzw. Deaktivierung von Schwellenwerten von VMPs könnten dem Operator direkt die Kamerabilder oder Verkehrsdaten eingeblendet werden. Damit erhält der Operator einen Überblick über die Verkehrssituation und kann diese entweder verifizieren oder ablehnen. Für den Fall, dass der Operator die vorliegende Verkehrssituation bestätigt, wird eine entsprechende Massnahme aus dem VMP durch das CTM vorgeschlagen und nach Zustimmung des Operators geschaltet. Gleiches gilt für den Fall, dass eine Deaktivierungsbedingung erfüllt wird. Dann kann der Operator über ein eingeblendetes Fenster die Deaktivierung annehmen oder sich später die Situation erneut anzeigen lassen und erneut entscheiden. Dabei ist zu beachten und auch vom CTM zu berücksichtigen, dass sich VMPs gegenseitig ausschliessen können, wenn beispielsweise auf der Alternativroute schon ein anderer VMP aktiv ist. Hierzu sind entsprechende Regeln zu definieren und zu hinterlegen.

Das Modell kann durch die Liveanbindung sowie unter Berücksichtigung historischer Daten mittels Kurzfristprognose die Entwicklung des Verkehrs innerhalb der nächsten zwei Stunden modellieren und verschiedene Massnahmen bewerten. Für die Anbindung an die aktiven Verkehrsrechner sind jedoch einige Voraussetzungen zu erfüllen. Das CTM kann ausschliesslich Verkehrsdaten kompletter Querschnitte nutzen. Es ist erforderlich, dass das gesamte Strassennetz des Untersuchungsraumes (in diesem Fall das Nationalstrassennetz der Schweiz) in das Modell eingepflegt wird und nicht, wie bislang in diesem Projekt, nur ein reduziertes Netz. Auch die dauerhafte Aktualisierung der sog. „Standardtage“ ist erforderlich, wobei an dieser Stelle zu beachten ist, dass die „Standardtage“ des Modells in diesem Projekt auf nur drei Wochen beruhen. Für die Definition von „Standardtagen“ ist es darüber hinaus sinnvoll, diese über mehrere Wochen hinweg zu ermitteln, wobei Feier- und Ferientage gesondert betrachtet werden müssen. Im Hinblick auf die Schweiz sind unterschiedliche Feiertags- und Ferienregelungen je Kanton zu beachten, was die Ermittlung von „Standardtagen“ erschwert. Resultierend stellt die Anwendung und Pflege des CTM neben dem Betrieb zusätzliche Arbeitsaufwände dar und erfordert ggf. Schulungsmassnahmen.

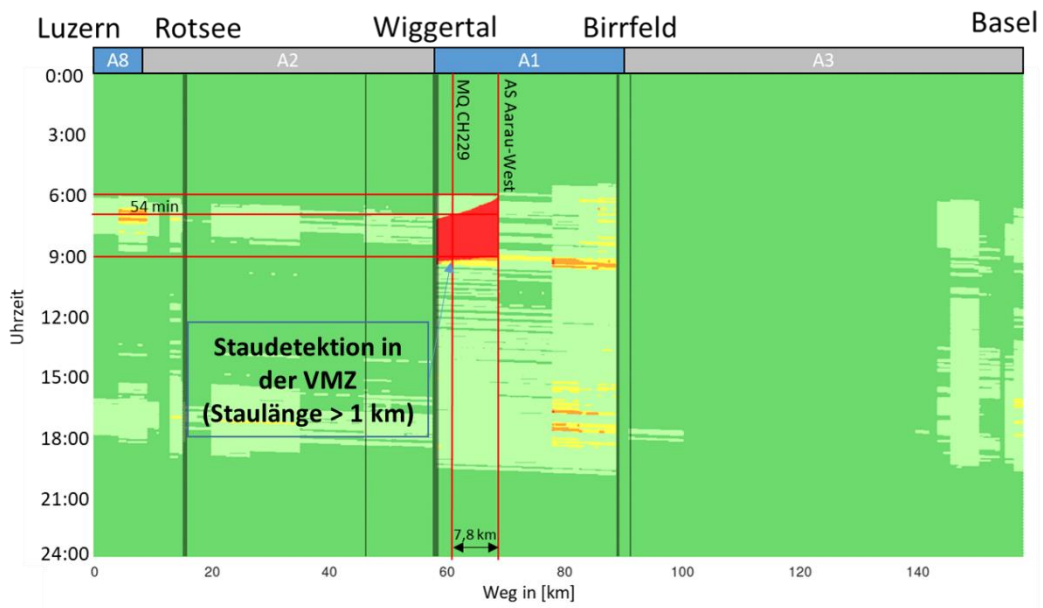
Ein Arbeitsablauf mit dem entwickelten Modell könnte dabei folgendermassen aussehen. Als Beispiel wird hier eine erhöhte Verkehrsbelastung auf dem Streckenabschnitt der A1 zwischen Oftringen und Aarau West (von Anschluss Nr. 48 nach Nr. 49) angenommen (vgl. Abb. 42):





**Abb. 42:** Übersicht des beispielhaften Streckenauszugs

Dieser Streckenabschnitt weist eine Kapazität von 3400 Kfz/h und eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h auf. Nun wird die Kapazität zur künstlichen Erzeugung einer Verkehrsüberlastung auf dem letzten Segment auf 2100 Kfz/h reduziert. Durch diese Reduktion der Kapazität zwischen 6 und 9 Uhr ergibt sich, wie in Abb. 43 dargestellt, die nachfolgende Störung:



**Abb. 43:** Konturplot Luzern - Aarau - Basel mit Fahrstreifensperrung am Anschluss Aarau-West; Donnerstag (Baustelle)

Der Abstand der Engstelle bis zum MQ beträgt 7,8 km. In diesem Fall dauert es theoretisch 54 min, bis die Messstelle CH229 den Rückstau detektiert. Wie schon in Kapitel 8.2 erwähnt, werden Rückstaus i.d.R. früher erkannt und gemeldet. Da das CTM u.a. von Daten der Messstellen (historisch/live) abhängig ist, kann das Modell unvorhersehbare Rückstaus im Vergleich zur konventionellen Vorgehensweise nicht vorzeitig erkennen. Dafür sind zwingend gemessene Daten des Messquerschnitts notwendig. Mit der Annahme, dass der Stau schon nach 10 min gemeldet wird, kann mit dem CTM zusätzlich die Staufortpflanzungsgeschwindigkeit modelliert werden und abhängig von der prognostizierten Staulänge die Auswirkung der möglichen Massnahmen auf den Verkehr darstellen.

Aktuell werden im Allgemeinen bei der Detektion von Stau zunächst sogenannte Sofort-Massnahmen (SoMa) geschaltet, wenn die Rückstaulänge grösser als 1 km und zunehmend ist. Diese Massnahme wird angewandt, um den Verkehr vorab bzgl. der Stausituation zu warnen. Hier kann das CTM präzise die Reisezeitunahmen sowie die Staulänge modellieren.

Im nächsten Schritt sind die vorliegende Verkehrssituation, also das Ausmass des Staus, sowie die Verkehrsführung, die Ursache und der Ortsbezug zu ermitteln. Dabei ist es notwendig, dass das Ausmass (Staulänge in km und Reisezeitunahme in min) dauerhaft aktualisiert wird. Der MQ erlaubt nur punktuelle Verkehrsinformationen, während das CTM den gesamten Streckenabschnitt modellieren kann und somit präzisere Verkehrsdaten liefert.

Im Anschluss werden die Aktivierungsbedingungen der Umleitungsrouten geprüft. Im konventionellen Fall muss der Operator entscheiden, wann und für welche Umleitungsrouten die Aktivierungsbedingungen erfüllt werden. Das Verkehrsmodell kann den Operator unterstützen und die Aktivierungsbedingungen von Anfang an überprüfen sowie zusätzlich die Auswirkungen auf das umliegende Autobahnnetz im Falle einer Aktivierung modellieren. Für den Fall, dass eine Umleitungsrouten aktiviert wird, muss ggf. in eine andere SoMa gewechselt werden. Dabei ist auch die stetige Kontrolle der Rücknahme- bzw. Deaktivierungsbedingungen nötig. Hinzu kommt die laufende Überprüfung, ob ergänzende Massnahmen geschaltet werden müssen. Im Regelfall übernimmt diese Aufgaben der Operator. Das CTM kann an dieser Stelle die Grundlage für die Überprüfung liefern und dem Operator auf ausgelöste (De-)Aktivierungsbedingungen hinweisen und damit die Entscheidungen des Operators zu bestimmten Massnahmen stützen.

## 8.4 Weitere Nutzungsmöglichkeiten

Basierend auf den Ergebnissen wird in Tab. 5 der Betrieb von Verkehrsmanagementplänen mit und ohne Verkehrsmodell verglichen.

**Tab. 5:** Vergleich des Betriebs von Verkehrsmanagementplänen mit und ohne Verkehrsmodell

Ohne Modell (Status Quo)	Mit Modell
keine lückenlose Verkehrsdatenerfassung möglich	zeitliche und räumliche Informationslage präziser und lückenlos
Ungewissheit über die „Trigger“ (Rückstaulänge, Prognose, ...)	Rückstaulängen, -lage und -dauern prognostizierbar
Permanente Überwachung mehrerer Streckenabschnitte notwendig <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterbrechung des Monitorings durch mehrere Aufgabenbereiche (Telefonat, Monitoring, VMP, etc.)</li> </ul>	Unterstützung der Operatoren durch automatisierte Verfahren (Entlastung) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fokussierung durch Semi-Automatik möglich</li> <li>• dauerhaftes Monitoring minimieren</li> </ul>
Entscheidungen müssen oft auf Basis subjektiver Kriterien erfolgen, da es keine objektiven Quellen vorliegen (Verantwortung)	Objektive Entscheidungshilfe für Operatoren (Verantwortungsfrage klären)

Darüber hinaus können zusätzliche Nutzungsmöglichkeiten des Modells für die Operatoren in der Verkehrsrechnerzentrale relevant sein. Diese werden im Folgenden zusammengefasst:

- Bei der Abschätzung des Ausmasses von Stauereignissen können weitere Datenquellen wie beispielsweise Floating Car Data herangezogen und in das Modell integriert werden. Diese können zur Validierung der modellierten (Live-) Verkehrsdaten verwendet werden.
- Durch zusätzliche Anpassungen hinsichtlich der Verkehrsnachfragemodellierung ist es möglich, regelmässig auftretende Staus z.B. durch Berufsverkehr zu prognostizieren.

- Eine weitere Nutzungsmöglichkeit des CTM ist die Interpolation bzw. Ersatzwertbildung von Verkehrsdaten, für den Fall, dass ein MQ ausfällt. Mit den vom defekten MQ aus nächstgelegenen stromauf- und abwärtsgelegenen MQs sowie mit der Berücksichtigung historischer Daten können die Verkehrsdaten rund um den ausgefallenen MQ modelliert werden.
- Ein zusätzlicher Aspekt für weitergehende Nutzungsmöglichkeiten des CTM ist das Abschätzen von Auslastungen auf Umleitungsstrecken bedingt durch dort aktive VMP. Aktuell lassen sich die Auswirkungen von VMP-bedingten Umleitungsempfehlungen auf Umleitungsrouten nicht prüfen. Mit einer Liveanbindung des Systems können auch Überlastungen auf Umleitungsrouten je nach VMP abgeschätzt werden, um bspw. eine Aktivierung eines VMPs auf der Alternativroute zu verhindern. Dieser Aspekt wird in Kapitel 9.1.2 diskutiert.

Das CTM bietet eine Grundlage für ein flächendeckendes Monitoring des nationalen Autobahnnetzes und kann mit Überwachung der einzelnen Segmente eine proaktive Unterstützung der Operatoren bei der Überwachung des Verkehrs und dem Schalten von Massnahmen bieten.

## 9 Konzepte zur Ergänzung fehlender Nachfragedaten und zur Abbildung dynamischen Routenwahlverhaltens

Aus dem Verlauf des hier dokumentierten Vorhabens ergaben sich Ansatzpunkte dafür, die entwickelte Modelllandschaft zu ergänzen. Diese Ergänzungen könnten zum Ziel haben,

- das Modell zur Abbildung der Verkehrsnachfrage bei einer lückenhaften Datengrundlage robuster zu machen und
- die Abhängigkeit der Verkehrsnachfrage vom aktuellen Verkehrsgeschehen im Netzkontext abzubilden.

Für beide Punkte gibt es ähnliche grundsätzliche Ansätze wie beispielsweise

- das Hinzuziehen von Flottendaten (FCD) oder
- die Kopplung mit Daten aus einem Planungsmodell,

die beide sowohl Anhaltspunkte zur Aufteilung von Verkehrsströmen an Knotenpunkten als auch für die nach Kanten differenzierte Verkehrsnachfrage in einem Netz liefern können.

Flottendaten sind oft schwer zu beschaffen. Zusätzlich enthalten sie in mancherlei Hinsicht verzerrte Informationen, weil Lkw und Fahrzeuge mit hoher Verkehrsleistung in der entsprechend ausgestatteten Flotte überrepräsentiert sind. Planungsmodelle liegen nicht für beliebige Netzzuschnitte vor. Ausserdem liegt ja ein wesentlicher Vorteil der entwickelten Modelllandschaft darin, neben den lokalen Daten keine weiteren Anforderungen an die Datenbeschaffung beispielsweise hinsichtlich Soziodemographie oder Strukturdaten zu haben.

### 9.1 Flottendaten (FCD) – Potenziale und Ansätze zur Integration

Von Fahrzeugen mit Zeitbezug übertragene Positionsdaten und Geschwindigkeiten enthalten wertvolle Informationen über den Verkehrsfluss in einem Strassennetz. Diese als Floating Car Data (FCD) bekannten Flottendaten repräsentieren stets aber nur einen gewissen Anteil des gesamten Fahrzeugkollektivs, weswegen die enthaltenen Informationen derzeit nur einer Stichprobe von erfahrungsgemäss fünf bis zehn Prozent aller Fahrzeuge entsprechen. Auswertungen haben mehrfach gezeigt, dass Lkw in dieser Stichprobe überrepräsentiert sind. Zudem gilt es als wahrscheinlich, dass hochwertige Pkw ebenso überrepräsentiert sind, da sie anteilig häufiger entsprechende Ausstattungsmerkmale aufweisen und grössere jährliche Laufleistungen haben. Damit geht wiederum einher, dass Fahrten mit längeren Strecken in der Datengrundlage für FCD stärker vertreten sind, als es ihrem eigentlichen Anteil am Verkehrsaufkommen entspricht.

FCD in ihrer Rohform können räumlich-zeitlich beliebig fein aufgelöst werden und erlauben die Rekonstruktion von Routen, sofern eine Fahrzeug- oder Geräte-ID mit den Positions- und Geschwindigkeitsdaten übertragen oder abgelegt wird. Die Aufbereitung der Rohinformationen ist algorithmisch durchaus anspruchsvoll. Zahlreiche Online-Verkehrsdienste zeigen aber, dass Datenübertragung und -aufbereitung innerhalb kurzer Zeit gelingen können, so dass abrufbare Verkehrslageinformationen und Routenempfehlungen auf hochaktuellen FCD basieren.

### 9.1.1 Potenziale von FCD zur verbesserten Abbildung der Verkehrsnachfrage

Aufgrund der Tatsache, dass FCD nur einen kleinen Anteil der Fahrzeuge in einem Strassennetz repräsentieren, ist ihr Potenzial zur verbesserten Verkehrsnachfragemodellierung eher gering. Die Unsicherheiten, die bei der Hochrechnung auf einen modellierten Gesamtverkehr eingegangen würden, werden grösser eingeschätzt als bei den einfachen Ersatzwertverfahren gemäss Kapitel 4.4 oder bei Berücksichtigung von Daten aus Planungsmodellen gemäss Kapitel 9.2.2. In der Konsequenz wird die Berücksichtigung von FCD bei der Verkehrsnachfragemodellierung fürs CTM nicht als ein zielführender Ansatz eingestuft.

### 9.1.2 Verkehrsverlagerungen - Potenziale von FCD zu ihrer Erkennung und zu ihrer Abbildung im CTM

Werden unter Einbeziehung von Fahrzeug- oder Geräte-IDs bei der Analyse von FCD auch Routen rekonstruierbar, so können die Routen und ihre Verteilung im Netz zu Zeiten einer Störung im Netz mit denen abgeglichen werden, die zu Zeiten freien Verkehrsflusses erhoben wurden. Die Ergebnisse dieses Abgleichs könnten dazu herangezogen werden, die Verkehrsstromaufteilungen insbesondere an den Knotenpunkten in der gemäss Kapitel 4 modellierten Verkehrsnachfrage im Fall einer aufkommenden Störung anzupassen. Die dabei auftretenden Herausforderungen werden in den nachfolgend genannten Punkten vermutet:

- Tritt ein Engpass im Netz auf, muss bekannt sein, wie er sich quantitativ auf die verbleibende Kapazität auswirkt, um daraus resultierende Verkehrsverlagerungen adäquat schätzen zu können (vgl. Kapitel 9.1.3).
- Ebenso ist die Dauer einer Störung sowie die zeitliche Entwicklung des Informationsflusses zu den Verkehrsteilnehmern zu berücksichtigen, um die Verlagerungseffekte bei einem CTM-Prognosehorizont von beispielsweise zwei Stunden belastbar modellieren zu können.
- Je geringer die Verlagerungen sind, beispielsweise mit wachsender Entfernung vom Streckenabschnitt mit Engpass, umso stärker ist damit zu rechnen, dass die FCD-Stichprobe am Gesamtverkehrsaufkommen das veränderte Routenwahlverhalten nicht mehr korrekt repräsentiert. Für diesen Fall sind geeignete Kriterien zum Abbruch der Modellierung von Verkehrsverlagerungen zu identifizieren.
- Sollen historisch beobachtete Verlagerungsmuster bei aktuellen Störungen des Verkehrsflusses zur Modellierung von Verkehrsverlagerungen herangezogen werden, bedarf es einer Vielzahl historischer Störungen, um daraus belastbar Rückschlüsse für die Verkehrsverlagerungen bei einer aktuellen Störung ziehen zu können.
- Die Überrepräsentanz von Pkw mit hohen jährlichen Laufleistungen und von Lkw unter den analysierten Routen muss bedacht werden.

### 9.1.3 Potenziale von FCD zur Störungserkennung und zur Kapazitätsschätzung in Engpässen

Die schnelle Erkennung von Störungen des Verkehrsflusses und ihre genaue Lokalisierung sind die primäre Domäne von FCD. Sie ermöglichen beispielsweise, dass Navigationssysteme wenige Minuten nach Eintreten eines Engpasses angepasste Routenempfehlungen ausgeben. Daten von lokalen Messquerschnitten, wie sie bei Autobahnbetreibern beispielsweise zum Betrieb einer GHGW herangezogen werden, sind hier klar im Nachteil.

Je früher im CTM ein Engpass abgebildet wird, umso besser gelingt die Modellierung der verkehrlichen Folgen. Schon damit sind Potenziale von FCD bei Kopplung mit einem CTM vorhanden. Neben der blossen Erkennung spielt für das CTM aber auch eine Rolle, wie stark die Kapazität am Engpass sinkt. FCD können dafür einen Anhaltspunkt liefern: Ist die zeitbezogene Anzahl der FCD-Flottenfahrzeuge z.B. in 5-Minuten-Intervallen für einen typischen Dienstag auf einem Streckenzug bekannt und wird sie unmittelbar stromabwärts eines aktuell erkannten Engpasses an einem anderen Dienstag erfasst, so kann der

Unterschied unter Berücksichtigung üblicher Verkehrsstärken zur Modellierung der verbleibenden Kapazität herangezogen werden. Dies ist zwar auch unter Verwendung lokaler Messdaten möglich – aber nur dann, wenn auch Messstellen in ausreichender Dichte vorliegen. Liegt zwischen Engpass und der nächsten Messstelle eine Anschlussstelle, so liefern die FCD einen relevanten Vorteil.

Somit kann konstatiert werden, dass ein CTM von einem FCD-Einsatz zur Störungserkennung und zur Kapazitätsschätzung in Engpässen profitieren würde.

## 9.2 Daten aus Planungsmodellen – Potenziale und Ansätze zur Integration

Zu Planungszwecken wird basierend auf sozioökonomischen Daten und Strukturdaten mit vier aufeinander aufbauenden Teilmodellen für jede Kante in einem abgebildeten Netzausschnitt die in einem Zeitschritt vorherrschende Verkehrsmenge modelliert. Anhand der vier Stufen

- Verkehrserzeugung,
- Verkehrsverteilung,
- Verkehrsmittelwahl und
- Routenwahl

werden die Anzahl der Fahrten und ihre Aufteilung auf Quelle-Ziel-Beziehungen im Netz, auf verfügbare Verkehrsmittel sowie auf Routen im Netz rechnerisch – und vorzugsweise iterativ – ermittelt. Neben den zeitabhängigen Kantenbelastungen werden auch Reisezeiten modelliert. Damit liegt ein vollständiger Datensatz zur Abbildung der Verkehrsnachfrage im Netz vor – mit den Einschränkungen, dass

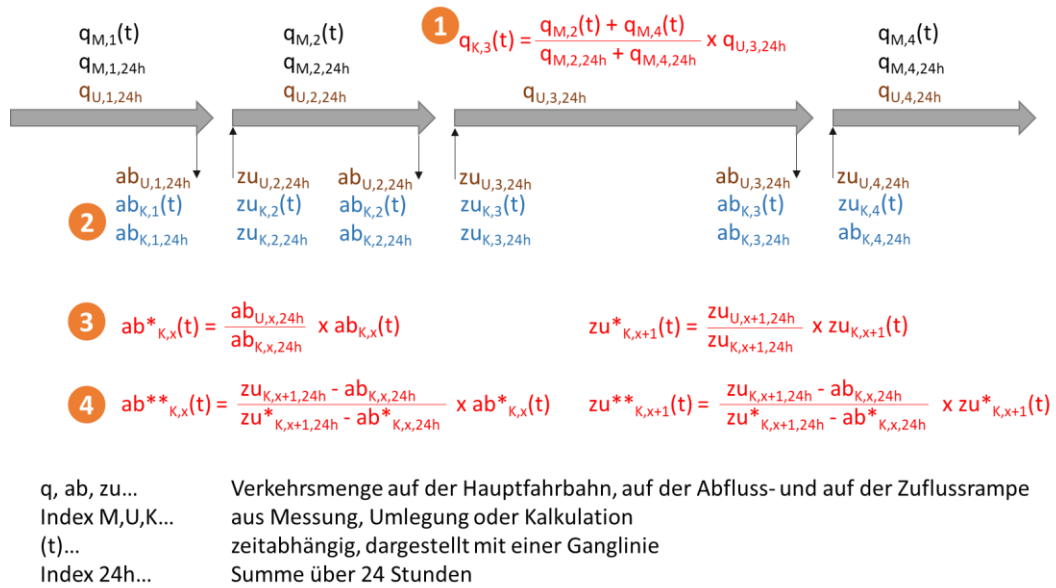
- er modellhaft ermittelt wurde,
- er in aller Regel einen typischen Belastungsfall und weniger ein Einzelereignis abbildet und
- bei einem üblichen räumlichen Umgriff auch bei aufwändiger Kalibrierung Zugeständnisse hinsichtlich Detaillierung und Übereinstimmung mit der Realität in Kauf genommen werden müssen.

Mit diesen Eigenschaften weisen die Daten aus einem Verkehrsplanungsmodell Potenziale dafür auf, im CTM die Datengrundlage hinsichtlich der Verkehrsnachfrage robuster zu gestalten und Verlagerungseffekte infolge verkehrlicher Ereignisse abzubilden.

### 9.2.1 Daten aus Planungsmodellen zur verbesserten Abbildung der Verkehrsnachfrage im entwickelten Cell Transmission Model

Im entwickelten CTM wird die Verkehrsnachfrage mit Zu- und Abflüssen an Anschlussstellen abgebildet, die unter Verwendung plausibel gewählter Zu- und Abflussraten aus den Verkehrsstärken stromauf- und stromabwärts der jeweiligen Anschlussstelle ermittelt werden (vgl. Kapitel 4.6). Im Verlauf des Forschungsvorhabens zeigte sich, dass nicht für jeden Abschnitt zwischen zwei Anschlussstellen Verkehrsmessungen vorliegen. Das gilt ebenso für Rampen im Bereich von Knotenpunkten, an denen Verkehrsstärken zur Quantifizierung der Verkehrsstromaufteilungen ebenso eingehen. Diesem Umstand wurde im Projektverlauf mit der Ermittlung von Ersatzwerten begegnet (vgl. Kapitel 4.4). Daten aus Planungsmodellen wie dem NPVM weisen grosse Potenziale auf, sowohl bei der Ersatzwertermittlung als auch bei der Ermittlung der verwendeten Zu- und Abflussraten Verbesserungen erzielen zu können.

Abb. 44 stellt einen Ansatz zur Integration von Daten aus Planungsmodellen in das entwickelte CTM dar, der nachfolgend erläutert wird.



**Abb. 44:** Ansatz zur Integration von Daten aus Planungsmodellen in das entwickelte CTM

Die grauen Pfeile stellen Abschnitte jeweils zwischen zwei Anschlussstellen im Zuge einer Autobahn dar. Dabei wird nur eine Fahrtrichtung betrachtet. Die schwarzen Pfeile bilden die Zu- und Abflussrampen ab. Die Kenngrößen in schwarzen Lettern entstammen der Datengrundlage (Index M für Messung), die in die Nachfragemodellierung gemäss Kapitel 4 eingehen – wobei (t) auf zeitlich veränderliche Kenngrößen im Sinne einer Ganglinie hinweist und der Index 24h für 24-Stunden-Werte steht. Die braunen Kenngrößen sind das Ergebnis der Umlegung (Index U) gemäss des Nationalen Personenverkehrsmodells.

Im beispielhaften Netz fehlt für die nachfolgenden Modellschritte die Verkehrsstärkeganglinie im dritten Abschnitt. Sie kann unter Verwendung des Werts aus der Umlegung im Schritt 1 (weisse Schrift auf orangefarbener Kreisfläche) verbessert geschätzt werden, wobei im Beispiel die Ganglinie qualitativ aus den qualitativen Ganglinien der Streckenabschnitte davor und dahinter gemittelt wird.

Im zweiten Rechenschritt werden die Zu- und Abflüsse (blaue Kenngrößen) zunächst gemäss Kapitel 4.6 modelliert. Auf der Grundlage der Belastungswerte aus der Umlegung werden sie im Rechenschritt 3 in einer ersten Stufe mit einer Skalierung verbessert, bevor in Rechenschritt 4 die Werte so korrigiert werden, dass sich die Verkehrsmenge stromabwärts einer Anschlussstelle wieder aus der Verkehrsmenge stromaufwärts abzüglich Ab- und zuzüglich Zufluss an der Anschlussstelle ergibt.

Die in den Schritten 1, 3 und 4 ermittelten Kenngrößen (rote Lettern) verbessern die Abbildung der Verkehrsnachfrage im CTM auf der Grundlage der Ergebnisse aus dem schweizweiten Verkehrsplanungsmodell gegenüber den einfachen Ersatzwertverfahren gemäss Kapitel 4.4 und gegenüber der Zu- und Abflussermittlung gemäss Kapitel 4.6, die mitunter auf Plausibilitätsabwägungen zurückgreift.

### 9.2.2 Daten aus Planungsmodellen zur Abbildung von Verlagerungseffekten bei Störungen des Verkehrsflusses

Wird im CTM ein Engpass modelliert, der zu einem Stau führt, resultieren daraus bei Einsatz der Teilmodelle gemäss Kapitel 4 keine Verkehrsverlagerungen auf Alternativrouten. Solche Verkehrsverlagerungen führen in der Realität nicht nur dazu, dass der Stau infolge des Engpasses weniger ausgeprägt ist. Zusätzlich können sie auf Alternativrouten zu Überlastungen und damit zu weiteren Staus führen. Es ist wünschenswert, beide Effekte bei Abwägungen über Massnahmen des Verkehrsmanagements berücksichtigen zu können. Insofern stellt sich die Frage, ob durch die Kopplung des CTM mit Daten aus einem Planungsmodell wie dem NPVM Verlagerungseffekte auch im CTM abbildbar sind.

Das Ausmass von Verkehrsverlagerungen ist von vielen Parametern abhängig, wie z.B.

- von der örtlichen Lage der Störung,
- vom Startzeitpunkt der Störung,
- von der Dauer der Störung oder
- von der verbleibenden Kapazität im Engpass.

Damit ist es nicht zielführend, einige Störfälle im Netz beispielhaft im Planungsmodell zu simulieren und nachfolgend die Verlagerungseffekte im CTM statisch zu hinterlegen, um dann im Störfall das bestgeeignete Verlagerungsmuster zu berücksichtigen – zu vielfältig sind die relevanten Störungsmuster. Ein weiterer Ansatz könnte ein reduziertes Planungsmodell vorsehen, das lediglich den Netzausschnitt des CTM berücksichtigt und damit schneller wird sowie potenziell einfacher zu verknüpfen wäre. Ein solches reduziertes Netz könnte aber Verlagerungen ins nachgeordnete Netz nicht abbilden, denen aber ein relevanter Anteil an der Summe aller Verlagerungen zuzuschreiben ist.

So setzt letztlich die Integration von Daten aus der Verkehrsumlegung voraus, dass die Umlegung vollständig durchlaufen wird und die Ergebnisse nachfolgend in den Nachfragedaten des CTM so hinterlegt werden, dass die neuen Routeninformationen umfänglich hinterlegt sind – ein Ansatz, der wie die zuvor genannten Fragen aufwirft: Das beschriebene Vorgehen ist methodisch wie zeitlich sehr aufwändig. Es ist zumindest sehr herausfordernd, ein Umlegungsmodell so auszugestalten, dass es in eine Online-Anwendung sinnvoll eingebunden werden kann:

- Es ist ein wesentlicher Vorteil des CTM, eben nicht auf eine so umfangreiche Datengrundlage angewiesen zu sein wie ein Verkehrsplanungsmodell. Dieser Vorteil ginge bei einer vorgegebenen Kopplung mit einem solchen Planungsmodell verloren.
- Wenn das Planungsmodell vollständig durchläuft und dabei Verkehrsverlagerung feststellt, hat es bereits die Störungen errechnet, was bei Einsatz eines CTM eigentlich Aufgabe des CTM ist – heisst, das CTM wäre obsolet.
- Die oben genannten Parameter sind online schwer zu erheben. So ist beispielsweise die Dauer einer Störung oft nicht absehbar, während die Störung noch andauert. Damit fehlen auch dem Planungsmodell wichtige Informationen, die erforderlich sind, um das Ausmass von Verlagerungseffekten mit einem Prognosehorizont von z.B. zwei Stunden plausibel zu modellieren. Das würde zusätzlich voraussetzen, dass die Dynamik, mit der die Routenwahl der Verkehrsteilnehmer abhängig von ihrem Informationsstand bezüglich Störungsmeldungen erfolgt, im Modell hinterlegt wird. Dies wird als methodisch kaum lösbar eingestuft – zumindest nicht in einer Art und Weise, die Vorteile gegenüber fundierten Annahmen erfahrener Fachleute offensichtlich nachweisen kann.



### 9.3 Mögliche nächste Schritte

Mit den Abwägungen aus den Kapiteln 9.1 und 9.2 könnten nächste Schritte darauf zielen,

- Verkehrsmengen aus einem Planungsmodell zur verbesserten Modellierung der Verkehrsnachfrage und
- C-ITS Daten wie z.B. FCD in einer (Quasi-)Online-Anwendung zur Störungserkennung oder zur Quantifizierung der verbleibenden Streckenkapazität bei einer Störung

ins CTM einzubinden.

Die modellhafte Abbildung von Verkehrsverlagerungen im Netz wird als besonders herausfordernd eingestuft. Die besten Aussichten für eine Online-Anwendung werden hier mit dem Einsatz von FCD erwartet. Alternativ könnte zur Abschätzung von Verkehrsverlagerungseffekten eine grössere Menge von Störfällen analysiert werden: Dabei könnten Richtwerte ermittelt werden, mit denen die Streckenkapazitäten im Umfeld einer Störung positiv oder negativ beaufschlagt werden, um somit den Effekten von Verkehrsverlagerungen im Hinblick auf die Ausprägung zusätzlicher Störungen entgegenzuwirken. Gemäss Maier [14] können sie für initiale Störungen oft mit 10 bis 15 % bezogen auf die verbleibende Kapazität erwartet werden, daraus abgeleitet für Alternativrouten mutmasslich bei 0 bis -15 %, bei Alternativrouten mit geringer Kapazität eventuell auch bis zu -30 %. Es muss aber damit gerechnet werden, dass in Einzelfällen wie beispielsweise bei mehrstündigen Vollsperrungen derartige Durchschnittswerte die tatsächlichen Effekte merklich unterschätzen.

## 10 Fazit und Ausblick

Für die intelligente Verkehrssteuerung, -leitung und -lenkung auf dem Nationalstrassennetz ist eine zuverlässige und umfassende Information über die aktuelle Verkehrslage essenziell. Das CTM vervollständigt das zeitlich hoch aufgelöste, räumlich jedoch sehr lückenhafte Verkehrslagebild des Strassennetzes und bietet daher die Möglichkeit, die Operatoren im Verkehrsmanagement zusätzlich zu unterstützen.

Das verwendete Netzmodell setzt sich aus fahrtrichtungsbezogenen Streckenabschnitten sowie Knotenpunkten zusammen. Dabei wird das untersuchte Netz in Zellen mit einer einheitlichen Länge von 250 m gegliedert. Diese ergibt sich aus der durchschnittlichen, initial festgelegten, modellierten Zeitschritten von 10 s sowie der ebenso initial festgelegten Fahrtgeschwindigkeit von 90 km/h. Davon abweichende Geschwindigkeiten können mit anderen Zellenlängen auch innerhalb desselben Netzmodells abgebildet werden. Knotenpunkte werden durch Verknüpfungen der Streckenabschnitte modelliert.

Als Datengrundlage für die Verkehrsnachfragemodellierung werden Einzelfahrzeugdaten der KW 13 bis 15 aus dem Jahr 2019 von Messquerschnitten innerhalb des untersuchten Netzausschnitts herangezogen. Die Verkehrsnachfrage wird dabei in der vorgesehenen Modellumgebung durch Zu- und Abflüsse an Netzrändern und Anschlussstellen initialisiert, die aus den Querschnittsdaten abgeleitet werden. Die Streckenkapazitäten im Netzmodell werden mit Hilfe der vorliegenden Verkehrsdaten von Januar bis Juni 2019 den einzelnen Zellen des CTM zugewiesen. Diese werden bis zur nächsten Anschlussstelle bzw. zum nächsten stromabwärts gelegenen Messquerschnitt angewendet.

Beim angewandten Verkehrsflussmodell bildet sich ein Rückstau, wenn die Anzahl an Fahrzeuge in einer Zelle höher liegt als die Zahl der Fahrzeuge, die unter Beachtung der Kapazität innerhalb eines Zeitschritts in die nächste Zelle wechseln können. Der Rückstau innerhalb einer Zelle kann nur aus so vielen Fahrzeugen bestehen, wie es sich aus der Zellenlänge, der Fahrstreifenanzahl und einer parametrierbaren durchschnittlichen fahrzeugbezogenen Aufstelllänge ergibt. Befinden sich mehr Fahrzeuge in einem Stau, als eine Zelle aufnehmen kann, breitet sich der Stau auf die nächste stromaufwärtige Zelle aus. Die Kapazität der stromaufwärtigen Zelle wird auf den Wert der stromabwärtigen gesetzt. An Anschlussstellen zufahrende Fahrzeuge können im Modell alle einfahren – Rückstaus im nachgeordneten Netz gibt es also im Modell nicht, dafür verlängern sich modellierte Rückstaus im Autobahnnetz. Erst wenn die Anzahl der Fahrzeuge zellenbezogen wieder unter den Wert fällt, der der eigentlichen Kapazität dieser Zelle entspricht, hat sich der Stau in der Zelle wieder aufgelöst, so dass dieser Zelle wieder ihre ursprüngliche Kapazität zugewiesen werden kann. Darüber hinaus ist das Modell in der Lage, Verkehrsströme auch in geschlossenen Netzmaschen abzubilden.

Die Validierung des Modells zeigt, dass auf Basis der vorliegenden Daten im Hinblick auf die Zielsetzung des Projekts das Modell seinen Zweck erfüllt. Es bildet den Verkehr mit der eingegebenen (pseudo-online) Nachfrage aus der Kalenderwoche 16 im Jahr 2019 sinnvoll ab und erzeugt auch den verdichteten Verkehr bzw. die Staus an der jeweils indizierten Stelle plausibel.

Das grösste Potenzial des CTM bietet die Kurzfristprognose mit einem Zeithorizont von beispielsweise zwei Stunden. Auch wenn die Datengrundlage lückenhaft ist, können bestimmte Verkehrssituationen wie Baustellen, Unfälle sowie Überlastungen mit dem Modell nachgebildet und die Auswirkungen dieser Situationen auf den Verkehr modelliert werden, sofern die resultierende Kapazitätseinschränkung bekannt ist. Bei einer optimierten Nachfragemodellierung wäre das CTM auch im Stande, regelmässig auftretende Störungen wie Berufs- oder Ferienverkehre mit Hilfe von historischen Daten zu prognostizieren. Mit Hilfe dieser Modellierung kann der Operator Massnahmen des Verkehrsmanagements proaktiv und gezielt anwenden, um weitere Störungsfälle zu vermeiden. Der Operator kann die Einflüsse von bestimmten Schaltbildern sowie von vorgegebenen Massnahmen der Verkehrsmanagementpläne auf den Verkehr nachbilden, wodurch eine massgebliche Entscheidungshilfe geschaffen wird. Das Modell wird dabei

aktuell als zusätzliches Offline-Tool verwendet, kann aber unter bestimmten Voraussetzungen in das Livesystem angebunden werden.

Die Analyse verschiedener Situationen zeigt, dass die zeitliche und räumliche Informationslage mit dem CTM deutlich präzisiert wird, wodurch eine Aktivierung oder Deaktivierung der Verkehrsmanagementpläne objektiv und ggf. sogar präventiv basierend auf einer erheblich verbesserten Informationslage sowie der Prognosefähigkeit des Modells erfolgen kann. Damit können Verkehrsteilnehmer bei Abklingen von Störungsereignissen auch wieder früher auf die Haupttrouten geleitet werden.

Weitere Anwendungsbereiche des Modells sind die Erstellung und Evaluierung von VMP sowie die Vervollständigung von Verkehrsdaten. Das Modell, welches im Rahmen des Projektes lediglich auf einem Ausschnitt des Hochleistungsstrassennetzes der Schweiz und einem Zeitraum von drei Kalenderwochen basiert, kann auf das gesamte Netz ausgeweitet und auf weitaus längere Zeiträume kalibriert werden. Auch eine spätere Anwendung im Hauptverkehrsstrassennetz ist denkbar. Dabei sind insbesondere die Schnittstellen im Übergangsbereich zwischen den Hochleistungsstrassen bzw. deren Anschlussstellen und dem nachgelagerten Lokalstrassennetz von Interesse, da sich dort häufig verkehrliche Probleme als Folge der Kapazitätsdivergenzen zwischen den Hochleistungsstrassen und dem städtischen Netz ergeben. Als Weiterentwicklungsmöglichkeit des Modells können FCD und weitere Verkehrsdatenarten offline und online eingebunden werden, um das Modell zu validieren und ggf. zu kalibrieren. Für den Fall, dass das Verkehrsmodell an das Live-System der Verkehrszentrale angebunden wird, wäre es durch weitere Anpassungen in der Lage, Aktivierungs- und Deaktivierungsbedingungen von VMPs zu überwachen und Massnahmen unmittelbar zu bewerten. Zusätzlich können bei einer Liveanbindung des Systems auch Überlastungen auf Umleitungsrouten je nach VMP abgeschätzt werden, um beispielsweise die Aktivierung von VMPs auf Alternativrouten zu verhindern.

Zusammenfassend zeigt sich, dass auf Basis der vorliegenden Nachfragedaten das CTM im Hinblick auf die gesetzten Zielsetzungen hervorragend arbeitet. Es kann als zusätzliches Modul zur Modellierung von Verkehrsstörungen wie Baustellen, Unfälle usw. oder zur Evaluierung von VMP herangezogen werden, bietet aber auch zusätzliche Anpassungsmöglichkeiten. Neben der Prognose von regelmässig auftretenden Störungen, wie durch Berufsverkehr, wäre unter anderem auch weiterführende Entwicklungen, wie z.B. eine Live-Anbindung an die Verkehrszentrale oder eine Live-Validierung durch weitere Daten wie z.B. FCD möglich.

## Glossar

Begriff	Bedeutung
Alternativroute <i>itinéraire bis</i>	Alternative zu einer Stammroute. Die Stammroute bleibt befahrbar.
BSA EES	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA) <i>équipements d'exploitation et de sécurité (EES)</i>
BZ <i>plan de feux</i>	Betriebszustand (BZ) Bezeichnet den Signalisationszustand; beziehungsweise die Anzeigen auf mehreren zusammengehörenden Aktoren.
CEN	Europäisches Komitee für Normung (CEN)
KLZ	Kantonale Leitzentrale (KLZ) <i>centrale cantonale de gestion du trafic (KLZ)</i>
RDS-TMC	Radio Data System – Traffic Message Channel (RDS-TMC)
SN	Schweizer Norm (SN)
SSV OSR	Signalisationsverordnung (SSV) <i>Ordonnance sur la signalisation routière (OSR)</i>
Stammroute <i>itinéraire de base</i>	Signalisierte Route, wo der Betriebszustand der Grundzustand ist.
Umleitungsrout <i>itinéraire de déviation</i>	Umleitung zu einer Stammroute. Die Stammroute ist nicht mehr befahrbar oder die Verlustzeit ist grösser als der Umweg über eine verfügbare Umleitungsrout.
VM-CH	Verkehrsmanagement in der Schweiz (VM-CH) <i>gestion du trafic en Suisse (VM-CH)</i>
VMP	Verkehrsmanagementplan (VMP) <i>plan de gestion de trafic (VMP)</i>
VMZ-CH	Verkehrsmanagementzentrale Schweiz (VMZ-CH) <i>centrale nationale suisse de gestion du trafic (VMZ-CH)</i>
RLZ	Regionale Leitzentrale (RLZ) <i>centrale régionale de gestion du trafic (RLZ)</i>
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)
WTA PMV	Wechseltextanzeige (WTA) <i>panneau à messages variables (PMV)</i>
WWW	Wechselwegweisung (WWW) <i>panneau de direction à indications variables (WWW)</i>

## Literaturverzeichnis

- 
- [1] F. Maier (2010), «**Abschnittsweise Regressionsanalyse zur Schätzung von Verkehrskenngrößen – Anwendung auf lokale Daten,**» Abschnittsdaten und Informationen aus Positionsmeldungen. Heft 13 in der Schriftenreihe des Lehrstuhls für Verkehrstechnik, Technische Universität München, 07. Mai 2010
- 
- [2] F. Maier (2011), «**Netzweite linkfeine Verkehrslageschätzung mit einem angepassten Regressionsansatz.**» Straßenverkehrstechnik 04/2011
- 
- [3] K. Nagel and M. Schreckenberg (1994), «**A cellular automaton model for freeway traffic.**» Journal de Physique I 2, Les Ulis Cedex A
- 
- [4] R. Wiedemann (1974), «**Simulation des Straßenverkehrs.**» Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe,
- 
- [5] M. Bell, C. Shield, F. Busch and G. Kruse (1997), «**Stochastic User Equilibrium Path Flow Estimator.**» Transportation Research, Part C, Vol. 5, Nr. 3/4,
- 
- [6] M. Hoops, F. Busch, R. Gloger and H. Keller (1999), «**NEMO, Netzmodellierung zur Erstellung eines Verkehrslageberichts in einem Strategie- und Service-Zentrum am Beispiel des Projektes Munich-COMFORT.**» Endbericht im Rahmen des Projektes LLAMD/Munich-COMFORT,
- 
- [7] F. Logi and M. Ullrich (2001), «**The Dynamic Network Model DINO: Documentation.**» Arbeitspapier, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, Technische Universität München,
- 
- [8] P. Vortisch (2006), «**Modellunterstützte Messwertpropagierung zur Verkehrslageschätzung in Stadtstraßennetzen.**» Dissertation am Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe
- 
- [9] W. Schnabel and D. Lohse (1997), «**Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung – Band 1.**» Verlag für Bauwesen, Berlin,
- 
- [10] M. Lighthill and G. Whitham (1955), «**On kinematic waves – II.**» A theory of traffic flow on long crowded roads. Proceeding of the Royal Society, London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 229, No. 1178
- 
- [11] C. Daganzo (1993), «**The Cell Transmission Model, Part I: A Simple Dynamic Representation of Highway Traffic.**»
- 
- [12] C. Daganzo (1994), «**The Cell Transmission Model: A Dynamic Representation of Highway Traffic Consistent with the Hydrodynamic Theory.**» Transportation Research Part B, Vol. 28, Nr. 4,
- 
- [13] C. Daganzo (1995), «**The Cell Transmission Model, Part II: Network Traffic.**» Transportation Research Part B, Vol. 29, Nr. 2,
- 
- [14] F. Maier and G. Reichert (2018), «**Integrierte Stauprognose bei mehreren Arbeitsstellen auf Autobahnen im Großraum München.**» Straßenverkehrstechnik 02/2018
- 
- [15] F. Maier (2018), «**Verkehrliche Effekte mehrerer Arbeitsstellen in einem Abschnitt des Autobahnnetzes.**» Vortrag bei den Aachener Straßenbau- und Verkehrstagen 2018, 23. November 2018
- 
- [16] J. Bauer, W. Schaufelberger, R. Schwarz, E. Bechstein, B. Alt, S. Lingwood, D. Morel and D. Stokar (2011), «**Verkehrsprognosen mit Online-Daten.**» Bericht zum Forschungsauftrag VSS 2007/905 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute
- 
- [17] C. Alecsandru, A. Quddus, K. C. Huang, B. Rouhieh, A. R. Khan and Q. Zeng (2011), «**An assessment of the cell-transmission traffic flow paradigm: Development and applications.**» In Proceedings of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting,
- 
- [18] Z. Liz and R. Tao (2011), «**An integrated freeway interchange control model based on enhanced cell transmission model.**» In Proceedings of the Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Number 11-2925.
- 
- [19] E. Papapanagiotou, A. Poschinger and M. Zeng (2013), «**CTM-based calculation of number of stops and waiting time.**» In Proceedings of mobil.TUM 2013 – International Scientific Conference on Mobility and Transport: ITS for Connected Mobility
- 
- [20] J. Rohde (2016), «**Modellerweiterungen des Cell Transmission Model (CTM) für städtische Hauptstraßennetze.**» Dissertation an der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
- 
- [21] V. Diegmann (2015), «**Prognose im umweltorientierten Verkehrsmanagement.**» Vortrag beim Kolloquium Luftqualität an Straßen 2015, Bergisch Gladbach, 04./05. März 2015
- 
- [22] C. Goves, R. North, R. Johnston and G. Fletchern (2016), «**Short Term Traffic Prediction on the UK Motorway Network Using Neural Networks.**» Transportation Research Procedia, Volume 13, Pages 184-195
-

- 
- [23] K. Y. Chan (2012), «**Neural-network-based models for short-term traffic flow forecasting using a hybrid exponential smoothing and Levenberg--Marquardt algorithm.** » IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems.
- 
- [24] N. G. Olson and V. O. Sokolov (2017), «**Deep learning for short-term traffic flow prediction.** » Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 79, June 2017, Pages 1-17.
- 
- [25] Rajendran, S. and B. Ayyasamy (2020), «**Short-term traffic prediction model for urban transportation using structure pattern and regression: an Indian context.**» SN Applied Sciences, 03 June 2020
- 
- [26] Bundesamt für Strassen ASTRA (2016), «**Richtlinie Verkehrsmanagement auf Nationalstrassen (Kopfrichtlinie VM-NS) – Verkehrstechnische Vorgaben.**» ASTRA 15003. Ausgabe V2.01
- 
- [27] Bundesamt für Strassen ASTRA (2018), «**Richtlinie Verkehrstechnische Regelungslogik – Funktionale Minimalanforderungen für Planung und Betrieb der Regelung von Verkehrsmanagement-Systemen zur Verflüssigung des Verkehrs.**» ASTRA 15019. Ausgabe V1.02
- 
- [28] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2005), «**Leitfaden Verkehrstelematik; Hinweise zur Planung und Nutzung in Kommunen und Kreisen,**» Forschungsprogramm Stadtverkehr, FE 70.708/2003
- 
- [29] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (2010), «**Effiziente Verkehrsabwicklung durch Alternativrouten – EVA;**» Straßenforschung. Heft 593
- 
- [30] Riegelhuth, G., Sandrock, M., Dreier, J. (2018), «**Verkehrsmanagement für Autobahnen – Aktuelle Entwicklungen aus Deutschland, Österreich und der Schweiz.**» <https://doi.org/10.1007/978-3-658-22140-9> . Springer Verlag
- 
- [31] ASTRA-Statistik (2019), «**Statistik Verkehrsentwicklung und Verkehrsfluss 2019**»
- 
- [32] VSS 40 018a (2019), «**VSS 40 018a Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit – Freie Strecken auf Autobahnen**» REG Norm.
- 
- [33] Geistefeldt, J. (2007), «**Verkehrsablauf und Verkehrssicherheit auf Autobahnen mit vierstreifigen Richtungsfahrbahnen**», Dissertation an Ruhr-Universität Bochum.
- 
- [34] HBS 2015, «**Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen**», FGSV e. V. Köln.
- 
- [35] Schwietering C., «**Verfahren zur Bestimmung der Einbruchswahrscheinlichkeit des Verkehrsablaufs auf Autobahnen und Anwendung in der Verkehrssteuerung**», Dissertation an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.
- 
- [36] BRILON, W., ZURLINDEN, H. (2003): «**Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen**»; Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 870, Bonn.
- 
- [37] TRAPP, R. (2008): «**Entwicklung und vergleichende Bewertung eines proaktiven Verfahrens zur Zuflussregelung**»; Straßenverkehrstechnik, Heft 12, Kirschbaumverlag, Bonn.
- 
- [38] Brilon, W., Regler, M., Geistefeldt, J.: «**Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen**», Strassenverkehrstechnik, Heft 3 (Teil 1) und Heft 4 (Teil 2) 2005
- 
- [39] MAIER, F., CUSTODIS, F.: «**Reisezeitmessungen zur Quantifizierung von Verfügbarkeitseinschränkungen auf einem Autobahnabschnitt**»; Straßenverkehrstechnik Heft 9 2016
-

# 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: 12.09.2022

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: VPT\_20\_00A\_01  
 Projekttitel: Einsatz eines Cell-Transmission-Modells in der Verkehrssteuerung  
 Enddatum: 05.09.2022

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Für die intelligente Verkehrssteuerung, -leitung und -lenkung auf dem Nationalstrassennetz ist eine zuverlässige und umfassende Information über die aktuelle Verkehrslage essenziell. Eine Möglichkeit zur flächendeckenden Rekonstruktion der aktuellen Verkehrslage sowie zur Ermittlung von Prognosen stellen Verkehrsflussmodelle dar. Diese sind unter Verwendung von Zu- und Abflüssen an den Netzknoten in der Lage, räumlich-zeitlich differenziert die Dynamik des Verkehrsgeschehens insbesondere auf Autobahnen und Fernstrassen abzubilden.

Ziel dieses Projektes war einerseits die Entwicklung und Implementierung eines prototypischen Modells zur verbesserten Verkehrslageschätzung und -kurzfristprognose sowie dessen Evaluierung anhand historischer Verkehrsdaten. Zusätzlich wurden Konzepte für Massnahmen des Verkehrsmanagements erarbeitet, die in Anbetracht der verbesserten Verkehrslageschätzung und -prognose positive Effekte auf Verkehrsfluss, -sicherheit und -emissionen haben können. Es wurde ein bestehendes Cell Transmission Modell (CTM) als makroskopisches Verkehrsflussmodell weiterentwickelt, das das zeitlich hoch aufgelöste, räumlich jedoch sehr lückenhafte Verkehrslagebild auf dem Strassennetz vervollständigen kann. Damit bietet das entwickelte Modell die Möglichkeit, die Operatoren im Verkehrsmanagement im Hinblick auf präventives Verkehrsmanagement oder Alternativroutensteuerung mittels Kurzfristprognose (z.B. bis ca. 2 h) zu unterstützen. Die Verkehrsnachfragemodellierung erfolgte auf Basis der gemessenen Einzelfahrzeugdaten eines dreiwöchigen Zeitraums an den vorhandenen Messstellen des untersuchten Netzes, die zu Zu- und Abflüssen an den Modellknoten und an Anschlussstellen aufbereitet werden. Für die prototypische Umsetzung lagen Verkehrsdaten von einem Ausschnitt des Schweizerischen Autobahnnetzes im Bereich zwischen Basel und Zürich sowie zwischen Luzern und Winterthur vor. Zur Kalibrierung wurden Daten aus drei aufeinander folgenden Kalenderwochen herangezogen.

Das Netzmodell, das das Verkehrsangebot abbildet, setzt sich aus fahrtrichtungsbezogenen Streckenabschnitten sowie Verknüpfungen im Bereich von Knotenpunkten zusammen. Die Streckenabschnitte werden in Zellen einheitlicher Länge gegliedert. Für die Validierung des Modells wurde eine weitere Kalenderwoche mit Verkehrsdaten herangezogen. Dabei wurde die tatsächliche Nachfrage mit der modellierten verglichen sowie einzelne überlastete Streckenabschnitte genauer im Hinblick auf die Abbildung des tatsächlichen Verkehrsgeschehens hin betrachtet.

Abschliessend wurden Einsatzmöglichkeiten für das entwickelte CTM beleuchtet: In der praktischen Anwendung entscheidet aktuell der Operator in der Verkehrsleitzentrale der Schweiz selbstständig mit Hilfe von Verkehrsdaten aus Messquerschnitten und Videokameras sowie aus Erfahrungswerten, ob und welche Massnahmen nach dem entsprechenden Verkehrsmanagementplan (VMP) geschaltet werden. Mit dem entwickelten Modell lassen sich für verschiedene Situationen wie Baustellen oder Unfälle, Massnahmen im Verkehrsmanagement sowohl genauer ableiten als auch die Auswirkungen der Störungen auf den Verkehr prognostizieren. Weitere Anwendungsbereiche des Modells sind die Erstellung und Evaluierung von VMP sowie die Vervollständigung von Verkehrsdaten für den Fall, dass einzelne Messstellen ausfallen. Im Fall einer weiterentwickelten Verkehrsnachfragemodellierung wäre es auch im Stande, regelmässig auftretende Störungen bei Berufs- oder Ferienverkehr zu prognostizieren.

Das CTM kann als zusätzliches Modul dem Operator in der Praxis als objektive Entscheidungshilfe dienen, indem es Situationen erkennt bzw. prognostiziert und Massnahmen mit der zugehörigen Aktivierung und Deaktivierung von Schaltungen räumlich und zeitlich präzise bewertet.



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Bundesamt für Strassen ASTRA

#### Zielerreichung:

Die wesentlichen Ziele des Forschungsvorhabens waren a) die Entwicklung und Implementierung eines prototypischen Gesamtmodells zur verbesserten Verkehrslageschätzung und -kurzfristprognose (2h), b) die Evaluierung des prototypischen Modells anhand historischer Verkehrsdaten und c) die Erarbeitung eines Konzepts für Massnahmen des Verkehrsmanagements, die in Anbetracht der verbesserten Verkehrslageschätzung und -prognose positive Effekte auf Verkehrsfluss, -sicherheit und -emissionen haben können. Diese Ziele konnten im Projekt erreicht werden. Es liegt für den Verkehrsraum Basel - Zürich - Luzern ein validiertes Verkehrsmodell vor, mit welchem eine Verkehrslageschätzung und -kurzfristprognose für Szenarien wie Baustellen oder Unfälle oder Sperrungen möglich ist. Die Einsatzmöglichkeiten im Verkehrsmangement wurde untersucht und anhand von Fallbeispielen erläutert.

#### Folgerungen und Empfehlungen:

Das CTM eignet sich für den Einsatz in der Kurzfristprognose mit einem Zeithorizont von beispielsweise zwei Stunden. Damit können bestimmte Verkehrssituationen wie Baustellen, Unfälle sowie Überlastungen mit dem Modell nachgebildet und die Auswirkungen dieser Situationen auf den Verkehr modelliert werden, sofern die resultierende Kapazitätseinschränkung bekannt ist. Bei einer optimierten Nachfragemodellierung wäre das CTM auch im Stände, regelmässig auftretende Störungen wie Berufs- oder Ferienverkehre mit Hilfe von historischen Daten zu prognostizieren. Mit Hilfe dieser Modellierung kann der Operator Massnahmen des Verkehrsmanagements proaktiv und gezielt anwenden, um weitere Störungsfälle zu vermeiden. Der Operator kann die Einflüsse von bestimmten Schaltbildern sowie von vorgegebenen Massnahmen der Verkehrsmanagementpläne auf den Verkehr nachbilden, wodurch eine massgebliche Entscheidungshilfe geschaffen wird. Das Modell wird dabei aktuell als zusätzliches Offline-Tool verwendet, kann aber unter bestimmten Voraussetzungen in das Livesystem angebunden werden. Weitere Anwendungsbereiche des Modells sind die Erstellung und Evaluierung von VMP sowie die Vervollständigung von Verkehrsdaten. Das Modell, welches im Rahmen des Projektes lediglich auf einem Ausschnitt des Hochleistungsstrassennetzes der Schweiz und einem Zeitraum von drei Kalenderwochen basiert, kann auf das gesamte Netz ausgeweitet und auf weitaus längere Zeiträume kalibriert werden. Auch eine spätere Anwendung im Hauptverkehrsstrassennetz ist denkbar. Dabei sind insbesondere die Schnittstellen im Übergangsbereich zwischen den Hochleistungsstrassen bzw. deren Anschlussstellen und dem nachgelagerten Lokalstrassennetz von Interesse, da sich dort häufig verkehrliche Probleme als Folge der Kapazitätsdivergenzen zwischen den Hochleistungsstrassen und dem städtischen Netz ergeben. Als Weiterentwicklungsmöglichkeit des Modells können FCD und weitere Verkehrsdatenarten offline und online eingebunden werden, um das Modell zu validieren und ggf. zu kalibrieren. Für den Fall, dass das Verkehrsmodell an das Live-System der Verkehrszentrale angebunden wird, wäre es durch weitere Anpassungen in der Lage, Aktivierungs- und Deaktivierungsbedingungen von VMPs zu überwachen und Massnahmen unmittelbar zu bewerten. Zusätzlich können bei einer Liveanbindung des Systems auch Überlastungen auf Umleitungsrouten je nach VMP abgeschätzt werden, um beispielsweise die Aktivierung von VMPs auf Alternativrouten zu verhindern.

#### Publikationen:

bislang keine

#### Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Schwietering

Vorname: Christoph

Amt, Firma, Institut: Schwietering Ingenieure GmbH

#### Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:





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:

Ziele des Forschungsprojektes waren auf der Grundlage der fundierten Kenntnis des Standes von Wissenschaft und Technik:

- die Entwicklung und auch reale Umsetzung eines Cell-Transmissions Modells, um damit die Verkehrslage besser abschätzen und entsprechende kurzfristige Verkehrsprognosen erstellen zu können
- die Analyse und Evaluierung des implementierten Cell-Transmissions Modells mittels historischer Verkehrsdaten,
- die Erarbeitung eines Konzepts für Massnahmen des Verkehrsmanagements, die mit Hilfe des Cell-Transmissions Modells einfacher anwendbar sind bzw. aufgrund verbesserter Datengrundlagen wie der verkehrlichen Kurzfristprognose zur Verbesserung der Verkehrsmanagement-Massnahmen beitragen können.

Diese Ziele konnten mit der vorliegenden Forschung erreicht werden.

Umsetzung:

Das Forschungsprojekt hat ein eigenes Cell-Transmission Modell für das Dreieck Basel - Luzern - Zürich aufgebaut. Das Netzmodell, das das Verkehrsangebot abbildet, setzt sich aus fahrtrichtungsbezogenen Streckenabschnitten sowie Verknüpfungen im Bereich von Knotenpunkten zusammen. Die Streckenabschnitte werden in Zellen einheitlicher Länge gegliedert. Auf Basis historischer Verkehrsdaten konnten mittels des Cell-Transmission Modells bestehende Lücken im Verkehrslagebild aufgelöst werden, was zu einer besseren Einschätzung der Verkehrslage beitragen kann. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass mittels eines solchen Modells verkehrliche Kurzfristprognosen bei bestimmten Ereignissen wie Strassensperren ermittelbar sind. Darüber hinaus wurde anhand von Beispielen die Einsatzmöglichkeiten im Verkehrsmanagement aufgezeigt.

weitergehender Forschungsbedarf:

Insbesondere die konkrete Anwendbarkeit im operativen Verkehrsmanagement sollte weiter verfolgt werden. Dazu zählt etwa die Live-Anbindung eines Cell-Transmission Modells an Echtzeitverkehrsdaten. Ziel soll dabei sein den Operatoren ein verbessertes Hilfsmittel zum Informieren, Leiten, Steuern und Lenken des Verkehrs zur Verfügung stellen zu können.

Einfluss auf Normenwerk:

keiner

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Pirkelbauer

Vorname: Sigrid

Amt, Firma, Institut: Bundesamt für Strassen, ASTRA

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: