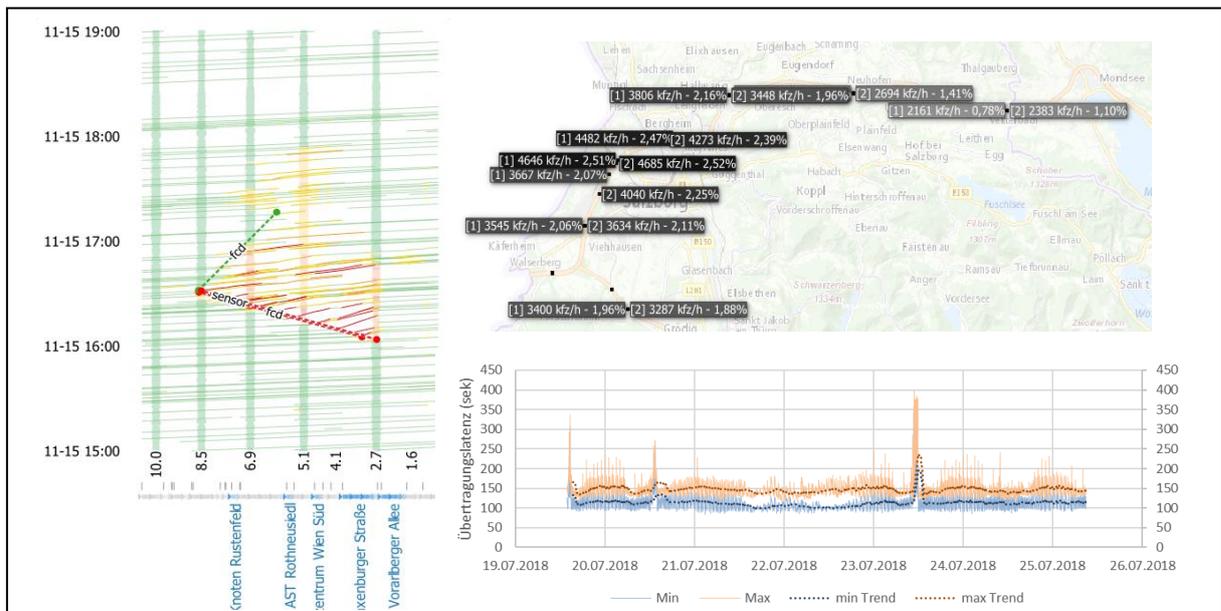


Ermittlung sinnvoller FCD- Durchdringungsgrade für das Autobahnen- und Schnellstraßennetz OptiFCD

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2016
(VIF2016)

August 2018



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A – 1030 Wien

 **Bundesministerium**
Verkehr, Innovation
und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Nordbahnstraße 50
A – 1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A – 1010 Wien

 **ASFINAG**

Für den Inhalt verantwortlich:

Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH
Jakob Haringer Straße 5/III
5020 Salzburg

 **salzburgresearch**

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

Ermittlung sinnvoller FCD- Durchdringungsgrade für das Autobahnen- und Schnellstraßennetz OptiFCD

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2016)

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl REHRL
Dipl.-Ing. Mag. Dr.techn. Richard BRUNAUER
Simon GRÖCHENIG, MSc
Dipl.-Ing. (FH) Stefan HENNEBERGER
Dipl.-Ing. Andreas WAGNER

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
ÖBB-Infrastruktur AG
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Salzburg Research Forschungsgesellschaft mbH

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	7
2	Arbeitspaket 2: Theoretische Grundlagen	9
2.1	Szenarien	10
2.1.1	Szenario „Stillstands-Detektion“	10
2.1.2	Szenario „Stau-Detektion“	11
2.2	Qualitätsanforderungen an (FCD-basierte) Verkehrsinformationen	11
2.2.1	Qualitätskategorien	12
2.2.2	Qualitätsparameter für die Szenarien	13
2.3	Stochastisches Modell zur Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden	13
2.3.1	Grundlagen	14
2.3.2	Anwendung in den Szenarien	16
2.3.3	Typische FCD-Durchdringungsgrade	21
2.3.4	Qualitätsparameter	24
2.4	FCD-Informationsverarbeitungsprozess	29
2.4.1	Collect	32
2.4.2	Assemble	36
2.4.3	Match & Analyse	38
2.4.4	Persist & Provide	42
3	Arbeitspaket 3: Berechnungen und Visualisierungen	45
3.1	Szenario „Stillstands-Detektion“	46
3.1.1	Stillstands-Detektion mit raumzeitlichem Clustering	47
3.1.2	Praktische Anwendung anhand von Testdatensätzen	49
3.1.3	Klassifikation der Stillstände	51
3.1.4	Vergleich zwischen Stillstands-Clustern und Motion Patterns	55
3.1.5	Interpretation und Schlussfolgerungen	58
3.2	Szenario „Stau-Detektion“	59

3.2.1	Berechnungsmethoden und Visualisierungen	60
3.2.2	Stauereignisse	63
3.2.3	Stauereignis 1: A1 – Westautobahn beim Knoten Linz.....	65
3.2.4	Stauereignis 2: A2 – Südatabahn beim Knoten Vösendorf.....	68
3.2.5	Stauereignis 3: S1 - Wiener Außenring Schnellstraße	73
3.2.6	Stauereignis 4: A4 – Ostautobahn bei Neusiedl am See.....	78
3.2.7	Stauereignis 5: A12 – Inntalautobahn bei Zirl.....	82
3.2.8	Stauereignis 6: A10 – Tauernautobahn vor Hieflertunnel	87
3.2.9	Stauereignis 7: A22 – Donauuferautobahn in Wien.....	92
3.2.10	Stauereignis 8: A7 – Mühlkreisautobahn durch Linz.....	96
3.2.11	Stauereignis 9: A23 – Südosttangente	100
3.2.12	Interpretation und Schlussfolgerungen.....	104
3.3	Österreichweite Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden	113
3.4	Fahrzeitvergleich FC-Daten und Bluetooth-Daten	116
3.4.1	Fahrzeitvergleich mit FC-Daten.....	118
3.4.2	Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade	121
3.4.3	Interpretation und Schlussfolgerungen.....	123
3.5	Analyse „FCD-Latenzzeiten“	124
3.5.1	Beispiel: Bestmögliche Aktualität der Staudetektion.....	126
3.5.2	Messung von Übertragungslatenzzeiten	127
3.5.3	Messung von Verarbeitungslatenzzeiten.....	129
3.5.4	Anzahl von Batches	130
3.5.5	Interpretation und Schlussfolgerungen.....	131
4	Arbeitspaket 4: Schlussfolgerungen und Empfehlungen	133
4.1	Schlussfolgerungen zum Szenario „Stillstands-Detektion“	133
4.2	Schlussfolgerungen zum Szenario „Stau-Detektion“	135
4.3	Schlussfolgerungen zum Szenario „Fahrzeitmessung“.....	138
4.4	Schlussfolgerungen zur Aktualität von FC-Daten	140

5 Literatur..... 142

1 EINLEITUNG

Floating Car Data (FCD) haben sich in den letzten Jahren als eine der wichtigsten Datenquellen für die Generierung von Echtzeit-Verkehrsinformationen etabliert. Die Qualität von FCD-basierten Verkehrsinformationen hängt wesentlich von zwei Einflussfaktoren ab: (1) von der **Anzahl der Fahrzeuge, die Daten erfassen und übertragen (FCD-Durchdringungsgrad)** und (2) **von der Qualität der erfassten Daten sowie der FCD-Informationsverarbeitung** (von Erfassung im Fahrzeug bis zur Ableitung der Verkehrsinformationen). Die Qualität der Verkehrsinformationen kann in unterschiedlichen **Kategorien** eingeteilt werden. Zum Beispiel kann die Einhaltung einer maximalen Lageungenauigkeit eines Stauendes ein **räumlicher Qualitätsparameter** sein. Ein **zeitlicher Qualitätsparameter** kann zum Beispiel fordern, dass alle X Minuten die Verkehrsinformation aktualisiert werden soll.

Das Projekt **OptiFCD** hat sich zum Ziel gesetzt, die Fragestellung nach **notwendigen FCD-Durchdringungsgraden für das österreichische Autobahnen- und Schnellstraßennetz unter Berücksichtigung** des Prozesses der Informationsverarbeitung sowie **der dazugehörigen Qualitätsparameter zu berechnen, zu visualisieren und zu interpretieren**. Dazu wird der **gesamte Prozess der FCD-Informationsgenerierung** beschrieben und formalisiert. Für die identifizierten Einflussfaktoren und Systemparameter werden die **Auswirkungen auf die Qualität** der abgeleiteten Echtzeit-Verkehrsinformationen festgestellt sowie **unterschiedliche Ausprägungen der Qualitätsparameter in Szenarien beschrieben**. Anhand dieser Szenarien werden für repräsentative Straßenabschnitte des österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetzes die notwendigen FCD-Fahrzeuge pro Stunde bestimmt und anhand von bereitgestellten Verkehrsstärken die notwendigen **FCD-Durchdringungsgrade** (tages- und tageszeitabhängig) für jedes Szenario berechnet.

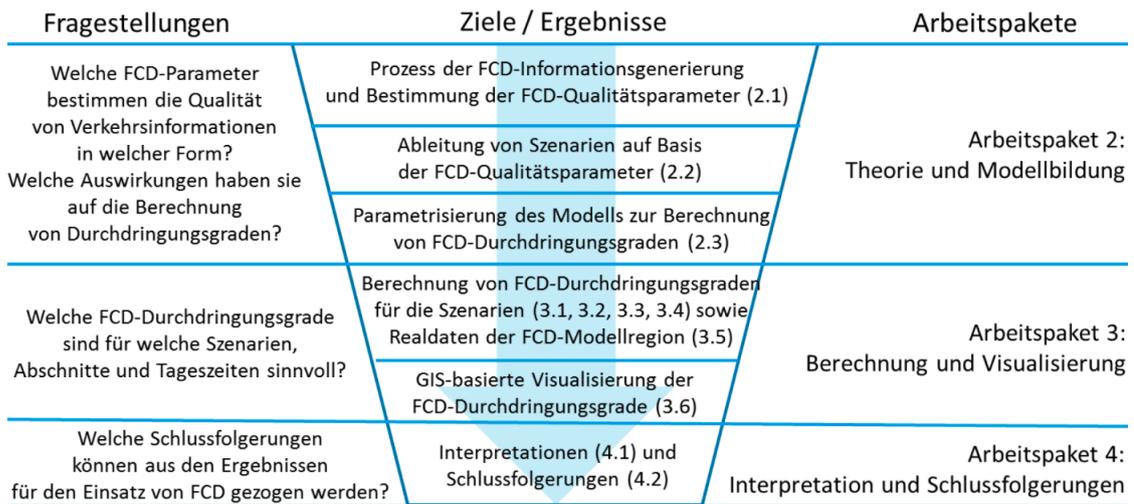


Abbildung 1: Fragestellungen, Ziele und Arbeitspakete im Projekt OptiFCD

2 ARBEITSPAKET 2: THEORETISCHE GRUNDLAGEN

In Arbeitspaket 2 wurden die theoretischen Grundlagen für die Berechnung von realistischen FCD-Durchdringungsgraden erarbeitet. Dies beinhaltet die stochastische Modellbildung sowie die Identifikation von Qualitätsparametern und deren Einflussfaktoren. Details zu Zielen, Aufgaben und Ergebnissen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Am Beginn der Arbeiten wurden gemeinsam mit der ASFINAG relevanten Szenarien definiert. Diese Szenarien beinhalten zum einen die aus FC-Daten abzuleitenden Verkehrsinformationen und zum andern jene Qualitätsparameter, die bezüglich dieser Verkehrsinformation zur Beschreibung ihrer Qualität sinnvoll sind (Abschnitt 2.2). Im Anschluss wurde ein prototypischer Prozess der Informationsgenerierung aus FC-Daten formalisiert und beschrieben. Es wurden jene Systemparameter und Einflussfaktoren des Verarbeitungsprozesses erarbeitet, welche auf die Qualitätsparameter der Verkehrsinformation einen direkten oder indirekten Einfluss haben (Abschnitt 2.4). Zur realistischen Abschätzung des Einflusses, den die Verarbeitung auf den Qualitätsparameter Aktualität haben, wurden Latenzzeiten definiert. Zuletzt wurde für die Modellierung und Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden das stochastische Modell von Breitenberger et al. (2004) dahingehend adaptiert (Abschnitt 2.3), dass für die Qualitätsparameter der ausgewählten Szenarien konkrete FCD-Durchdringungsgrade berechnet werden können (Arbeitspaket 3).

(AP 2) Theorie und Modellbildung

(Z 2)	Im Vorhaben wird zuerst der Prozess der FCD-Informationsgenerierung im Detail beschrieben. Dabei werden auch die relevanten Qualitätsparameter der üblichen Qualitätskategorien von Geoinformationen bestimmt. Parallel wird das stochastische Modell zur Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden dahingehend parametrisiert, dass die Qualitätsparameter in die Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden einfließen können.
(A 2)	<p>(2.1) Beschreibungen des Prozesses der FCD-Informationsgenerierung und Bestimmung der Qualitätsparameter anhand standardisierter Kategorien.</p> <hr/> <p>(2.2) Definition von drei exemplarischen Szenarien mit unterschiedlichen Ausprägungen von Qualitätsparametern</p> <hr/> <p>(2.3) Parametrisierung des stochastischen Modells von Breitenberger et al. 2004 zur Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden</p>

(D 2) Bericht zum Prozess der Informationsgenerierung, zu den Qualitätsparametern sowie dem Modell zur Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Tabelle 1: Ziel (Z), Aufgaben (A) und Berichte (D) im Arbeitspaket 2

2.1 Szenarien

In diesem Abschnitt werden die in Abstimmung mit der ASFINAG untersuchten Verkehrsinformations-Szenarien definiert. Es sind dies einerseits die „Stillstands-Detektion“ von Fahrzeugen und andererseits die „Stau-Detektion“.

2.1.1 Szenario „Stillstands-Detektion“

Die Detektion von Stillständen von Fahrzeugen auf Autobahnen und Schnellstraßen stellt für Autobahnbetreiber eine sicherheitsrelevante Information dar. Im Szenario **Stillstands-Detektion** verringert ein Fahrzeug seine Geschwindigkeit bis unter einen definierten Geschwindigkeitsschwellwert X (z.B. 5 km/h) oder kommt gänzlich zum Stillstand. Nach frühestens 10 Sekunden nimmt das Fahrzeug wieder an Fahrt auf, bevor sich der Vorgang möglicherweise wiederholt. Stillstände können **verkehrsbedingte** Ursachen haben, wie beispielsweise die Totalsperre einer Autobahn oder Schnellstraße oder ein Stop-And-Go-Verkehr bei Verkehrsüberlastung. Stillstände können aber auch nicht verkehrsbedingte Ursachen haben wie das Halten in einer Pannenbucht oder ein Tankstopp. Neben der sicherheitsrelevanten Notwendigkeit für eine zuverlässige Detektion von Stillständen, ist die Klassifikation in verkehrsbedingte und nicht verkehrsbedingte Stillstände auch für die FCD-Datenverarbeitung notwendig. Nicht verkehrsbedingte Stillstände sollten erkannt werden und nicht in die Verkehrsinformation einfließen während verkehrsbedingte Stillstände ein Teil der Verkehrsinformation sind.

Um Stillstände automatisiert in GPS-Trajektorien detektieren zu können, werden in der Literatur raumzeitliche Cluster-Methoden vorgeschlagen. Aufgrund der erfolgreichen Anwendung zur Stopp-Detektion in Vorprojekten (Schneider et al. 2017), wurde für das Projekt die Methode eines inkrementellen raumzeitlichen Clusterings nach Ye et al. (2009) ausgewählt. Mit Hilfe des Cluster-Verfahrens werden jene Stillstände in einer GPS-Trajektorie detektiert, die definierte raumzeitliche Parameterwerte erfüllen.

Als zweites Verfahren wurde die im Rahmen der FCD Modellregion Salzburg entwickelte Methode einer Zeitreihenanalyse zur Analyse und Klassifizierung von Verzögerungsmustern angewandt (Brunauer & Rehr 2014). Zur Detektion von Verzögerungsmustern (auch „Motion Patterns“ genannt) wird die Verzögerungsrate eines Fahrzeugs (im Vergleich der aktuellen

Geschwindigkeit zur Freiflussgeschwindigkeit) entlang einer GPS-Trajektorie ermittelt. Die Verzögerungsrate wird dabei schwellwertbasiert in folgende Verzögerungstypen klassifiziert: (1) „Single Stop“ (kurze Distanz, hohe Verzögerung, nur für Abtastintervalle unter 10 Sekunden), (2) „Unusual Delay“ (undefinierte Verzögerungsrate, Schwellwerte für die anderen Verzögerungstypen sind nicht erfüllt), (3) „Delayed“ (mind. 200 Meter Distanz, mind. 1 Minute und max. 2 Minuten Verzögerung), (4) „Stop And Go“ (mind. 200 Meter Distanz, mind. 2 Minuten Verzögerung) und (5) „Not Traversed“ (Straßenabschnitt wurde nicht befahren).

2.1.2 Szenario „Stau-Detektion“

Neben der Detektion von Stillständen stellt die zuverlässige Detektion von Staubereichen (Stauwurzel, Stauende, Staulänge, Verzögerungszeit) ein weiteres sicherheitsrelevantes Szenario eines Autobahn- und Schnellstraßenbetreibers dar, das mit Hilfe von Floating Car Data detektiert werden kann. Ein Staubereich im Szenario „**Stau-Detektion**“ wurde in Abstimmung mit der ASFINAG folgendermaßen definiert: Fahrzeuge bewegen sich auf einer Länge von mindestens 200 Metern mit einer Geschwindigkeit von weniger als 30 km/h oder 25% der Freiflussgeschwindigkeit. Die **Stauwurzel** definiert dabei jenen Ort, an dem der Stau entsteht (z.B. an Verengungen). Die Stauwurzel kann dabei **statisch** sein (z.B. bei einem Unfall) oder sich **dynamisch** bewegen. Das **Stauende** definiert jenen Ort, an dem Fahrzeuge ihr Tempo auf Stauniveau verringern müssen. Das Stauende ist in der Regel immer dynamisch. Die Staulänge ergibt sich aus der Distanz zwischen Stauwurzel und Stauende und die Verzögerungszeit ergibt sich aus jener Zeit, die ein Fahrzeug mit der Staugeschwindigkeit länger für den Staubereich benötigt im Vergleich zur Fahrt bei Freiflussgeschwindigkeit. Bei einem durchgängigen Stau dürfen einmalig zwischen Stauwurzel und Stauende auf einer zusammenhängenden Länge von maximal 600 Metern die Bedingungen eines Staus ($v < 30$ km/h oder 25% von Freiflussgeschwindigkeit) nicht erfüllt werden. Ansonsten würde der Stau in zwei unabhängige Staus aufgeteilt werden.

2.2 Qualitätsanforderungen an (FCD-basierte) Verkehrsinformationen

Verkehrsinformationen können je nach Typ unterschiedliche Qualitätsanforderungen aber auch Qualitätsparameter haben. Zum Beispiel kann sich die Anforderung an die mindestens einzuhaltende Aktualität einer Verkehrsinformation unterscheiden. Weiters kann es eine Rolle spielen, ob die Verkehrsinformation ortsfest (z.B. verlorenes Ladegut) oder beweglich (z.B. Stauende) ist.

Für OptiFCD wurden in Abstimmung mit der ASFINAG die zwei oben beschriebenen Szenarien für Verkehrsinformationen als relevant definiert. Anhand dieser Szenarien wurden

exemplarisch die Qualitätsparameter bestimmt, die in den Szenarios als relevant erachtet werden.

Für die Bestimmung der Qualität von Verkehrsinformationen ist es sinnvoll, Verkehrsinformationen als einen speziellen Typ von Geoinformationen zu betrachten. Die Qualität von georeferenzierten Informationen ist über den Standard ISO 19157 international standardisiert (ISO 19157 2013). Die Erarbeitung der Qualitätsparameter von Verkehrsinformationen orientiert sich daher an diesem Standard.

2.2.1 Qualitätskategorien

Die ISO 19157 unterteilt die Qualität von Geoinformationen in folgende Kategorien (Data Quality Elements):

- **Vollständigkeit:** Sie kann sich zum einen auf die Vollständigkeit aller Daten oder auf die Vollständigkeit ihrer Attribute beziehen. Ein Beispiel eines unvollständigen Datensatzes wären fehlende Messungen im Falle eines Stillstands oder Lücken von Verkehrsinformationen bei einem Tunnelbauwerk.
- **Logische Konsistenz:** Die Beschaffenheit der Daten muss in sich konsistent sein. Diese Konsistenz bezieht sich beispielsweise auf Ausprägungen von Attributen wie beispielsweise Geschwindigkeiten.
- **Räumliche Genauigkeit:** Sie betrifft die Genauigkeit der Position auf der Erdoberfläche. Die Genauigkeit einer einzelnen Position wird hauptsächlich durch die Qualität der GNSS-Ortung beeinflusst. Bei einer Trajektorie wirkt sich zusätzlich das Aufzeichnungsintervall auf die geographische Qualität der Linie aus.
- **Zeitliche Qualität:** Für die zeitliche Qualität ist neben der zeitlichen Genauigkeit der Messung auch die Latenzzeit, welche Daten von der Erfassung bis zur Anwendungsfall spezifischen weiteren Verarbeitung benötigen, von Bedeutung. Ebenso spielt die Korrektheit der Reihenfolge der Daten (Konsistenz) und ein korrektes Datumsformat (z.B. Zeitzone) für die Qualität eine entscheidende Rolle
- **Thematische Genauigkeit:** Sie betrifft die Genauigkeit von quantitativen Attributen (z.B. Verzögerungszeiten) oder die Richtigkeit von qualitativen Attributen (z.B. Level-Of-Services).

Für konkrete Typen von georeferenzierten Informationen, wie z.B. die Verkehrsinformation „Verzögerung“ oder „Reisezeit“, sieht die ISO 19157 vor, dass je Kategorie jeweils real bestimmbare Qualitätsmaße (Data Quality Measures) bzw. Qualitätsparameter angegeben werden.

2.2.2 Qualitätsparameter für die Szenarien

Tabelle 2 führt jene Qualitätsparameter an, welche im Hinblick auf die vorab beschriebenen Szenarien als relevant erachtet werden. Für das Szenario „Stau-Detektion“ sind alle angeführten Qualitätsparameter relevant. Für das Szenario „Stillstands-Detektion“ sind die dynamischen Qualitätsparameter (QP5) und (QP6) nicht relevant.

Qualitätsparameter	Beschreibung	Q-Kategorie
(QP1) Aktualität	Die maximal erlaubte Zeitdifferenz (Alter) zwischen Auftreten und Erkennung eines Ereignisses.	Zeitlich Qualität
(QP2) Detektionswahrscheinlichkeit	Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis detektiert werden kann.	Vollständigkeit
(QP3) Korrektheit	Die Leistungsfähigkeit des Algorithmus ein Ereignis korrekt zu detektieren.	Thematische Genauigkeit
(QP4) Lagegenauigkeit	Die Genauigkeit der räumlichen Verortung des Ereignisses.	Räumliche Genauigkeit
(QP5) Lagedynamik	Max. mögliche Lageveränderung eines Ereignisses (Stauende und -wurzel)	Räumlich Genauigkeit
(QP6) Verzögerungsdynamik	Max. zulässige Veränderung der Verzögerung des Staus (Stauende und -wurzel)	Zeitlich Qualität

Tabelle 2: Qualitätsparameter von Verkehrsinformationen im Hinblick auf die relevanten Szenarien

2.3 Stochastisches Modell zur Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden

In diesem Abschnitt wird das stochastische Modell vorgestellt, welches in weiterer Folge für die Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden Anwendung findet. Das verwendete stochastische Modell wird von dem von Breitenberger et al. (2004) vorgeschlagene Modell

abgeleitet, das die Ankunft eines Fahrzeugs am Querschnitt als stochastischen Prozess modelliert. Dieses Modell ermöglicht es, FCD-Durchdringungsgrade am Querschnitt für unterschiedliche Verkehrsstärken und Ankunftszeiten zu berechnen. Die Ankunftszeit (d.h. wieviel Zeit darf maximal zwischen der Ankunft des nächsten FCD-Fahrzeugs vergehen) ist als Parameter modelliert. Die Herausforderung in der Anwendung dieses Modells liegt nun in der geeigneten Wahl dieses Parameters, da dieser nicht direkt zu bestimmen ist, sondern wesentlich von den Qualitätsanforderungen an die Verkehrsinformation abhängt. Soll beispielsweise ein Stauende mit Hilfe von FCD zuverlässig detektiert werden, dann hängt dieser Parameter und damit der notwendige FCD-Durchdringungsgrad wesentlich von der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus und damit von der maximal zulässigen räumlichen Lagegenauigkeit ab. Je nach Ausbreitungsgeschwindigkeit und Lagegenauigkeit können sich sehr unterschiedliche Werte für die Zeitspanne zwischen zwei FCD-Fahrzeugen ergeben. Außerdem sind etwaige Latenzzeiten zu berücksichtigen, die zwischen der Durchfahrt am Querschnitt und der Bereitstellung der Verkehrsinformation durch das FCD-System entstehen oder sich durch definierte Rahmenbedingungen wie der minimalen zu detektierenden Staulänge ergeben. Latenzzeiten beeinflussen vor allem die Aktualität der Verkehrsinformation. Daher gilt es, Anforderungen an die Qualitätsparameter, wie Aktualität oder Erfassungswahrscheinlichkeit, in das stochastische Modell zu integrieren, sodass am Ende ein realistischer FCD-Durchdringungsgrad geschätzt werden kann.

2.3.1 Grundlagen

Für die Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden wird das stochastische Modell von Breitenberger et al. (2004) adaptiert. Das Modell beschreibt für einen beliebigen Messquerschnitt die Ankunft eines (FCD-)Fahrzeugs als Poisson-Prozess (Abbildung 2). Das heißt, es wird angenommen, dass die Anzahl an Fahrzeugen, die über einen bestimmten Zeitraum den Querschnitt überfahren, Poisson-verteilt ist. Die Grundlagen für diese Annahme sind in der Warteschlangentheorie zu finden. Die Poisson-Verteilung (Abbildung 2) hat λ als Parameter. In unserer Problemstellung beschreibt dieser Parameter die Anzahl an ankommenden Fahrzeugen q in KFZ pro Stunde mit

$$\lambda = \frac{q}{60 \cdot 60}$$

Für die weitere Betrachtung ist aber nicht die Anzahl an Fahrzeugen pro Zeiteinheit relevant, sondern die Zeit zwischen zwei am Querschnitt ankommenden FCD-Fahrzeugen. Es kann gezeigt werden, dass diese Zeiten einer Exponentialverteilung folgen.

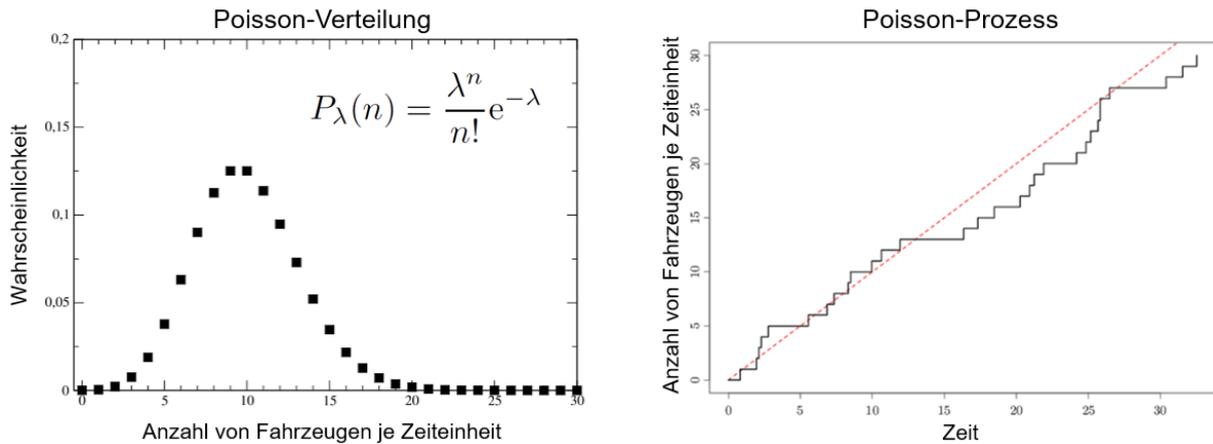


Abbildung 2: Dichtefunktion der Poisson-Verteilung und Poisson-Prozess

$$P_{\lambda}(T) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda T} & T \geq 0 \\ 0 & T < 0 \end{cases}$$

Auf Basis der Verteilungsfunktion der Exponentialverteilung kann die Verkehrsstärke q , die Wartezeit zwischen zwei Fahrzeugen T und die Wahrscheinlichkeit α des Eintretens in Beziehung gesetzt werden.

$$\alpha = \int_{-\infty}^T \lambda e^{-\lambda t} dt \Rightarrow \alpha = 1 - e^{-\frac{q}{60 \cdot 60} T}$$

(1) Es kann ermittelt werden, wie wahrscheinlich (Ermittlung von α) es ist, dass das nächste Fahrzeug in T Sekunden ankommt, wenn gerade ein Fahrzeug den Messquerschnitt überfahren hat. Parameter hierfür sind die Verkehrsstärke q zur Ermittlung von λ und das Intervall T . (2) Alternativ kann auch für eine bestimmte Wahrscheinlichkeit α ermittelt werden, wie viele Sekunden (Ermittlung von T) auf das nächste Fahrzeug maximal gewartet werden muss. Es wird also für eine Verkehrsstärke q ermittelt, dass man z.B. für eine gewählte 95%ige Wahrscheinlichkeit ein Fahrzeug in den nächsten T Sekunden erwarten kann. (3) Fixiert man die Wahrscheinlichkeit α und das Intervall T erlaubt es die Verteilungsfunktion auch λ bzw. die Verkehrsstärke zu ermitteln (Ermittlung von q). Diese Variante wird verwendet, um eine mindestens notwendige FCD-Verkehrsstärke q_{FCD} zu errechnen. Mit der tatsächlichen Verkehrsstärke q kann mit

$$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q}$$

der **mindestens notwendige Durchdringungsgrad** D_{FCD} berechnet werden.

Beispiel: Gegeben ist ein gewünschtes Zeitintervall von 10 Minuten zwischen zwei FCD-Fahrzeugen. Die tatsächliche Verkehrsstärke ist 400 KFZ/h. Die gewünschte

Wahrscheinlichkeit soll 95% sein. Gesucht ist die mindestens notwendige FCD-Verkehrsstärke und der daraus folgende FCD-Durchdringungsgrad. Die mindestens notwendige FCD-Verkehrsstärke beträgt daher

$$F_P(T_{FCD}) = \int_{-\infty}^{T_{FCD}} \lambda e^{-\lambda t} dt \Rightarrow 0.95 = 1 - e^{-\frac{q_{FCD}}{60 \cdot 60} 10 \cdot 60} \Rightarrow q_{FCD} = 17,97$$

und der FCD-Durchdringungsgrad

$$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{17,97}{400} = 0.0449 = 5,5\%$$

Als Folge dieser stochastischen Modellierung sind alle Aussagen über FCD-Durchdringungsgrade oder notwendige FCD-Verkehrsstärken Wahrscheinlichkeitsaussagen. Das heißt, Aussagen der Form „Es wird mindestens eine FCD-Verkehrsstärke q_{FCD} benötigt.“ oder „Es wird mindestens ein Durchdringungsgrad D_{FCD} benötigt.“ können nur mit der Wahrscheinlichkeit α eingehalten werden. Es gibt also Ausnahmen.

2.3.2 Anwendung in den Szenarien

In Abschnitt 2.1 wurden die beiden Szenarien für die Detektion von Stillständen und Staubereichen präsentiert sowie deren Qualitätsparameter vorgestellt. Die Qualitätsparameter beider Szenarien ((QP1) bis (QP6), vgl. Tabelle 2) sind Aktualität, Detektionswahrscheinlichkeit, Korrektheit, Lagegenauigkeit, Lagedynamik und Verzögerungsdynamik. Die Frage die sich nun stellt ist jene, wie diese Qualitätsparameter mit dem stochastischen Modell abgebildet werden können.

Aktualität: Der Parameter T , also die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden (FCD-)Fahrzeugen dient dazu, den Qualitätsparameter der Aktualität abzubilden. T ist aber nicht identisch mit der Aktualität, da in jedem FCD-System auch die Datenverarbeitung eine Latenzzeit verursacht. Diese Latenzzeit mindert die Aktualität jeder extrahierten Verkehrsinformation oder verkürzt das notwendige T im Modell, um eine bestimmte Aktualität einzuhalten. Benötigt zum Beispiel das FCD-System 3 Minuten, um einen Stau zu extrahieren, so ist die Verkehrsinformation bei der Bereitstellung bereits 3 Minuten veraltet. Das heißt, bei einer gewünschten Aktualität von 10 Minuten würde man alle 7 Minuten eine neue Verkehrsinformation bzw. Befahrung benötigen. Für T ist daher 7 Minuten zu wählen, um eine Aktualität von 10 Minuten gewährleisten zu können.

Lagedynamik und Verzögerungsdynamik: Die Lagedynamik beschreibt die maximal zulässige Ortsänderung von Stauwurzel oder Stauende, die zwischen zwei Messungen möglich sein sollte. In dem präsentierten stochastischen Modell kann dieses räumliche

Kriterium nicht direkt abgebildet werden. Da T aber die Zeit zwischen zwei Fahrzeugen beschreibt, kann näherungsweise die Lagedynamik innerhalb der Zeit T abgeschätzt werden (vgl. Abschnitt 0). Es gilt, dass je größer T ist, je größer kann auch die räumliche Änderung eines Staus sein. Gewünschte Maximalwerte in der Lagedynamik gehen daher in das stochastische Modell über die Zeit T ein. Die Abbildung der Verzögerungsdynamik im stochastischen Modell erfolgt völlig analog. Durch Umformung des Modells von Abschnitt 2.3.1 kann auch die Verlängerung oder Verkürzung der Verzögerungszeit berechnet werden. Für beide Qualitätsparameter ist es aber wichtig, dass sie unabhängig von der (QP1) Aktualität betrachtet werden. Bei der Betrachtung von Lagedynamik und Verzögerungsdynamik spielt es keine Rolle, wie lange die Daten durch das FCD-System benötigen. Es spielt lediglich eine Rolle, wie oft ein FCD-Fahrzeug am Querschnitt ankommt. Für die Bestimmung des zu wählenden T im stochastischen Modell muss daher das Minimum aus der Anforderung an (QP1) Aktualität, (QP4) Lagedynamik und (QP5) Verzögerungsdynamik genommen werden, da dies zum größten notwendigen FCD-Durchdringungsgrad führt.

Detektionswahrscheinlichkeit: Die Wahrscheinlichkeit α im stochastischen Modell ist direkt mit dem Qualitätsparameter Detektionswahrscheinlichkeit von Verkehrsinformationen abgebildet. Dieser Qualitätsparameter ist frei wählbar und Beschreibt die Wahrscheinlichkeit bzw. die Sicherheit, ob eine Verkehrsinformation überhaupt erfasst werden könnte. Über die Korrektheit der Detektion wird hier nichts ausgesagt.

Korrektheit: Im Unterschied zur Detektionswahrscheinlichkeit, also ob die Information überhaupt erfasst werden kann, beschreibt die Korrektheit der Verkehrsinformation den Anteil an korrekt erfassten Verkehrsinformationen. Auch hier sei darauf hingewiesen, dass die Korrektheit nie 100% sein wird. Es ist lediglich möglich, mit mehr oder minder großem Aufwand die Korrektheit zu erhöhen. Möchte man steuernd eingreifen und eine bestimmte Mindestkorrektheit fordern, sind drei Varianten möglich.

1. **Weiterentwicklung:** Es kann versucht werden die Korrektheit einzelner Algorithmen zu verbessern; es kann die Datenqualität, z.B. durch zusätzliche Filterung, Aufbereitung oder aber durch Erhöhung des Sampling-Intervalls, erhöht werden.
2. **Mehrfachmessung:** Es kann gefordert werden, dass mindestens n FCD-Fahrzeuge die gleiche Information erheben, um über ein Mehrheits-Voting oder eine Mittelwertbildung die Korrektheit zu erhöhen. So reduziert sich die Wahrscheinlichkeit für eine fehlerhafte Erkennung durch Mehrfachdetektion. Letztere Variante ist mit dem stochastischen Modell abbildbar, indem man die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass mindestens n (FCD-)Fahrzeuge im Intervall T den Querschnitt durchfahren. Durch

diese Forderung steigert sich aber der notwendige FCD-Durchdringungsgrad verhältnismäßig schnell.

3. **Erhöhung der Wahrscheinlichkeit α :** Eine weitere Variante wäre es, die fehlerhaft erkannten Fahrzeuge als Abschlag der Detektionswahrscheinlichkeit α zu sehen. Zum Beispiel, ist die Korrektheit 99% und die Detektionswahrscheinlichkeit 95%, dann ergibt sich eine Detektionswahrscheinlichkeit von korrekten Verkehrsinformationen aus $0,99 \times 0,95 = 0,9405$. Das bedeutet, dass in 5,0% der Fälle weiterhin nichts detektiert und in 0,95% der Fälle die Verkehrsinformation falsch detektiert wird. Nur in 94,05% der Fälle liegt eine korrekte Detektion vor. Möchte man bei einer Korrektheit von 99% trotzdem weiterhin an 95% Detektionswahrscheinlichkeit als Qualitätsparameter festhalten, dann muss α erhöht werden, d.h. $\alpha = 0,95 / 0,99 = 0,9595$ bzw. 95,95%.

Für das stochastische Modell ist nur die Gesamtkorrektheit des FCD-Systems anwendbar. Es kann aber nicht davon ausgegangen werden, dass dieser Wert bekannt oder einfach bestimmt werden kann. Die Korrektheit von einzelnen Algorithmen (z.B. Map-Matching) kann aber aus theoretischen oder empirischen Untersuchungen bekannt sein. Die Berechnung der Gesamtkorrektheit k aus der Korrektheit einzelner Algorithmen (k_1, \dots, k_n) kann vereinfacht durch Aufmultiplizieren ($k = k_1 \times \dots \times k_n$) erfolgen. Da es sich bei der Korrektheit um Schätzer für Wahrscheinlichkeiten handelt, müsste für das Aufmultiplizieren die Annahme der stochastischen Unabhängigkeit (Multiplikationsregel) gelten. Dies ist vermutlich nicht der Fall. Durch das Aufmultiplizieren ist aber eine Näherung gegeben, bei der man auf der sicheren Seite ist. Zum Beispiel hat ein hohes Sampling-Intervall, eine ungenauere GNSS-Positionsbestimmung oder ein ungenauer Straßengraph auf viele Algorithmen einen negativen Einfluss auf die Korrektheit. Weiters ist anzunehmen, dass sich Fehler am Beginn der Prozesskette fortpflanzen. Es ist daher plausibel, dass die Gesamtkorrektheit höher ist, als die der Näherung $k = k_1 \times \dots \times k_n$ basierend auf der Annahme der stochastischen Unabhängigkeit.

Lagegenauigkeit: Bei der Lagegenauigkeit spielen zwei Aspekte eine wichtige Rolle. Die Genauigkeit der GNSS-Positionsbestimmung ist bei heute üblichen Systemen hinreichend, um eine praktikable Lagegenauigkeit von Verkehrsinformationen einhalten zu können. Zum Beispiel wird für GPS der Fehler mit $< 7.8\text{m}$ in 95% der Fälle angegeben¹. Diese offizielle Abschätzung beinhaltet jedoch keine atmosphärischen oder Empfängerfehler. Eine aktuellere

¹ Global Positioning System, Standard Positioning Service, Performance Standard (2008), <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>

Untersuchung gibt für Smartphones im ungünstigsten Fall mittlere Fehler für Freiflächen und Häuserschluchten mit 1,6 bzw. 8,9m an². Der zweite relevante Einflussfaktor auf die Lagegenauigkeit ist des Sampling-Intervall der FC-Daten. Es ist offensichtlich, das bei einem 60-Sekunden-Sampling kaum die genaue Position der Stauwurzel oder eines Stopps erkannt werden kann. Bei einem 1-Sekunden-Sampling und einer Geschwindigkeit von 30 km/h liegt die Genauigkeit für ein Stauende bereits unter 10 Meter. Für beide Einflussfaktoren ist festzuhalten, dass eine Erhöhung des FCD-Durchdringungsgrads keine Verbesserung bewirkt. Der FCD-Durchdringungsgrad ist daher keine Stellschraube zur Verbesserung der Lagegenauigkeit.

Systemparameter und Einflussfaktoren: In Abschnitt 2.4 wurden nicht nur der Prozess der Informationsextraktion formalisiert. Es wurden auch eine Reihe von Parametern präsentiert, die direkt oder indirekt auf die Qualitätsparameter der extrahierten Verkehrsinformation einen Einfluss haben. Bei diesen Parametern ist es wichtig zu unterscheiden:

1. Der FCD-Qualitätsparameter ist frei **einstell- oder definierbar**: In den Algorithmen und Prozessen eines FCD-Systems gibt es eine Reihe von Parametern die relativ frei gewählt werden können. Definiert man z.B. eine relevante Verzögerung als Verzögerung die mindestens 1 Minute beträgt, impliziert dies, dass jede relevante Verzögerung frühestens nach einer Minute erkannt werden kann. Dies hat wiederum direkten Einfluss auf die Größe T des stochastischen Modells.
2. Der FCD-Qualitätsparameter ist **messbar**: Eine saubere formale Modellierung der einstellbaren FCD-Qualitätsparameter innerhalb des stochastischen Modells ist bei manchen Parametern sehr komplex und auch nicht zielführend. Grundsätzlich ist eher interessant, wie einflussreich diese Parameter, z.B. auf die Gesamtverzögerung des FCD-Systems (Einfluss auf (QP1) Aktualität) und in weiterer Folge auf die Größe T des stochastischen Modells, sind. Zu den empirisch ermittelbaren FCD-Qualitätsparametern gehören nicht nur Latenzzeiten, sondern auch Erkennungsraten von Algorithmen (Einfluss auf (QP3) Korrektheit). Die Abbildbarkeit im Modell ist einfach, da die Erkennungsrate der Korrektheit entspricht.

Latenzzeiten: Mit Hilfe von real gemessenen Latenzzeiten, also jenen Zeiten, die ein bestimmter Prozess oder Algorithmus in einem System braucht, kann über statistische Methoden eine „übliche“ Latenzzeit ermittelt werden. Diese „übliche“ Latenzzeit kann der Mittelwert aber auch

² What are the actual performances of GNSS positioning using smartphone technology? (2014), <http://www.insidegnss.com/auto/novdec14-SOLUTIONS.pdf>

das 95%-Quantil sein. Diese Werte geben über den Einfluss auf die Gesamtverzögerung Auskunft. Für die weitere Modellierung ist es sinnvoll, die Latenzzeit als Zufallsvariable zu modellieren. Ermittelt man eine genügend große Anzahl an realen Latenzzeiten, kann zum Beispiel ein Schätzer ermittelt werden, der eine Aussage der Form „Mit 95%iger Wahrscheinlichkeit ist der Prozess A in 32 Sekunden fertig.“ ermöglicht. Der Prozentsatz sowie die Latenzzeit können über die Parameter α und T modelliert werden. Bezogen auf das Beispiel bedeutet dies: $T = \text{Aktualität} - 32 \text{ Sekunden}$ und $\alpha = \text{Erfassungswahrscheinlichkeit} \times 0,95$ (siehe auch Ausführungen bei der Korrektheit). Latenzzeiten dienen dazu, die komplexen Prozesse und vielfältigen Systemparameter und Einflussfaktoren eines FCD-Systems im stochastischen Modell abbilden zu können. Gleichzeitig geben sie einen realistischen Einblick in die verschiedenen Prozesse des FCD-Systems. Sie bieten die Möglichkeit, den Einfluss der darunterliegenden „echten Stellschrauben“, also den frei einstellbaren Systemparameter, auf die Qualitätsparameter der Verkehrsinformation abzuschätzen.

Qualitätsparameter	Modellierung	Variable
(QP1) Aktualität	Frei wählbar, Abminderung von T durch Latenzzeiten. Abschätzung	T_{QP1}
(QP2) Detektionswahrscheinlichkeit	Frei wählbar	α
(QP3) Korrektheit	Wird für Algorithmen bestimmt; Abbildung über: (1) Voting (Forderung nach mind. n FCD-Fahrzeuge), wird über Minimierung von T aus (QP1) modelliert. (2) über Erhöhung von α	T_{QP1} oder α
(QP4) Lagegenauigkeit	Keine Wechselwirkung mit FCD-Durchdringungsgrad. Validierung des Modells aus Abschnitt 2.3.1 mit empirischen Daten möglich.	
(QP5) Lagedynamik	Frei wählbar; Bestimmung des notwendigen T durch Modell aus Abschnitt 2.3.1	T_{QP4}

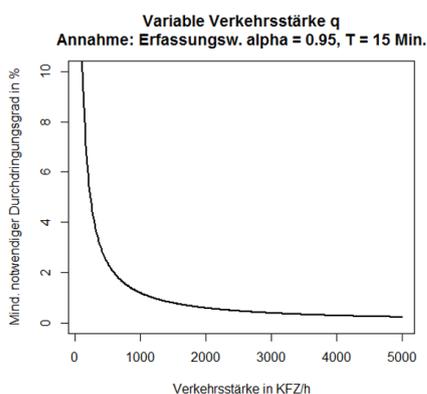
(QP6) Verzögerungsdynamik	Frei wählbar; Bestimmung des notwendigen T durch Modell aus Abschnitt 2.3.1.	T_{QP5}
--	--	-----------

Tabelle 3: Zusammenhang zwischen Qualitätsparametern von Verkehrsinformationen und dem stochastischen Modell

2.3.3 Typische FCD-Durchdringungsgrade

Auf Basis des stochastischen Modells können nun exemplarisch für verschiedene Annahmen FCD-Durchdringungsgrade berechnet werden. In diesem Abschnitt werden einige beispielhafte FCD-Durchdringungsgrade vorgestellt. Als Grundannahme für alle FCD-Durchdringungsgrade wird eine Sicherheit bzw. Erfassungswahrscheinlichkeit von 95% angenommen.

Abbildung 3 zeigt die Problematik, dass bei sehr geringen Verkehrsstärken ein sehr hoher FCD-Durchdringungsgrad notwendig ist, um z.B. eine Befahrung alle 15 Minuten gewährleisten zu können. Ab einer Verkehrsstärke von 500 KFZ/h wird dies aber bereits mit einer Durchdringung von ca. 2% gewährleistet. Zu unterscheiden ist allerdings, ob die zu erhebende Verkehrsinformation auch von der Verkehrsstärke abhängig ist. Ein Stau ist zum Beispiel bei geringeren Verkehrsstärken unwahrscheinlicher. Die Erhebung einer Reisezeit ist von der Verkehrsstärke unabhängig.



Verkehrsstärke q	D_{FCD}	Verkehrsstärke q	D_{FCD}
100	11,98 %	2500	0,48 %
250	4,79 %	3000	0,40 %
500	2,40 %	3500	0,34 %
1000	1,20 %	4000	0,30 %
1500	0,80 %	4500	0,27 %
2000	0,60 %	5000	0,24 %

Abbildung 3: Notwendiger FCD-Durchdringungsgrad in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke

In Abbildung 4 wurde die Zeit zwischen zwei FCD-Fahrzeugen variiert. Dies gibt für eine übliche Verkehrsstärke von 1500 KFZ/h einen ersten Eindruck, wie sich der Wunsch nach aktuelleren Verkehrsinformationen auf die Durchdringung auswirkt.

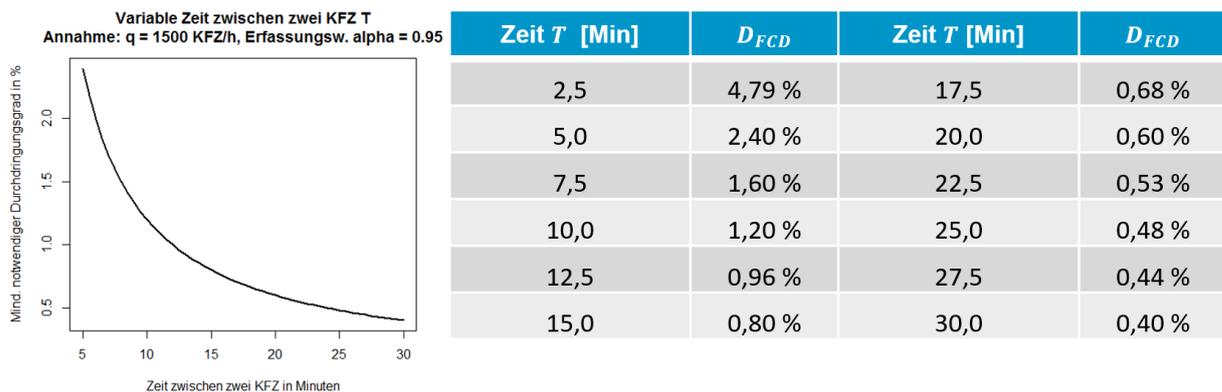


Abbildung 4: Notwendiger FCD-Durchdringungsgrad in Abhängigkeit von der Zeit zwischen zwei FCD-Fahrzeugen

Abschließend gibt Abbildung 5 noch einen Überblick, wie sich der FCD-Durchdringungsgrad in Abhängigkeit von der Erfassungswahrscheinlichkeit ändert. Hier ist zu beobachten, dass ab Wahrscheinlichkeiten größer 90% die notwendige Durchdringung schnell steigt.

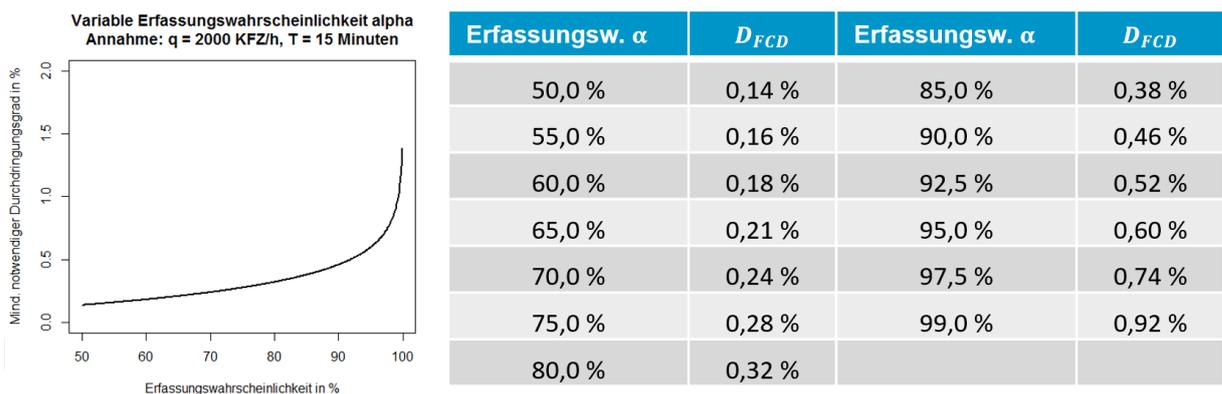


Abbildung 5: Notwendiger FCD-Durchdringungsgrad in Abhängigkeit von der Erfassungswahrscheinlichkeit

Die bisher gezeigten Beispiele zeigen FCD-Durchdringungsgrade im Hinblick auf die Durchfahrt an einem beliebigen Querschnitt. Das zweite Szenario zur Staudetektion hat als weiteren Qualitätsparameter die Lagedynamik. Auf Basis des weiter unten präsentierten Modells zur Beschreibung der räumlichen Dynamik von Staubereichen, kann mit Hilfe des stochastischen Modells ein mindestens notwendiger FCD-Durchdringungsgrad ermittelt werden. Für dieses Modell sind zusätzliche Annahmen, wie der LKW-Anteil und die Geschwindigkeit im Stau notwendig. Abbildung 6 zeigt hierzu exemplarisch die notwendigen Durchdringungsgrade bei einer Erfassungswahrscheinlichkeit von 95% in Abhängigkeit der Verkehrsstärke und Staugeschwindigkeit.

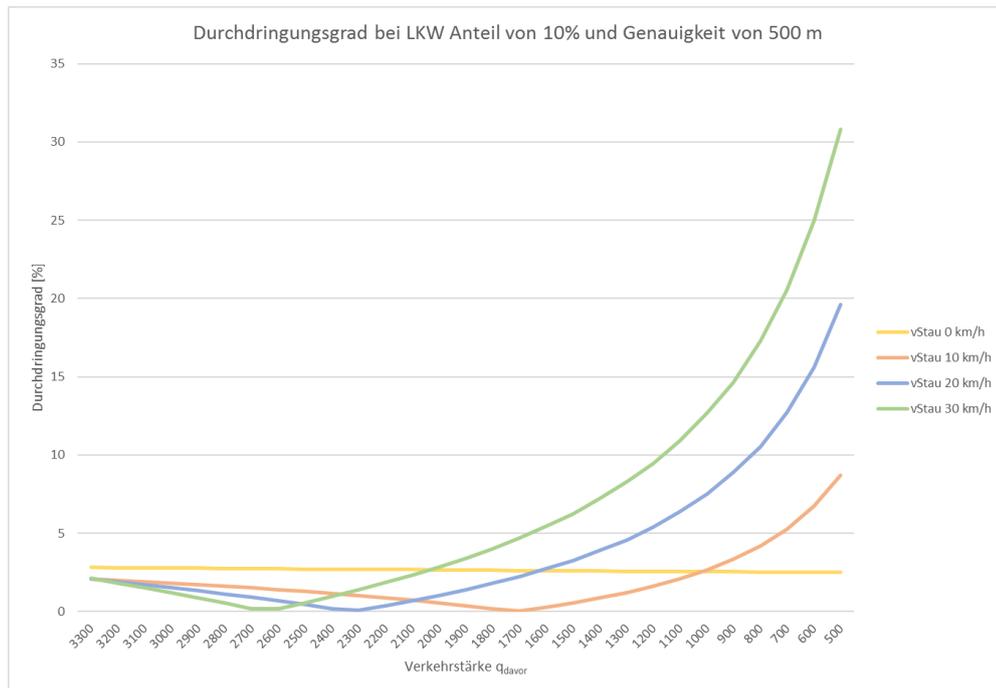


Abbildung 6: Notwendiger Durchdringungsgrad um eine Abweichung von 500 Meter zu erkennen (LKW-Anteil von 10%)

Analog zeigt Abbildung 7 die gleiche Grafik, jedoch für unterschiedliche Genauigkeiten in der Staudynamik und bei fixierter Staugeschwindigkeit von 10 km/h.

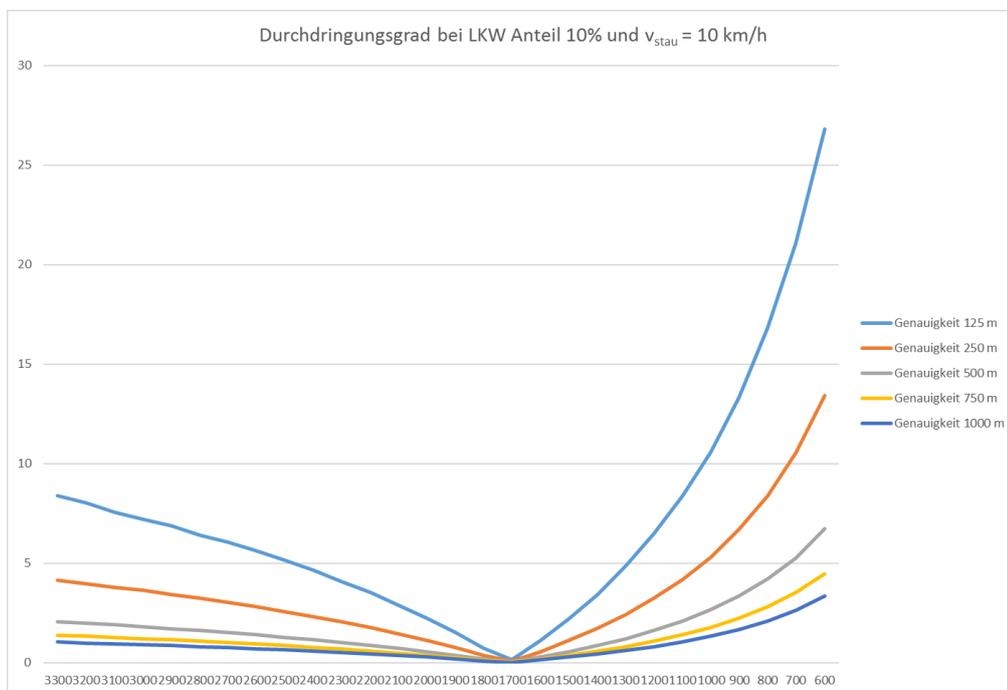


Abbildung 7: Notwendiger Durchdringungsgrad um unterschiedliche Ausbreitungen zu detektieren (LKW Anteil von 10%, Staugeschwindigkeit von 10 km/h)

2.3.4 Qualitätsparameter

Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Staus

Um die Lagedynamik des Stauendes abschätzen zu können, ist die Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Staus notwendig. Dazu werden folgende Parameter benötigt:

- Verkehrsstärke q in [KfZ/h] Fahrzeuge pro Stunde
- Verkehrsdichte k in [KfZ/km] Fahrzeuge pro Kilometer
- Verkehrsgeschwindigkeit v in [km/h] Kilometer pro Stunde

Dabei ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$q = k * v; \quad k = \frac{q}{v}; \quad v = \frac{q}{k}$$

Die Verkehrsdichte k_{max} für eine Fahrspur an der Kapazitätsgrenze kann formal über die gefahrene Geschwindigkeit v und durchschnittliche Länge der Fahrzeuge s_{KfZ} bestimmt werden. In der Straßenverkehrsordnung gilt der 2-Sekunden Abstand als Faustregel für den Sicherheitsabstand zwischen zwei folgenden Fahrzeugen. Dieser Sicherheitsabstand lässt sich vereinfacht mit der Formel $s_{min} = v * 0,55$ ausdrücken⁴. Dabei ist davon auszugehen, dass der Sicherheitsabstand in der Praxis nie geringer als 2 Meter betragen wird. Ist nun zusätzlich der Anteil der Lastkraftwagen bekannt kann dieser in die Berechnung miteinfließen.

$$k_{max} = \frac{1000}{(s_{PKW} + s_{min}) * p_{PKW} + (s_{LKW} + s_{min}) * p_{LKW}}$$

mit:

s_{PKW} als durchschnittliche Länge eines Personenkraftwagens in Meter

p_{PKW} als prozentualer Anteil der Personenkraftwagen in Prozent

s_{LKW} als durchschnittliche Länge eines Lastkraftwagens in Meter

p_{LKW} als prozentualer Anteil der Lastkraftwagen in Prozent

Nimmt man eine durchschnittliche Länge der Personenkraftwagen von $s_{PKW} = 4,50 \text{ m}$, Lastkraftwagen von $s_{LKW} = 12 \text{ m}$ und Lastkraftwagenanteil von $p_{LKW} = 20 \%$ an ergibt sich bei einem Sicherheitsabstand von $s_{min} = 2 \text{ m}$ (Staugeschwindigkeit $v < 3,64 \text{ km/h}$) eine Verkehrsdichte von:

$$k_{max} = \frac{1000}{(4,50 + 2) * 0,8 + (12 + 2) * 0,2} = 125$$

³ <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Chapter-4.-Fundamental-diagrams.pdf>

⁴ https://de.wikipedia.org/wiki/Sicherheitsabstand#Ermittlung_des_Sicherheitsabstandes

Das Highway Capacity Manual (HCM) beschreibt zum Vergleich einen Wert von 115 – 137 Fahrzeuge pro Fahrspur und Kilometer als typisch für eine Stausituation.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Staus berechnet sich aus der Geschwindigkeit der Stauwurzel und des Stauendes. In der Literatur wird die Ausbreitung auch als Schockwelle bezeichnet, dessen Geschwindigkeit v_w sich wie folgt berechnen lässt:

$$v_w = \frac{q_a - q_b}{k_a - k_b}$$

mit:

q_a als Verkehrsstärke räumlich in Fahrtrichtung danach in Fahrzeuge pro Stunde

q_b als Verkehrsstärke räumlich in Fahrtrichtung davor in Fahrzeuge pro Stunde

k_a als Verkehrsdichte räumlich in Fahrtrichtung danach in Fahrzeuge pro Kilometer

k_b als Verkehrsdichte räumlich in Fahrtrichtung davor in Fahrzeuge pro Kilometer

Für die Stauwurzel gilt, dass der Stau sich räumlich davor und der freie Fluss räumlich danach befindet. Für das Stauende gilt, dass der Stau sich räumlich danach und der freie Fluss räumlich davor befindet. Eine negative Geschwindigkeit bedeutet die Ausbreitung des Staus entgegen der Fahrtrichtung.

Die Berechnung, wie viele Minuten vergehen bis die Schockwelle eine definierte Strecke in Meter zurückgelegt hat, erfolgt mit der Formel: $t = \left| \frac{s}{v_w} * 0,06 \right|$

Detektion der Stauwurzel

Im Falle eines Staus baut sich dieser von der Stauwurzel beginnend auf. Somit entspricht die Detektion der Stauwurzel in diesem Falle der ersten Staudetektion eines Fahrzeugs innerhalb einer Zeiteinheit. Dabei ist die Aktualität der FC-Daten und die Geschwindigkeit des Stauendes entscheidend für die räumliche Genauigkeit der Detektion einer statischen Stauwurzel (z.B. Unfall). Bewegt sich die Stauwurzel dynamisch fließt deren Geschwindigkeit zusätzlich in die Genauigkeit der räumlichen Detektion mit ein. Ob sich die Stauwurzel statisch oder dynamisch verhält, lässt sich theoretisch berechnen. Bei einer statischen Stauwurzel entspricht die Verkehrsstärke im Stau q_b der Verkehrsstärke nach dem Stau q_a .

Die Stauwurzel bewegt sich daher mit $v_w = \frac{0}{k_a - k_b} = 0 \text{ km/h}$ (Abbildung 8). Ist die Verkehrsstärke nach dem Stau höher, bewegt sich die dynamische Stauwurzel entgegen der

⁵ <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Chapter-8.-Shock-wave-analysis.pdf>

Fahrtrichtung. Nach der Wurzel sollte die Verkehrsstärke nie geringer sein als im Stau, denn dann würde der Stau sich fortsetzen bzw. falsch detektiert werden.

Detektion des Stauendes

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Stauendes lässt sich analog zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der Stauwurzel berechnen. Die räumliche Genauigkeit der Detektion hängt von der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Aktualität der FC-Daten ab. Dabei wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_w von verschiedenen Faktoren, wie dem LKW-Anteil p_{LKW} , der gefahrenen Geschwindigkeit im Stau v_{stau} , der Geschwindigkeit davor v_{davor} und der Verkehrsstärke vor dem Stau q_{davor} beeinflusst. In Abbildung 9 wird der Zusammenhang zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit v_w , der Verkehrsstärke vor dem Stauereignis q_{davor} , dem prozentualen LKW Anteil p_{LKW} und der gefahrenen Geschwindigkeit im Stau v_{stau} dargestellt. Bei $v_{stau} = 0$ km/h ist die maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit des Stauendes gegeben. Diese steigt mit der Anzahl der Lastkraftwagen und der Verkehrsstärke vor dem Stau.

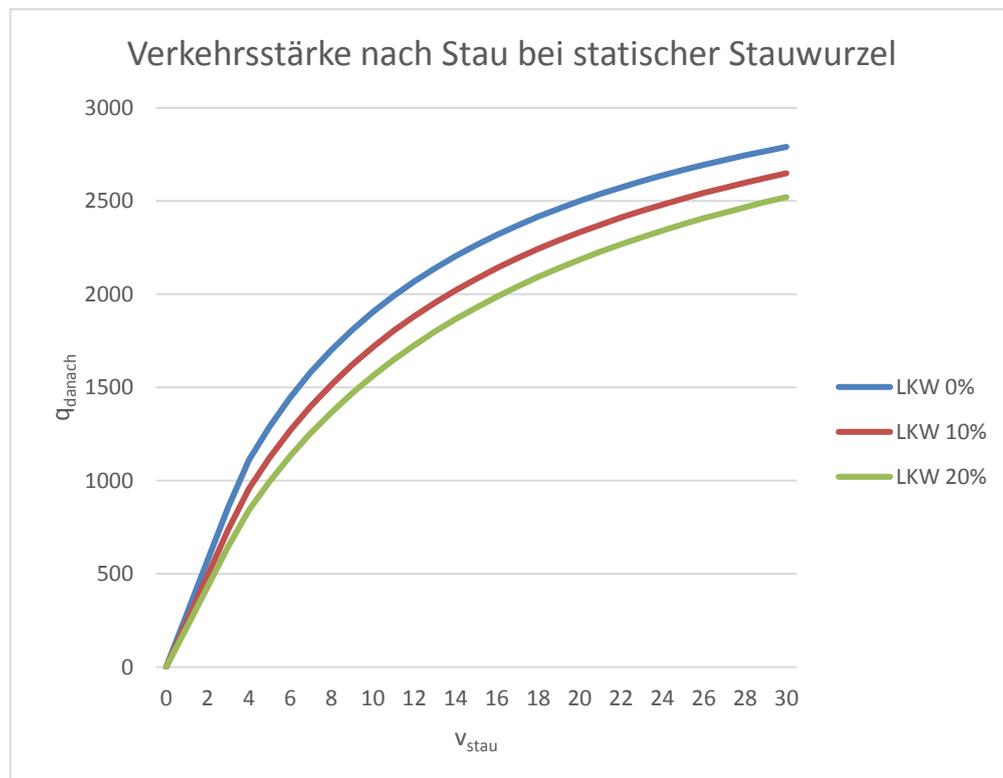


Abbildung 8: Verkehrsstärke im und nach dem Stau bei statischer Stauwurzel und zwei Fahrspuren in Abhängigkeit zur Staugeschwindigkeit und dem LKW-Anteil

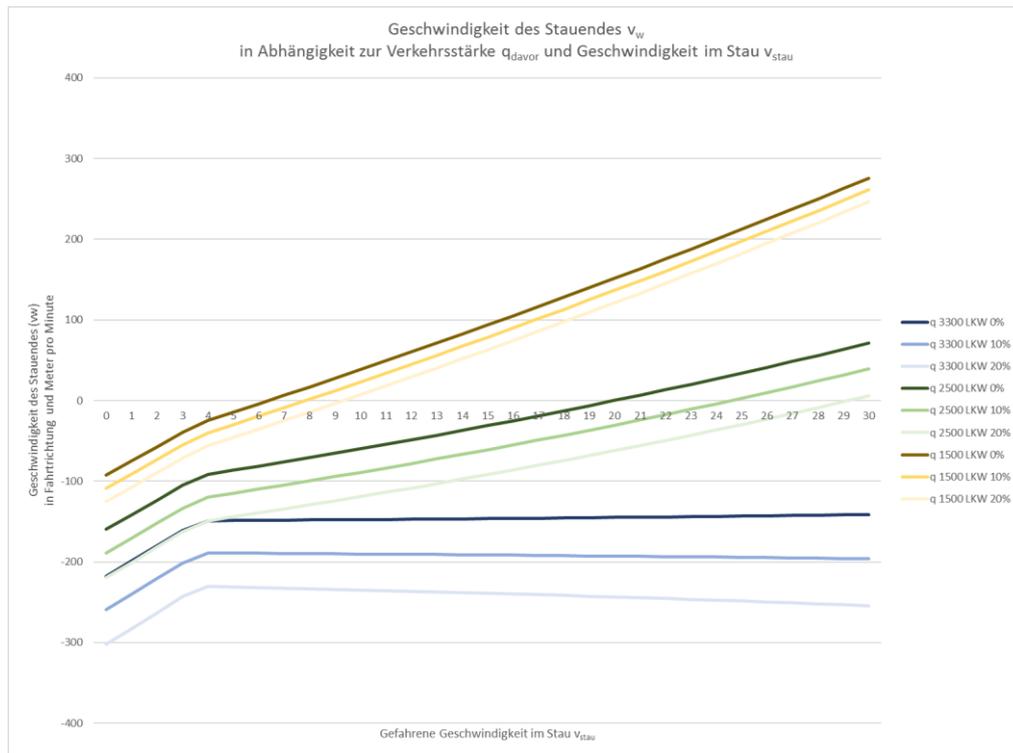


Abbildung 9: Geschwindigkeit des Stauendes v_w in Abhängigkeit zur Verkehrsstärke q_{davor} und der gefahrenen Geschwindigkeit im Stau v_{stau}

Eine Verkehrsstärke von $q_{davor} = 3300$ entspricht der Kapazitätsgrenze für zwei Fahrspuren die mit jeweils 100 km/h befahren werden. Hier ist ersichtlich, dass, wenn sowohl innerhalb als auch außerhalb des Staus Bedingungen an der Kapazitätsgrenze herrschen, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Stauendes unabhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit im Stau, konstant bleibt. Desto weniger Fahrzeuge nachkommen, desto höher ist die Auswirkung der gefahrenen Geschwindigkeit im Stau auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Stauendes.

Ähnlich verhält es sich mit den Auswirkungen der Verkehrsstärke vor dem Stau q_{davor} auf die Geschwindigkeit des Stauendes wie in Abbildung 10 illustriert. Wenn keine Fahrzeuge mehr nachkommen, also $q_{davor} = 0$ bewegt sich das Stauende mit Staugeschwindigkeit v_{stau} in Fahrtrichtung und zwar unabhängig vom Anteil der Lastkraftwagen. Desto höher die Geschwindigkeit im Stau ist, desto mehr wirkt sich eine geringere Verkehrsstärke vor dem Stau auf die Geschwindigkeit des Stauendes aus. Mit anderen Worten löst sich der Stau schneller auf, desto höher die Geschwindigkeit im Stau ist und desto weniger Fahrzeuge nachkommen.

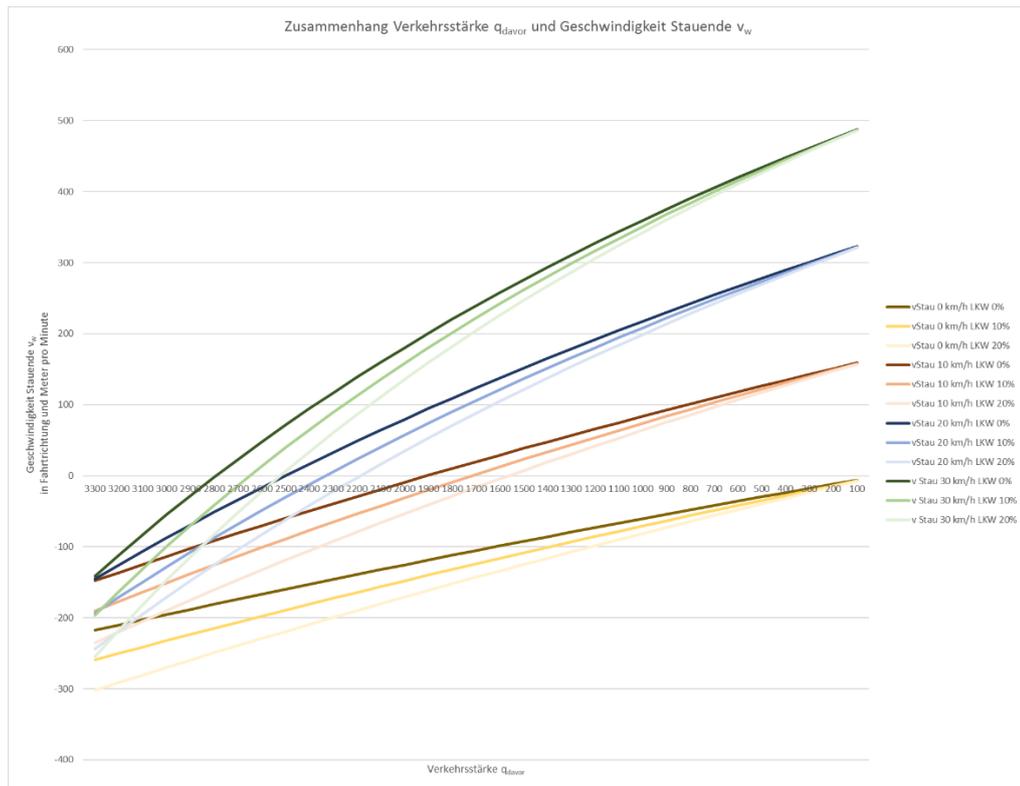


Abbildung 10: Geschwindigkeit des Stauendes v_w in Abhängigkeit der Verkehrsstärke vor dem Stau q_{davor}

Detektion der Staulänge

Die Länge des Staus hat sowohl eine zeitliche, als auch eine räumliche Dimension. Dabei sind diese voneinander unabhängig. Ein nächtlicher Stau mit einer geringen räumlichen Ausdehnung kann eine hohe zeitliche Komponente aufweisen. Die Ausdehnungsgeschwindigkeit eines Staus ist Abhängig von der Ausdehnungsgeschwindigkeit der Stauwurzel v_{ww} und des Stauendes v_{we} . Bei $v_{ww} - v_{we} < 0$ gilt, dass sich der Stau abbaut, bei $v_{ww} = v_{we}$ bewegen sich Stauwurzel und Stauende gleichschnell, somit bleibt die Ausdehnung konstant. Bei $v_{ww} - v_{we} > 0$ wächst der Stau um die entsprechende Geschwindigkeit. Allerdings bedeutet das auch, dass sich für die Bestimmung der Länge des Staus bereits mindestens zwei Fahrzeuge mit FC-Daten im Stau befinden müssen. Dabei ist die räumliche Position der Stauwurzel nur mit einer Unsicherheit in Abhängigkeit von Ausbreitungsgeschwindigkeit und Durchdringungsgrad zu bestimmen.

Die Räumliche Ausdehnung ergibt sich durch die letzte bekannte Position der Stauwurzel und des Stauendes zuzüglich des Wachstums der Stauwurzel und des Stauendes seit der letzten Positionsbestimmung. Damit berechnet sich die Ausdehnung Δs_{stau} in Meter nach einer

Zeitspanne Δt aus dem letzten bekannten Abstand Δs_{we-ww} und der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Stauwurzel v_{ww} und des Stauendes v_{we} .

$$\Delta s_{stau} = \frac{(v_{ww} - v_{we}) * \Delta t}{3,6} + \Delta s_{we-ww}$$

$$\Delta s_{stau} = \frac{\left(-2 \frac{km}{h} - \left(-11 \frac{km}{h}\right)\right) * 60 s}{3,6} + 1000 m = 150 m + 1000 m = 1150 m$$

Die zeitliche Ausdehnung berechnet sich aus der aktuell benötigten Zeit um den Stau vom Stauende bis zur Stauwurzel zu durchqueren. Dabei wird der aktuelle Zustand betrachtet und nicht berücksichtigt, dass sich während der Durchquerung des Staus auch die Stauwurzel bewegt und somit die Ausdehnung dynamisch ändert.

$$\Delta t_{stau} = \frac{\Delta s_{we-ww} * 3,6 + \Delta t * (v_{ww} - v_{we})}{v_{stau}}$$

$$\Delta t_{stau} = \frac{1000 m * 3,6 + 60 s * \left(-2 \frac{km}{h} - \left(-11 \frac{km}{h}\right)\right)}{10 \frac{km}{h}} = 414 s = 6,9 min$$

Kurz gesagt ergibt sich die Änderung der Reisezeit Δt_r im Stau in Sekunden aus der Formel:

$$\Delta t_r = \frac{(v_{ww} - v_{we}) * \Delta t}{v_{stau}}$$

Im Falle einer statischen Stauwurzel $v_{ww} = 0$ breitet sich der Stau räumlich mit einer Geschwindigkeit von $v_{we} - 0 = v_{we}$ aus. Der Durchsatz an der Stauwurzel kann bei diesem Sonderfall auch ohne FC-Daten ermittelt werden, falls ein Zählquerschnitt nach dem Stau vorhanden ist. Hier gilt dann dass die Verkehrsstärke im Stau q_b der Verkehrsstärke nach dem Stau q_a entspricht. Im Sonderfall einer Totalsperre $q_b = q_a = 0$ und $v_{stau} = 0$ ist die zeitliche Ausdehnung des Staus nicht bestimmbar da sie theoretisch unendlich ist.

2.4 FCD-Informationsverarbeitungsprozess

In einem prototypischen FCD-System erfolgt die Verarbeitung von Rohdaten (GNSS-Positionsdaten) zu den gewünschten Verkehrsinformationen in vier Schritten (Abbildung 11):

1. **Collect:** Sammeln von Datenpaketen mit Punktkoordinaten aus verschiedenen Quellen. Vorverarbeitung und Adaption der Daten in ein lokales Datenmodell.
2. **Assemble:** Zusammensetzen der Punktkoordinaten mit Zeitbezug zu linienhaften Trajektorien
3. **Match & Analyse:** Analyse der Trajektorien, Erkennen typischer Muster, Projektion der

Trajektorie auf einen hinterlegten segmentierten Straßengraphen, Berechnen von Befahrungen (Travels) auf den Segmenten

4. **Persist & Provide:** Speicherung und Bereitstellung der berechneten Analyseergebnisse (z.B. Befahrungen, Level-of-Service, Stillstände) für nachgelagerte Systeme.

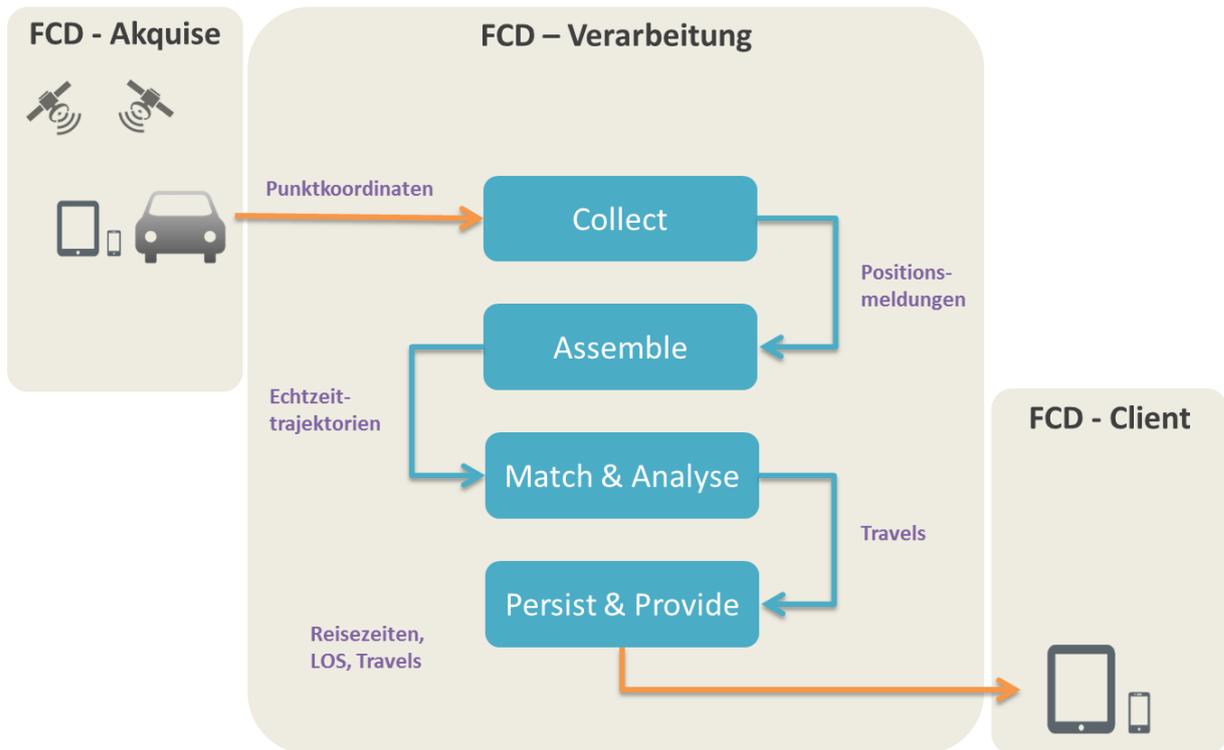


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Prozessschritte eines prototypischen FCD-Systems

Innerhalb dieser Prozessschritte versuchen die Algorithmen zum einen die Eingangsdatenqualität zu verbessern (z.B. Verwerfen von falschen GNSS-Positionen) und zum anderen die gewünschten Informationen möglichst korrekt und schnell zu extrahieren. In manchen Fällen können diese Zielsetzungen im Konflikt stehen. Zum Beispiel kann eine Erhöhung der Datenqualität der Eingangsdaten die Erkennungsraten von Algorithmen verbessern (Qualitätsparameter Korrektheit). Dies führt aber in der Regel zu einer zusätzlichen Verzögerung in der Informationsbereitstellung (Qualitätsparameter Aktualität). Des Weiteren führen auch die Definitionen der zu extrahierenden Verkehrsinformationen zu zusätzlichen Qualitätseinbußen. Definiert man eine relevante Verzögerung als Verzögerung größer einer

Minute, kann diese im besten Fall nach einer Minute erkannt werden. Eine Unterschreitung dieses theoretischen Werts ist nicht möglich (Qualitätsparameter Aktualität).

Die einzelnen Prozessschritte eines FCD-Systems werden über sogenannte **Systemparameter (SP)** konfiguriert. Diese Parameter sind meist numerische Werte, die zur Konfiguration der Prozesse und Algorithmen dienen. Sie haben mittelbar oder unmittelbar Einfluss auf die Qualität der Verkehrsinformationen. Das Übertragungsintervall der FC-Daten zum FCD-System wäre ein Beispiel für einen einstellbaren Parameter. Im Hinblick auf die Aktualität der extrahierten Verkehrsinformationen macht es einen Unterschied, ob die Daten alle 20 Sekunden oder 2 Minuten übertragen werden. Neben den Systemparametern haben noch sogenannte **Einflussfaktoren (EF)** einen indirekten Einfluss auf die Qualität der Verkehrsinformationen. Zum Beispiel sind die Prozessorleistung oder die Anzahl an Prozessoren derartige Einflussfaktoren, mit denen Verarbeitungsschritte beschleunigt werden können. Außerdem gehören Erkennungsraten von einzelnen Algorithmen auch unter diese Gruppe, da sie nicht einstellbar, sondern nur messbar sind. Sie haben jedoch einen Einfluss auf den Qualitätsparameter Korrektheit.

Systemparameter und Einflussfaktoren können **einstellbar** (frei wählbar) oder **beeinflussbar** sein. Sie können aber auch **nicht beeinflussbar** sein. Zum Beispiel ist das Übertragungsintervall für die Übertragung von FC-Daten zum FCD-System in den meisten Fällen nicht beeinflussbar, weil das FCD-System meist keinen Einfluss auf die telematische FCD-Erfassung hat. Auch die Geschwindigkeit, wie lange die Daten von der Messung bis in das FCD-System brauchen, ist in aller Regel nicht vom FCD-Systembetreiber beeinflussbar. Es ist aber möglich diese Verzögerung zu **messen**. Die erhaltenen **Latenzzeiten (L)** können als Zufallsvariable modelliert werden und somit für die Modellierung des Qualitätsparameters (QP1) Aktualität berücksichtigt werden. Weiteres ist es möglich Erkennungsraten von einzelnen Algorithmen zu messen und in die Modellierung des Qualitätsparameters (QP3) Korrektheit zu berücksichtigen.

Systemparameter und Einflussfaktoren sind Parameter von einzelnen Services eines prototypischen FCD-Systems. Würde man diese Systemparameter und Einflussfaktoren direkt als Modellparameter in ein stochastisches Modell integrieren, würde dies sehr aufwändig werden. Dieser feingranularen Perspektive auf Sub-Service-Ebene wird eine gesamtheitlichere Sicht gegenübergestellt:

- Sicht auf das gesamte FCD-System und der einzelnen Services als Einheit
 - Latenzzeiten: messbar und daher als Zufallsvariable modellierbar
- Sicht auf einzelne Services eines prototypischen FCD-Systems

- Systemparameter: einstellbar, nicht einstellbar
- Einflussfaktoren: messbar; beeinflussbar oder nicht beeinflussbar

Die folgenden Unterabschnitte geben Einblicke in die Prozessschritte, die von einem prototypischen FCD-System zu erwarten sind, um aus den GNSS-Positionsdaten verschiedener Datenquellen, einheitlich aufbereitete und auf das Straßennetz referenzierte Verkehrsinformationen zu erhalten. Als Grundlage der Beschreibung der Prozessschritte dient die Umsetzung der FCD-Plattform der FCD Modellregion Salzburg, die von der Salzburg Research Forschungsgesellschaft betrieben wird. Es wird davon ausgegangen, dass in jedem System zur Verarbeitung von FC-Daten sehr ähnliche Prozessschritte durchlaufen werden müssen und ferner ähnliche Kennzahlen bezüglich Qualitäten und Latenzzeiten messbar sind.

	Beschreibung	Einfluss auf	Typ
L1	Latenz der Positionsdaten bei Ankunft im FCD-System.	QP1	messbar
L2	Latenzzeit der Vorverarbeitung der Positionsrohdaten (Collect).	QP1	Messbar, teilweise einstellbar, beeinflussbar
L3	Latenzzeit des Aggregieren der Positionen zu Trajektorien (Assemble).	QP1	Messbar, teilweise einstellbar, beeinflussbar
L4	Latenzzeit der Analyse und des Map-Matching Algorithmus.	QP1	Messbar, teilweise einstellbar, beeinflussbar
L5	Latenzzeit für das Speichern und Bereitstellen der Daten.	QP1	Messbar, teilweise einstellbar, beeinflussbar
L6	Latenzzeit für die Übertragung der Daten zum Client.	QP1	Messbar, teilweise einstellbar, beeinflussbar

Tabelle 4: Latenzzeiten der einzelnen Verarbeitungsschritte im FCD-System

2.4.1 Collect

Der initiale Prozessschritt Collect (Abbildung 12) deckt die Anforderung der Sammlung / Datenübernahme von FC-Daten aus unterschiedlichen Quellen und deren Validierung ab.

Nach der Übernahme der GNSS-Rohdaten in das System werden die Daten für die folgenden Verarbeitungsschritte homogenisiert.

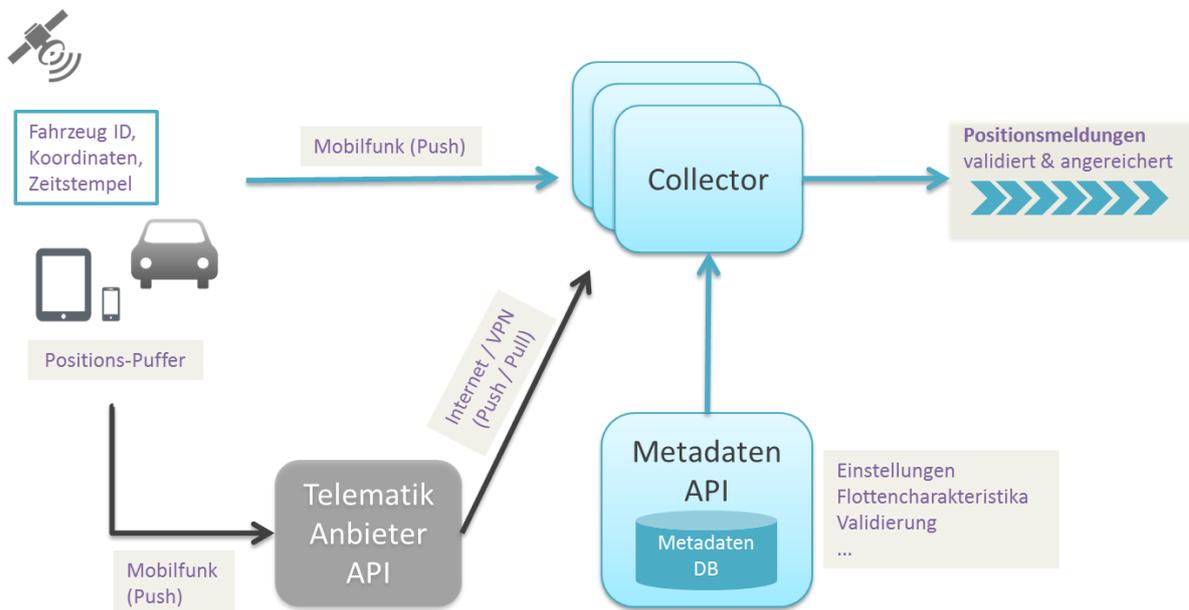


Abbildung 12: Prozessschritt Collect

2.4.1.1 Datensammlung und Übernahme

Wie in Abbildung 12 gezeigt wird können FC-Daten auf unterschiedlichen Wegen zu dem FCD-Dienst gelangen.

Im direkten Fall werden die GNSS-Lokalisierungen vom aufzeichnenden Gerät (mobile Anwendungen, fest verbaute FCD-Box, ...) an den FCD-Dienst übermittelt. Die Übertragung der Daten erfolgt über das Mobilfunknetz an eine entsprechende Schnittstelle des FCD-Dienstes (PUSH). Selbst in diesem direkten Fall der Datenübertragung kann nicht davon ausgegangen werden, dass jede GNSS-Lokalisierung direkt nach ihrer Aufzeichnung am Gerät an den FCD-Dienst übermittelt wird. Oft werden einzelne GNSS-Lokalisierungen auf dem Gerät vor einer Übermittlung gesammelt. Es werden dann periodisch, z.B. alle 30 Sekunden, alle am Gerät aufgezeichnete Positionen an die Schnittstelle übermittelt.

Da eine Vielzahl von Fahrzeugen bereits mit GNSS-Lokalisierungssystemen (von Telematik-anbietern für Fahrtenbuch-Lösungen oder Navigationssysteme) ausgestattet sind, werden die Daten im Normalfall vom Gerät an ein Serversystem des jeweiligen Anbieters geliefert. Der FCD-Dienst bindet dann über eine Schnittstelle das jeweilige Serversystem an. Dieses dient nun als Datenlieferant. Die Datenübermittlung an den FCD-Dienst kann entweder vom Datenlieferanten ausgelöst werden (PUSH) oder der FCD-Dienst holt periodisch die neu im System des Datenlieferanten eingetroffenen Daten ab (PULL).

Die konkrete Anbindung an eine Schnittstelle eines Datenlieferanten wird in einer sogenannten Collector-Einheit gekapselt.

2.4.1.2 Validierung und Filterung der Daten

Nachdem die Daten in der Collector-Einheit von dem spezifischen Format des Datenlieferanten in das interne Format des FCD-Systems adaptiert wurden, werden erste Filterungen der Daten zur Qualitätsverbesserung der Rohdaten durchgeführt. Dies umfasst z.B. die Filterung von Duplikaten (doppelte Zeitstempel oder Koordinaten) oder fehlerhaften Daten (unplausible Koordinaten).

2.4.1.3 Datenweiterleitung

Als Ergebnis stellen alle Collector-Einheiten die homogenisierten Daten in einem internen Format für die nachgelagerten Prozesse zur Verfügung.

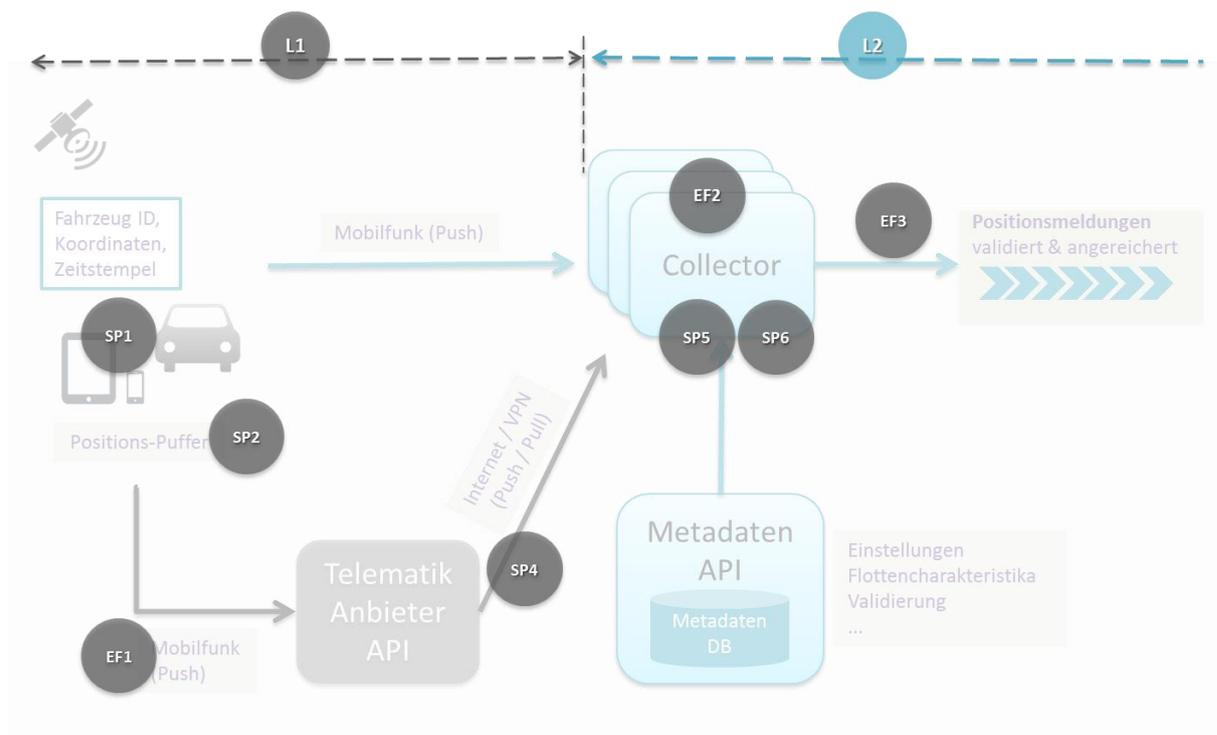


Abbildung 13: Systemparameter, Einflussfaktoren und Latenzzeiten der FCD-Akquise und im Schritt Collect

Beschreibung	Einfluss auf	Typ
L1 Latenz der Positionsdaten bei Ankunft im FCD-System.	QP1	messbar

	Beschreibung	Einfluss auf	Typ
SP1	Sampling-Intervall	QP1	einstellbar, beeinflussbar, messbar
SP2	Übertragungsintervall am Gerät gesammelter Positionsdaten zu FCD- / Telematiksystem	QP1	einstellbar
EF1	Mobilfunklatenz	QP1	nicht beeinflussbar, messbar
SP4 optional	Übertragung / Abfrageintervall von Positionsdaten bei Telematikanbietern	QP1	einstellbar

Tabelle 5: Systemparameter, Einflussfaktoren und Latenzzeiten der FCD-Akquise

	Beschreibung	Einfluss auf	Typ
L2	Latenzzeit der Vorverarbeitung der Positionsrohdaten (Collect). Ergibt sich bzw. ist beeinflusst von folgenden einzelnen Parametern.	QP1	messbar

	Beschreibung	Einfluss auf	Typ
EF2	Latenzzeit der Rohdaten in der Vorverarbeitung (Filterung, Bereinigung von Ausreißer, ...)	QP1	beeinflussbar, messbar
EF3⁶	Latenzzeit der Übertragung der gefilterten Daten in die nachgelagerten Systeme	QP1	beeinflussbar, messbar
SP5	Filterung von Rohdaten beeinflusst die Vollständigkeit der Daten	QP3, QP1	einstellbar

⁶ separat auszuweisen, stark abhängig von der Architektur des FCD-Systems

SP6	Filterung von Rohdaten beeinflusst die Positionsgenauigkeit der Daten	QP6, QP1	einstellbar
-----	---	----------	-------------

Tabelle 6: Systemparameter, Einflussfaktoren und Latenzzeiten im Schritt Collect

2.4.2 Assemble

Die vom Prozessschritt Collect weitergeleiteten homogenisierten GNSS-Lokalisierungen werden nun zu Positionstrajektorien der jeweiligen Fahrten verkettet. Diese Trajektorien dienen als Datengrundlage für die folgenden Auswertungsalgorithmen.

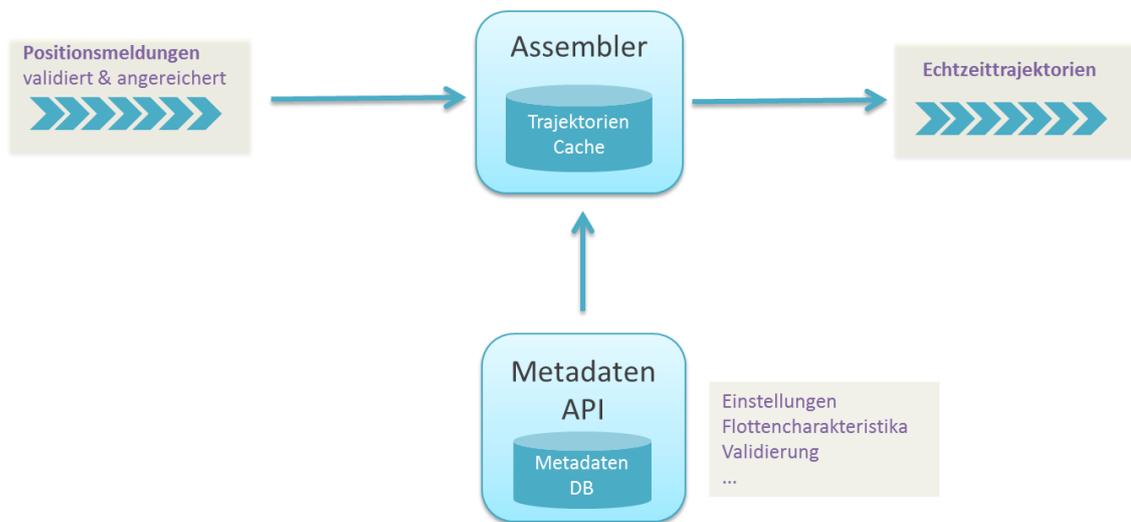


Abbildung 14: Prozessschritt Assemble

2.4.2.1 Verkettung zu Positionstrajektorien

Wie Abbildung 14 zeigt, nimmt die Assembler-Einheit die von den Collector-Einheiten aufbereiteten und im Format homogenisierten Lokalisierungsdaten entgegen. Auf Basis der Fahrtenkennung wird geprüft, ob bereits eine Trajektorie zu dieser Kennung besteht und erweitert werden muss. Ist dies nicht der Fall wird eine neue Trajektorie erstellt.

Bei der Verkettung wird die zeitliche Folge der Lokalisierungen hergestellt, verzögert ankommende Datenpakete werden korrekt in die Trajektorien eingefügt.

2.4.2.2 Datenweiterleitung

Wird eine Trajektorie erstellt/erweitert, wird geprüft, ob die Fahrt bereits weit genug fortgeschritten ist und gewissen Qualitätskriterien entspricht um am Straßennetz ausgewertet zu werden. Ist dies der Fall wird der aktuelle Zustand der Trajektorie an das System zur Echtzeit-Auswertung weitergeleitet.

Ab der erstmaligen Weiterleitung führt grundsätzlich jede Erweiterung der Trajektorie zu einer erneuten Übermittlung zur Auswertung. Sollten gewisse Qualitätskriterien unterschritten werden, wird die Weiterleitung allerdings ausgesetzt und erst fortgesetzt, wenn diese wieder erfüllt sind.

2.4.2.3 Anbindung – Metadaten

Über eine Anbindung zur Metadaten-Datenbank wird die Verbindung zwischen Trajektorien und entsprechenden Flottencharakteristika hergestellt. Diese können Einfluss auf Parametrisierungen der nachgelagerten Algorithmen haben (z.B. Map Matching). Ebenso erfolgen auf Basis der Daten in der Metadatenbank Prüfungen, bevor die Trajektorien zur Speicherung weitergeleitet werden.

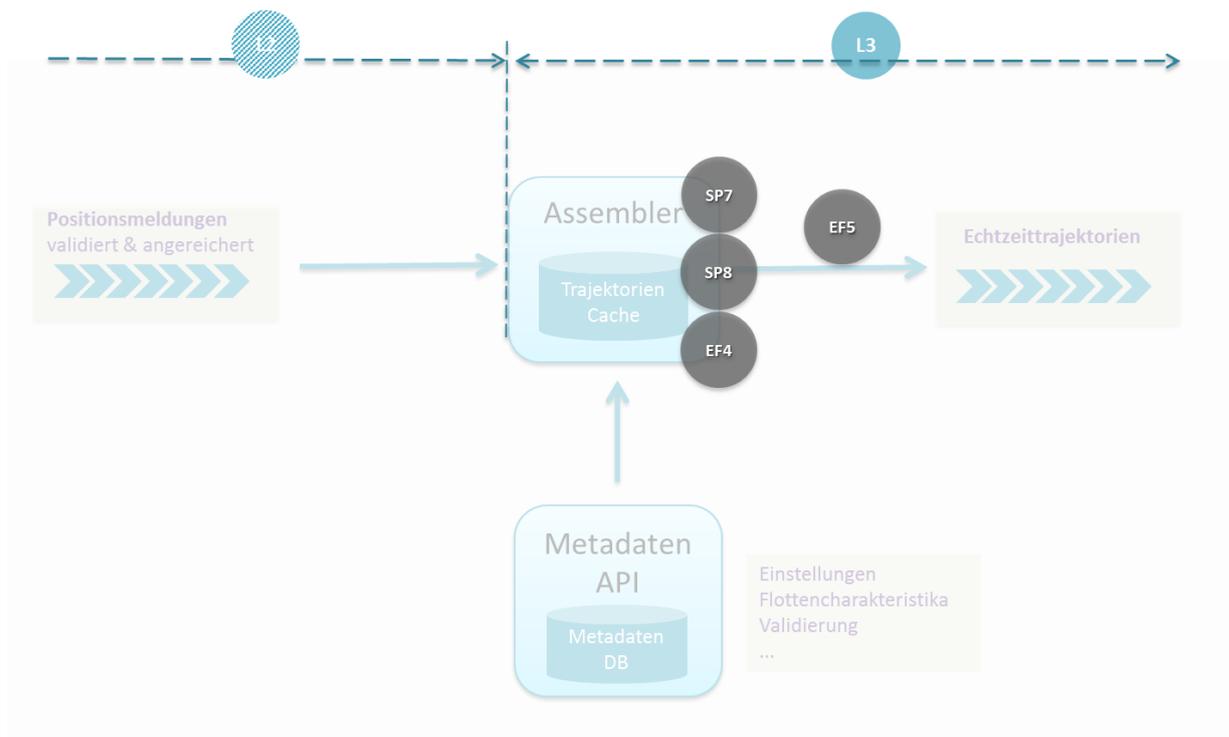


Abbildung 15: Systemparameter, Einflussfaktoren und Latenzzeiten im Schritt Assemble

	Beschreibung	Einfluss auf	Typ
L3	Latenzzeit des Aggregieren der Positionen zu Trajektorien (Assemble)	QP1	messbar

	Beschreibung	Einfluss auf	Typ
SP7	Kriterien für das Verwerfen von zu kurzen oder qualitativ schlechten Trajektorien beeinflussen die Vollständigkeit	QP3, QP1	einstellbar
SP8	Durch korrekte zeitliche Reihung und Einsortieren von neuen Daten in die Trajektorie wird die Positionsgenauigkeit innerhalb einer Trajektorie beeinflusst	QP3, QP1	einstellbar
EF4	Latenzzeit für das Bilden einer Trajektorie (Filterung, Zusammenfügen von Positionen, Warten bis bestimmte Qualitätskriterien erfüllt sind ...)	QP1	beeinflussbar, messbar
EF5⁷	Latenzzeit der Übertragung der zusammengeführten Trajektorien in die nachgelagerten Systeme	QP1	beeinflussbar, messbar

Tabelle 7: Systemparameter, Einflussfaktoren und Latenzzeiten im Schritt Assemble

2.4.3 Match & Analyse

Da die Auswertung der FC-Daten bezogen auf den zugrundeliegenden Straßengraphen erfolgt, muss in einem ersten Schritt die Referenzierung der Positionstrajektorie auf diesen durchgeführt werden.

Auf Basis des Map Matching-Ergebnisses erfolgt eine Berechnung von Befahrungen inkl. Fahrzeiten (Travels) auf Segmentebene des Graphen. Zusätzlich erfolgen weitere Auswertungen der Daten, um z.B. Bewegungsmuster zu errechnen.

2.4.3.1 Vorverarbeitung der Positionstrajektorien

Der Analyseprozess wird für jede Trajektorie durchgeführt. Die Trajektorie wird einer Reihe von Vorverarbeitungsschritten (z.B. Entfernen von Positionsausreißern) und Prüfungen

⁷ separat auszuweisen, stark abhängig von der Architektur des FCD-Systems

unterzogen. Die bereinigte Trajektorie wird anschließend über den Aufruf der Map Matching-API auf das Straßennetz referenziert. Dies bildet die Basis, um alle extrahierten Verkehrsinformationen auf den Straßengraphen beziehen zu können.

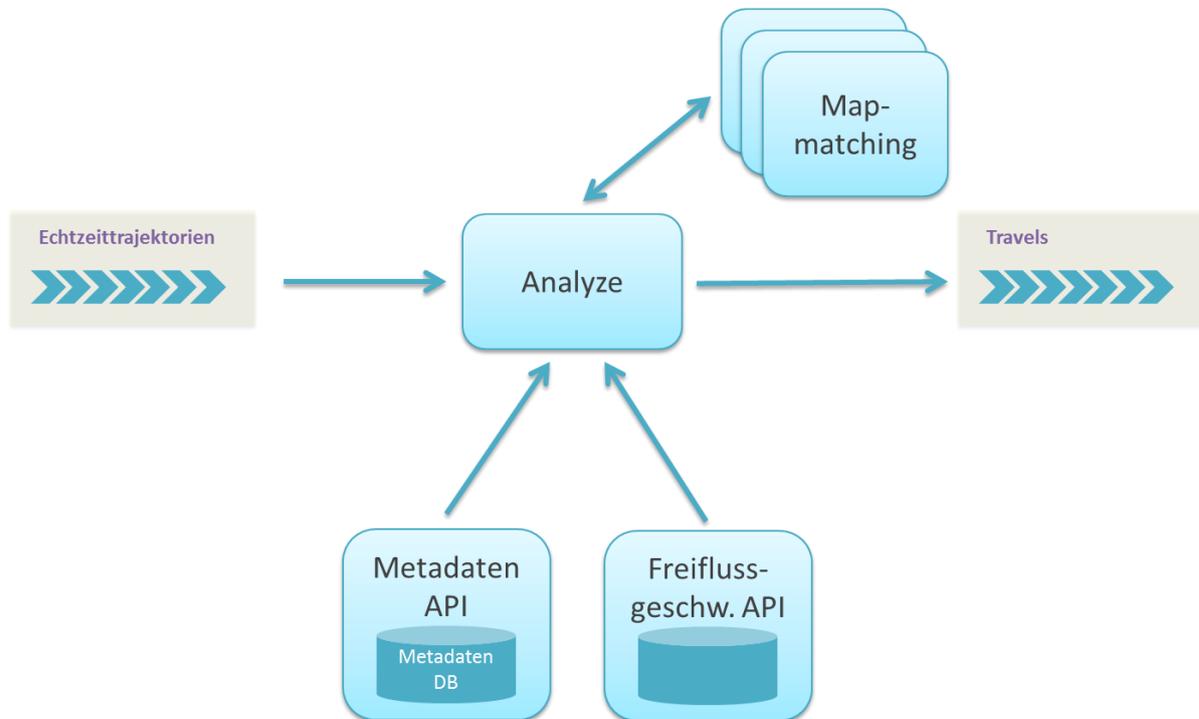


Abbildung 16: Prozessschritte Match & Analyse

2.4.3.2 Map Matching

Durch den Aufruf der Map Matching-API wird für die übergebene Trajektorie der wahrscheinlichste Weg dieses Fahrzeugs im Straßennetz ermittelt. Bei dem beispielhaft gewählten Map Matching-Ansatz handelt es sich um ein inkrementelles Map Matching, welches die Trajektorie und die zugrundeliegenden Lokalisierungen nach und nach auf das Straßennetz referenziert.

Durch kombinierte Mechanismen, wie geometrischem Matching von Lokalisierungen mit den Geometrien der Wegsegmente oder auch dem Abgleich mit Routing-Ergebnissen, werden die möglichen Pfade des Fahrzeugs im Straßennetz bewertet. Die wahrscheinlichsten Pfade werden in jeder Iteration weiterverfolgt und neu bewertet.

Als Ergebnis des Map Matching wird der wahrscheinlichste Pfad im Straßennetz retourniert. Zusätzlich zu dem Pfad liefert das Map Matching Indikatoren über die Zuverlässigkeit des Ergebnisses.

2.4.3.3 Berechnung der Travels

Die Trajektorie und deren Referenzierung auf das Straßennetz werden nun dahingehend miteinander verschnitten, als dass für jeden Link richtungsbezogen ein entsprechendes Travel erzeugt wird. Es werden die Eintritts- und Austrittszeitpunkte der Trajektorie für jeden Link des Map Matching-Ergebnisses ermittelt (durch lineare Interpolation zwischen den Positionen). Aus dieser Information lässt sich im Anschluss die Fahrzeit und Geschwindigkeit errechnen.

2.4.3.4 Berechnung von erweiterten Informationen

In einem FCD-Dienst kann ein Mechanismus angeboten werden, mit dem sich zusätzliche Informationen über Teile oder über ein komplettes Travel ausdrücken und transportieren lassen. In der Regel sind das Level-of-Service-Werte oder Verzögerungen. Es gibt aber eine ganze Reihe von weiteren Möglichkeiten von extrahierten erweiterten (Verkehrs-)Informationen.

Beispiele einer Kategorie von erweiterten Informationen sind sogenannte **Bewegungsmuster**. Um innerhalb eines Links detaillierte Informationen über das Bewegungsverhalten (einzeln Stillstand, Stop-And-Go usw.) der Fahrt zu geben, werden – wenn möglich – Bewegungsmuster errechnet. Mit Ansätzen der Signalverarbeitung können diese definierten Muster in den GNSS-Lokalisierungen erkannt werden. Diese werden als erweiterte Informationen auf die entsprechenden Teile der Befahrungen (Travels) referenziert.

2.4.3.5 Datenweiterleitung

Die generierten Travels inkl. ihrer zugeordneten erweiterten Information werden für die weitere Verarbeitung an nachfolgend beschriebene Prozessschritte weitergeleitet.

2.4.3.6 Parameter im Schritt Match & Analyse

In diesem Abschnitt werden die Systemparameter und Einflussfaktoren im Schritt Match & Analyse dargestellt.

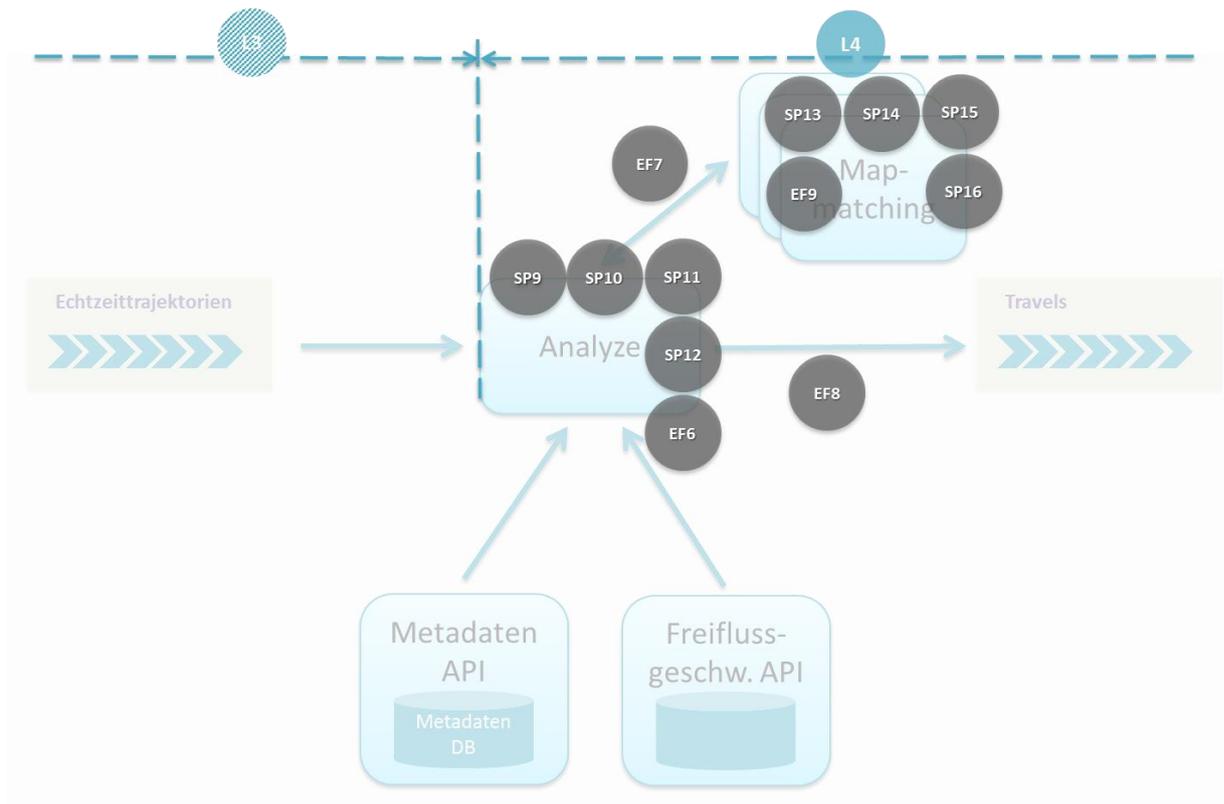


Abbildung 17: Systemparameter, Einflussfaktoren und Latenzzeiten in den Schritten Match & Analyse

Beschreibung	Einfluss auf	Typ
L4	Latenzzeit der Analyse und des Map-Matching Algorithmus	QP1 messbar

Beschreibung	Einfluss auf	Typ
SP9	Mindestverzögerungsdauer um relevant zu sein	QP1 einstellbar
SP10	Mindestverzögerungslänge um relevant zu sein	QP1 einstellbar
SP11	Analysefenster der Signalverarbeitung, Analyse der letzten x Sekunden	QP1 einstellbar
SP12	Analysefenster der Signalverarbeitung, Analyse der letzten x Meter	QP1 einstellbar

EF6	Erkennungsrate des Algorithmus von Verzögerungen	QP3	beeinflussbar, messbar
SP13	Maximale Entfernung eines Punktes zu einem Link für eine erfolgreiche Zuordnung	QP3	einstellbar
SP14	Minimale Länge eines Tracks und minimale Anzahl an Positionen, dass dieser verarbeitet werden kann	QP3, QP1	einstellbar
SP15	Maximale Anzahl an Links, die durch ein Routing überbrückt werden	QP3	einstellbar
EF7	Latenzzeit des Map Matching-Algorithmus	QP1	beeinflussbar, messbar
EF8	Latenzzeit zum Übertragen der Daten	QP1	beeinflussbar, messbar
SP16	Maximale Latenzzeit nach Abbruch des Algorithmus	QP3, QP1, QP2	einstellbar
EF9	Korrektes Matching des Map Matching-Algorithmus	QP3	beeinflussbar, messbar

Tabelle 8: Systemparameter, Einflussfaktoren und Latenzzeiten in den Schritten Match & Analyse

2.4.4 Persist & Provide

Nachdem in den vorhergehenden Prozessschritten alle Informationen generiert wurden, werden sie im abschließenden Schritt gespeichert und stehen zur Abfrage über eine Schnittstelle anderen Systemen (Clients) zur Verfügung. Ein Client kann beispielsweise die Informationen aufbereiten und visualisieren. Die dort entstehenden Latenzzeiten sind nicht mehr im Wirkungsbereich des FCD-Systems.

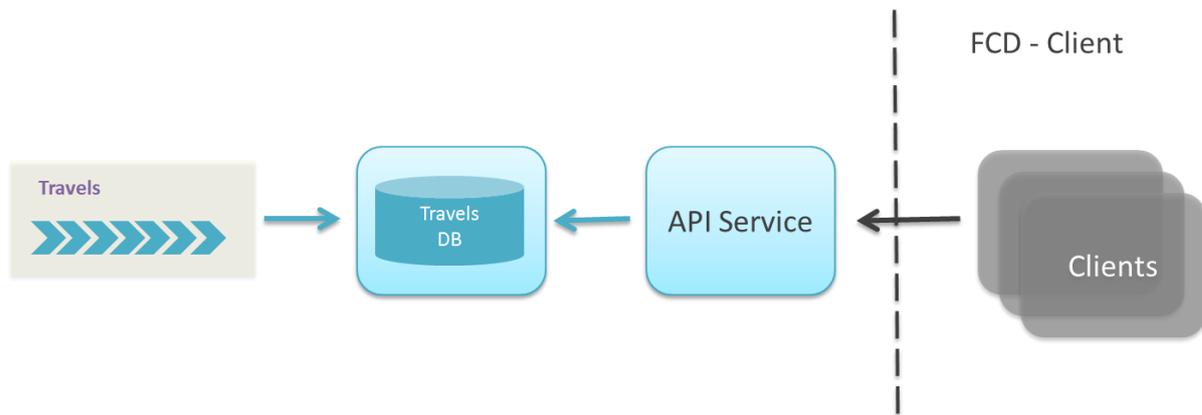


Abbildung 18: Prozessschritte Persist & Provide

Die Speicherung erfolgt, indem Travels in der zeitlichen Reihenfolge ihrer Erzeugung in eine zentrale Datenbank gespeichert werden.

Während dieses Speicherungsprozesses erfolgt ein Abgleich, der sicherstellt, ob und bei welchen Travels Updates noch zulässig sind. Travels, die sich mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch durch eine Erweiterung der Trajektorie um neue GNNS-Lokalisierungen nicht mehr ändern können, werden nicht mehr aktualisiert und liegen somit in ihrer finalen Version vor. Zusätzlich werden entsprechende Operationen (CREATE, UPDATE, DELETE) zugewiesen.

Zum Beispiel kann ein Client wie in Abbildung 19 die Schnittstelle des FCD-Systems periodisch (z.B. jede Minute) abfragen, um Datenpakete zu erhalten. Abhängig von der Abfrage hinsichtlich Inhalt (z.B. Travels, erweiterte Informationen), örtlicher Filterung (z.B. regional, nur bestimmte Straßenkategorien) oder zeitlicher Filterung (z.B. für die letzte Woche) ändert sich die Latenzzeit der Auslieferung der Daten.

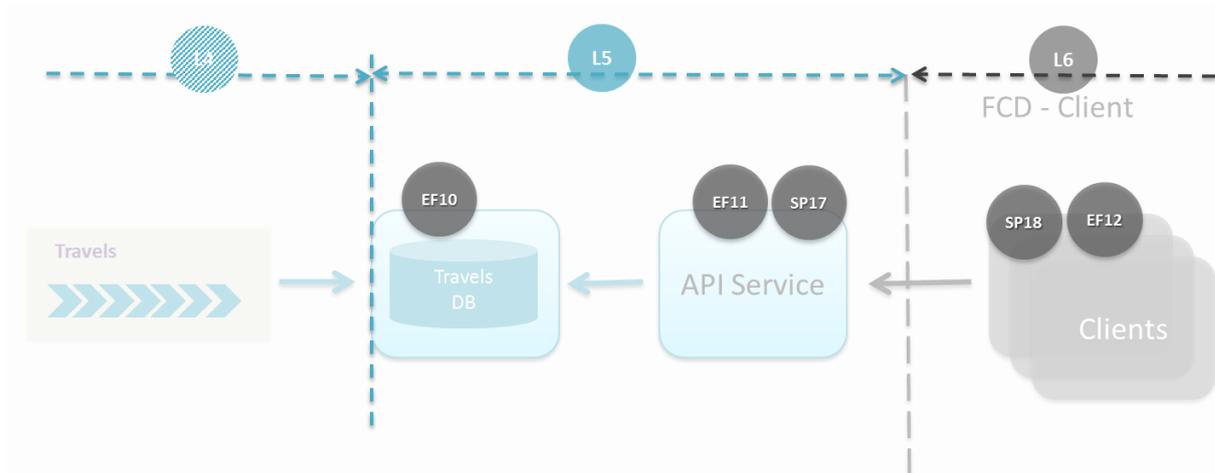


Abbildung 19: Systemparameter, Einflussfaktoren und Latenzzeiten im Schritt Persist & Provide

	Beschreibung	Einfluss auf	Typ
L5	Latenzzeit für das Speichern und Bereitstellen der Daten	QP1	messbar

	Beschreibung	Einfluss auf	Typ
EF10	Latenzzeit für die Speicherung	QP1	beeinflussbar, messbar
EF11	Latenzzeit für die Bereitstellung der Daten (Auslesen und Adaptieren)	QP1	beeinflussbar, messbar
SP17	Zeitliche, Räumliche oder inhaltliche Filterung der Daten	QP1	einstellbar

Tabelle 9: Systemparameter, Einflussfaktoren und Latenzzeiten im Schritt Persist & Provide

	Beschreibung	Einfluss auf	Typ
L6	Latenzzeit für die Übertragung der Daten zum Client	QP1	messbar

	Beschreibung	Einfluss auf	Typ
SP18	Zeitintervall zum Datenabholen	QP1	einstellbar
EF12	Latenzzeit der Datenverarbeitung durch den Client	QP1	beeinflussbar, messbar

Tabelle 10: Systemparameter, Einflussfaktoren und Latenzzeiten des FCD-Clients

3 ARBEITSPAKET 3: BERECHNUNGEN UND VISUALISIERUNGEN

Auf Basis der theoretischen Grundlagen für die Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden aus dem Arbeitspaket 2 wurden im Arbeitspaket 3 unterschiedliche Berechnungen und Visualisierungen durchgeführt.

Für das Szenario „Stillstands-Detektion“, d.h. die Detektion von Stillständen in GPS-Trajektorien, wurden zwei unterschiedliche Verfahren evaluiert, nämlich (1) die Detektion von Stillständen mit einem raumzeitlichen Cluster-Verfahren nach Ye et al. (2009) sowie (2) die Detektion von Verzögerungsmustern auf Basis einer Zeitreihenanalyse nach Brunauer und Rehr (Brunauer & Rehr 2014). Beide Verfahren wurden auf österreichweite FCD-Testdaten der FCD Modellregion Salzburg angewandt. Die Ergebnisse wurden im Detail analysiert und miteinander verglichen (vgl. Abschnitt 3.1).

Für das Szenario „Stau-Detektion“ wurden 9 Stauereignisse anhand der von der ASFINAG bereitgestellten Daten der Dauerzählstellen sowie der FC-Daten aus der FCD Modellregion Salzburg im Detail analysiert und visualisiert (Tasks 3.1 bis 3.5 im Projektantrag). Für diese Stauereignisse wurden auch die anhand der Testdaten erreichten sowie die für die Erreichung definierter Qualitätsparameter notwendigen Durchdringungsgrade berechnet (vgl. Abschnitt 3.2).

Um eine realistische Einschätzung von FC-Durchdringungsgraden im gesamten österreichweiten Autobahnen- und Schnellstraßennetz zu erhalten, wurde eine Excel-Liste erstellt, mit Hilfe derer die notwendigen Durchdringungsgrade für alle ASFINAG-Dauerzählstellen auf Basis von konfigurierbaren Qualitätsparametern (z.B. maximal zulässige Lageungenauigkeit, Detektionswahrscheinlichkeit) berechnet werden können (Tasks 3.1 bis 3.5). Diese Berechnung wurde auch für das Open-Source GIS-Programm QGIS umgesetzt, wodurch die notwendigen Durchdringungsgrade auch auf einer Karte visualisiert werden können (Task 3.6 im Projektantrag). Beide Auswertungen sind im Abschnitt 0 dargestellt.

Auf Wunsch der ASFINAG wurde auch ein Vergleich von Bluetooth-basierten Fahrzeiten mit FCD-basierten Fahrzeiten für die Fahrzeitmessung am A1 Grenzübergang Walsberg durchgeführt um die Vor- bzw. Nachteile beider Messverfahren festzustellen (vgl. Abschnitt 3.4).

Abschließend wurden im FCD-System von Salzburg Research noch Latenzzeitmessungen mit einer FCD-Datenquelle durchgeführt, um den Qualitätsparameter „Aktualität“ für das Szenario „Stau-Detektion“ zu bestimmen. Die Ergebnisse sind im Abschnitt 0 dokumentiert.

Sämtliche Ergebnisse von AP 3 wurden in dem vorliegenden Bericht zusammenfasst.

(AP 3) Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade und Visualisierung	
(Z 3)	In diesem Arbeitspaket erfolgt die Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade für die definierten Szenarien auf Basis der vom Auftraggeber bereitgestellten Verkehrsstärken sowie anhand realer FC-Daten der FCD Modellregion Salzburg. Die Ergebnisse werden mit Hilfe eines GIS-Systems visualisiert und gegenübergestellt.
(A 3)	(3.1) Erhebung der Verkehrsstärken (Bereitstellung durch den Auftraggeber)
	(3.2) Umlegungen der Verkehrsstärken auf ein GIP-Referenznetz
	(3.3) Berechnung der notwendigen FCD-Fahrzeuge pro Stunde für die definierten Szenarien sowie Zeitkategorien
	(3.4) Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade für die Szenarien, repräsentative Abschnitte und Zeitkategorien
	(3.5) Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade anhand der Realdaten der FCD Modellregion Salzburg und Gegenüberstellung
	(3.6) GIS-basierte Visualisierung der FCD-Durchdringungsgrade
(D 3)	Bericht zu den berechneten und visualisierten FCD-Durchdringungsgraden

Tabelle 11: Ziele (Z), Aufgaben (A) und Berichte (D) im Arbeitspaket 3 lt. Projektantrag

3.1 Szenario „Stillstands-Detektion“

Stillstände von Fahrzeugen stellen für Autobahnbetreiber eine sicherheitsrelevante Information dar. Stillstände können beispielsweise **verkehrsbedingt** bei Verkehrsüberlastung auf einer oder mehreren Fahrspuren auftreten (man spricht in diesem Zusammenhang von einem verkehrsbedingten Stillstand) oder aber **nicht verkehrsbedingt** beispielsweise aufgrund einer Fahrzeugpanne oder einer Rast auftreten (man spricht dann von nicht verkehrsbedingten Stillständen). Stillstände werden dann in FC-Daten erfasst, wenn das Erfassungsgerät während der Stillstands-Dauer mit Strom versorgt wird und weiterhin GPS-Positionen aufzeichnet. Wird das Fahrzeug abgestellt bzw. stromlos geschaltet, dann werden Stillstände in der Regel nicht erfasst und können auch nicht detektiert werden. Werden Stillstände erfasst, dann sind sie Teil einer GPS-Trajektorie. Um sie weiter verarbeiten zu können, gilt es daher zuerst die Stillstände in einer GPS-Trajektorie zuverlässig zu detektieren. Dafür muss definiert werden, was unter einem Stillstand verstanden wird. In der Literatur wird ein Stillstand derart definiert, dass sich ein Fahrzeug x für eine bestimmte Zeit t nicht weiter als eine Distanz d bewegt (Sevlian & Rajagopal 2010). t und d sind Parameter und müssen empirisch gewählt werden. Zu Beginn des Projekts wurde in Abstimmung mit der ASFINAG

definiert, dass ein Stillstand detektiert werden soll, wenn sich ein Fahrzeug für mind. 10 Sekunden mit max. 5 km/h bewegt. In der Praxis hat sich jedoch herausgestellt, dass aufgrund von GPS-Abtastraten der FCD-Testdaten von mehr als 10 Sekunden Stillstände unter der Abtastrate nicht detektiert werden können. Nimmt man als Stillstands-Geschwindigkeit weiterhin die max. 5 km/h an und berechnet die Zeit, die ein Fahrzeug benötigt, um sich max. 200 Meter in eine Richtung zu bewegen, dann kommt man zu einer Dauer von $t = 144$ Sekunden (bei $d = 200\text{m}$), die das Fahrzeug mind. benötigt, um die 200 Meter mit 5 km/h zurückzulegen. In der Praxis spielt vor allem die GPS-Abtastrate eine entscheidende Rolle. Bei einem Abtastintervall von 60 Sekunden können nur Stillstände detektiert werden, bei denen die Geschwindigkeit für zumindest 60 Sekunden lang unter 5 km/h bleibt. In diesem Fall würde man aber 2 exakte Messungen am Beginn und Ende des 60-sekündigen Stillstands benötigen, was in der Praxis eher selten vorkommen dürfte. Generell gilt, dass die Stillstands-Detektion mit höheren Abtastintervallen eher schwierig durchzuführen ist, da in den Messungen meist auch Teile der Fahrt davor und danach enthalten sind, wodurch die gemessene Durchschnittsgeschwindigkeit steigt.

3.1.1 Stillstands-Detektion mit raumzeitlichem Clustering

Um Stillstände automatisiert in GPS-Trajektorien detektieren zu können, werden in der Literatur raumzeitliche Analyse-Methoden vorgeschlagen. Sevlian & Rajagopal (2010) schlagen beispielsweise vor, die Distanz zwischen GPS-Punkten zu messen und sobald mehrere GPS-Punkte innerhalb eines Schwellwertes d_{\max} sind, werden diese zu einem Stillstand zusammengefasst. Bei der Implementierung dieses Ansatzes und den Ergebnissen bleiben die Autoren allerdings sehr vage. Ein ähnlicher Ansatz, der allerdings sowohl die Distanz als auch die Zeitdauer berücksichtigt, ergibt sich durch die Anwendung eines raumzeitlichen Clustering-Verfahrens. In Vorprojekten (Schneider et al. 2017) wurden mit dem inkrementellen raumzeitlichen Clustering-Verfahren nach Ye et al. (2009) gute Erfahrungen in der Detektion von Aufenthaltsorten von Personen gemacht. Daher war es im Projekt OptiFCD naheliegend, diesen Ansatz auch für die Detektion von Stillständen einzusetzen. Im Unterschied zum zuerst genannten Ansatz ergibt sich der Vorteil, dass sowohl die Distanz als auch die Stillstands-Dauer als Parameter angegeben werden können. Außerdem kann das Verfahren auch vor dem Map Matching angewandt werden, da es für die Anwendung auf GPS-Trajektorien konzipiert ist.

Beim Verfahren nach Ye et al. (2009) müssen für das Clustering folgende Parameter gesetzt werden: Der Parameter ‚Min Stay Duration‘ (Minimale Stillstands-Dauer) gibt die Zeit an, die während eines Stillstands mindestens vergehen muss. Der Parameter ‚Distance‘ (Distanz)

repräsentiert den Radius, wie weit neue GPS-Punkte vom Mittelpunkt aller GPS-Punkte im Clusters entfernt sein dürfen, um zum gleichen Stillstand zu zählen.

Für das Clustering werden die folgenden Arbeitsschritte benötigt:

- Alle Punkte einer GPS-Trajektorie werden durchlaufen.
- Der erste Punkt wird zu einem temporären Cluster hinzugefügt.
- Alle nachfolgenden Punkte, bei denen die Distanz zum Cluster-Mittelpunkt geringer als der ‚Distance‘-Parameter ist, werden zum temporären Cluster hinzugefügt. Der Cluster-Mittelpunkt ist das arithmetische Mittel aller Koordinaten.
- Sobald die ‚Minimum Stay Duration‘ erreicht wird, wird ein ‚Stay‘ (Aufenthalt) erzeugt. Dazu werden der Cluster-Mittelpunkt sowie die Zeitstempel am Beginn und Ende des Stillstands erfasst und gespeichert. Danach wird ein neues, temporäres Cluster angelegt und die weiteren GPS-Punkte werden abgearbeitet.
- Wenn weitere Stays erzeugt werden, wird immer überprüft, ob der neue Stay zeitlich und räumlich nahe zum vorigen Stay liegt. Dabei müssen (1) die Cluster-Mittelpunkte weniger als ‚Distance‘ voneinander entfernt sein und (2) zwischen beiden Stays nicht mehr als ‚Min Stay Duration‘ Zeit vergehen.
- Nach der Anwendung des Algorithmus gibt es für jede GPS-Trajektorie eine Liste mit Stillständen. Dabei hat jeder Stillstand eine Position sowie einen Start- und Endzeitstempel.

Entscheidend für die Erkennung der Stillstände ist die Festlegung der Parameter-Werte *Distance* und *Minimale Stillstands-Dauer*. Für die Wahl der Parameter wurden folgende Überlegungen angestellt:

- Die ‚Minimale Stillstands-Dauer‘ muss höher als das Abtast-Intervall sein, damit Stillstände erkannt werden können. Wenn die Aufenthaltsdauer nur knapp über dem Abtast-Intervall ist, muss die Messung der GPS-Daten gut mit dem Stillstand zusammenpassen, damit zumindest zwei GPS-Punkte im Stillstand sind. Um Stillstände zuverlässig zu erkennen, wird das doppelte Abtast-Intervall als minimale Stillstands-Dauer empfohlen. Für den für die Analysen in diesem Bericht verwendeten Datensatz, bei dem das mittlere Abtast-Intervall bis zu 60 Sekunden beträgt (siehe Abbildung 20), sollte die minimale Stillstands-Dauer also mindestens 120 Sekunden sein.
- Die ‚Minimale Stillstands-Dauer‘ sollte zudem höher sein als die Dauer gewöhnlicher, verkehrsbedingter Zwischenstopps, wie Halte an Lichtsignalanlagen, Zebrasteifen oder Bahnübergänge. Daher ist auch unter diesem Aspekt eine Mindestdauer von zwei Minuten empfehlenswert (obwohl diese Aussage für das Autobahnnetz nur bedingt

zutrifft).

- Für den Parameter ‚Distanz‘ muss die GPS-Ungenauigkeit berücksichtigt werden. Hier haben Analysen gezeigt, dass der Radius zumindest auf 100 Meter eingestellt werden muss.
- Die räumliche Ausdehnung von Raststationen und ähnlichen Einrichtungen an Autobahnen ist in der Regel größer als 100 Meter. Um Zwischenstopps mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zu erkennen, eignet sich ein Radius von 200 Metern.
- Die Charakteristik des Stillstandes hat eine große Auswirkung auf die geometrische Anordnung der Stillstände. Stillstände auf freier Strecke weisen meist eine lineare Ausdehnung auf (durch die Bewegung mit niedriger Geschwindigkeit in eine Richtung), während Stillstände auf Rastplätzen oder Autobahnanschlussstellen oft Richtungsänderungen enthalten. In diesem Fall liegen mehrere GPS-Punkte innerhalb einer kleinen Fläche.

3.1.2 Praktische Anwendung anhand von Testdatensätzen

Um praktische Erfahrungen mit der Stillstands-Detektion in GPS-Trajektorien auf Autobahnen zu sammeln, wurden aus den Daten der FCD Modellregion Salzburg zwei Testdatensätze ausgewählt. Als Testdatensatz 1 wurden GPS-Trajektorien vom Montag den 13.11.2017 ausgewählt. Der Testdatensatz 2 enthält GPS-Trajektorien vom Dienstag den 14.11.2017. Beide Testdatensätze enthalten Daten einer Datenquelle mit einem Flottenmix unbekannter Zusammensetzung. Es wurden für die Evaluierung nur GPS-Trajektorien auf Autobahnen mit einer Länge von mehr als 1000 Metern berücksichtigt. Tabelle 12 gibt einen Überblick über die Anzahl der GPS-Trajektorien in den Testdatensätzen.

Abbildung 20 zeigt die Verteilung der GPS-Abtast-Intervalle der Testdaten. Während viele Daten Abtastintervalle von weniger oder gleich 30 Sekunden aufweisen, gibt es auch GPS-Trajektorien mit Abtast-Intervallen von 60 Sekunden.

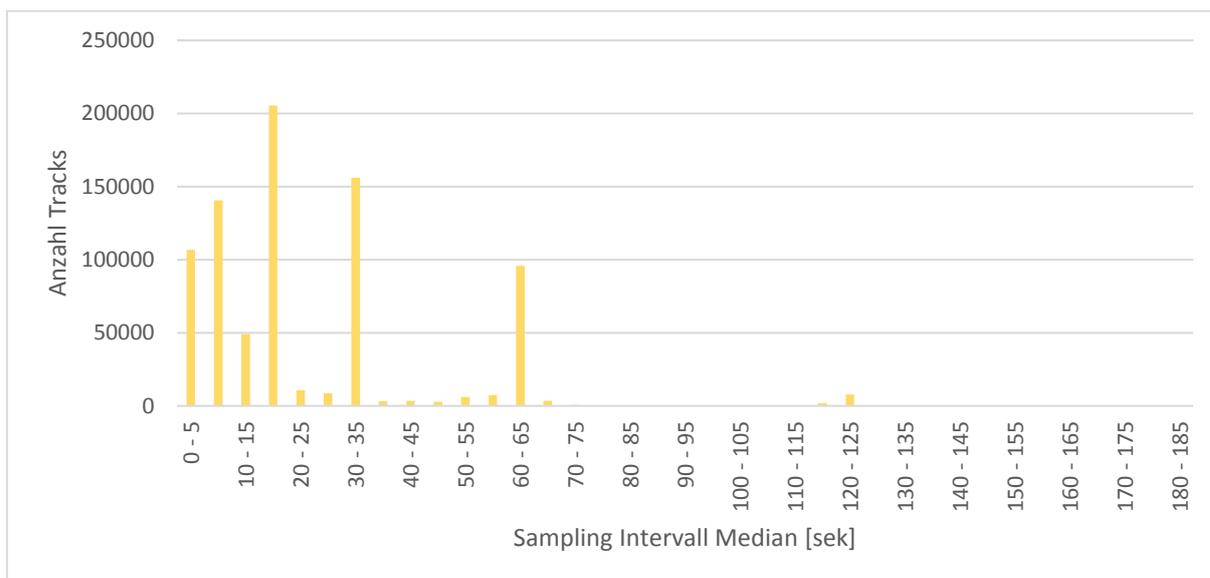


Abbildung 20: Verteilung der Mediane der Abtast-Intervalle aller GPS-Trajektorien der Testdaten im November 2017

Nach Evaluierung von unterschiedlichen Parameter-Kombinationen (minimale Stillstands-Dauer und Distanz) hat sich letztlich folgende Parameter-Kombination als geeignet herausgestellt: Distanz = 100 Meter und ‚Minimale Aufenthaltsdauer‘ = 120 Sekunden. Alle weiteren Analysen wurden mit diesen Parameterwerten durchgeführt. Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse der Stillstands-Detektion anhand der Cluster-Analyse angewandt auf die beiden Testdatensätze.

Datensatz 1 (Montag, 13.11.2017)	Datensatz 2 (Dienstag, 14.11.2017)
34.836 Trajektorien (8.568 Trajektorien zur Gänze / teilweise auf Autobahnen)	35.498 Trajektorien (8.552 Trajektorien zur Gänze / teilweise auf Autobahnen)
4.674 Stillstände (540 auf Autobahnen)	5.226 Stillstände (282 auf Autobahnen)
3.399 Trajektorien mit Stillständen (413 auf Autobahnen)	3.642 Trajektorien mit Stillständen (249 auf Autobahnen)
10% der Trajektorien enthalten Stillstände mit $t > 2$ Min. (ca. 5% der Trajektorien auf Autobahnen)	10% der Trajektorien enthalten Stillstände mit $t > 2$ Min. (ca. 3% der Trajektorien auf Autobahnen)

Tabelle 12: Anzahl der GPS-Trajektorien und detektierten Stillstände in den zwei Testdatensätzen

3.1.3 Klassifikation der Stillstände

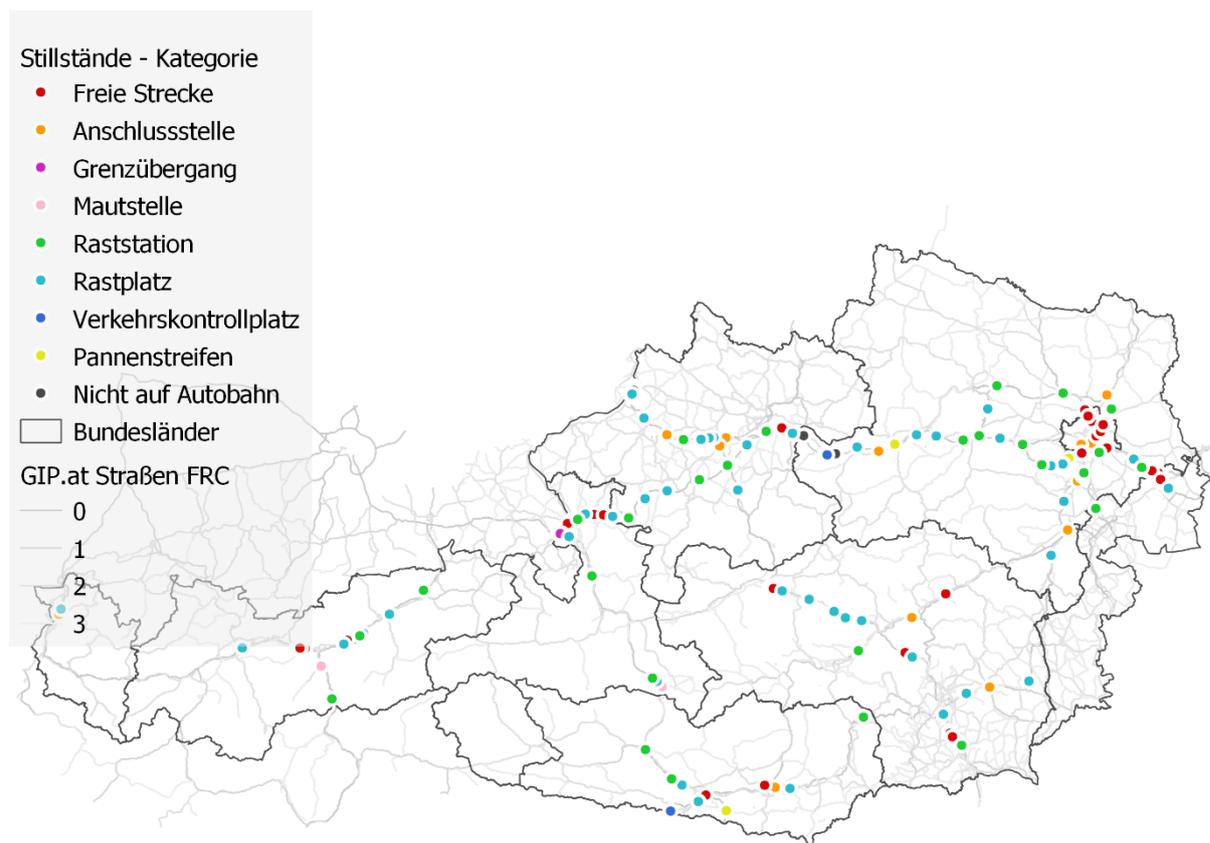
Neben der Anzahl der Stillstände ist natürlich die Art des Stillstands entscheidend, ob dieser für die Verkehrsinformation relevant ist oder nicht. Ziel ist es daher, die Stillstände automatisiert in **verkehrsbedingt** und **nicht verkehrsbedingt** zu klassifizieren. Um die Testdaten im Detail zu untersuchen wurde zusätzlich ein detaillierteres Klassifikationsschema für die unterschiedlichen Arten der Stillstände entworfen. Tabelle 13 gibt einen Überblick über die Stillstands-Kategorien.

Nicht verkehrsbedingt Stillstände		
<p>Raststation</p> 	<p>Rastplatz</p> 	<p>Verkehrskontrollplatz</p> 
<p>Pannestreifen</p> 	<p>Nicht auf Autobahn</p> 	
Verkehrsbedingte Stillstände		
<p>Freie Strecke</p> 	<p>Anschlussstelle</p> 	<p>Mautstelle</p> 
<p>Grenzübergang</p> 		

Tabelle 13: Übersicht der nicht verkehrsbedingten und verkehrsbedingten Stillstands-Kategorien

Die Klassifizierung der Stillstands-Arten wurde manuell durchgeführt. Bei Stillständen, die auf Raststationen, Rastplätzen, Verkehrskontrollstationen, Anschlussstellen, Mautstellen und Grenzübergängen auftreten, konnte aufgrund der räumlichen Nähe einfach die korrekte Kategorie zugewiesen werden. An diesen Orten häufen sich auch oft Stillstände. Schwieriger ist die Unterscheidung zwischen ‚Freie Strecke‘ und ‚Pannestreifen‘. Hier kann man die Klassifizierung nur durch detaillierte Analyse der GPS-Rohdaten vornehmen. Wenn an Autobahnabschnitten mit Pannestreifen die Geschwindigkeit vor und nach dem Stillstand der gewöhnlichen Geschwindigkeit entspricht, können Stillstände der Kategorie ‚Pannestreifen‘ zugewiesen werden. Die Kategorie ‚Nicht auf Autobahn‘ bezieht sich auf Stillstände, bei denen das Fahrzeug von der Autobahn abfährt, kurz an einer nahegelegenen Einrichtung wie einer Tankstelle stoppt und gleich wieder auf die Autobahn auffährt. Auch für Stillstände dieser Kategorie muss die Trajektorie vor und nach dem Stillstand überprüft werden.

Abbildung 21 zeigt die räumliche Verteilung der Stillstände vom 13.11.2017 auf dem Autobahnnetz in Österreich. Die Kategorie der Stillstände wird farblich gekennzeichnet.



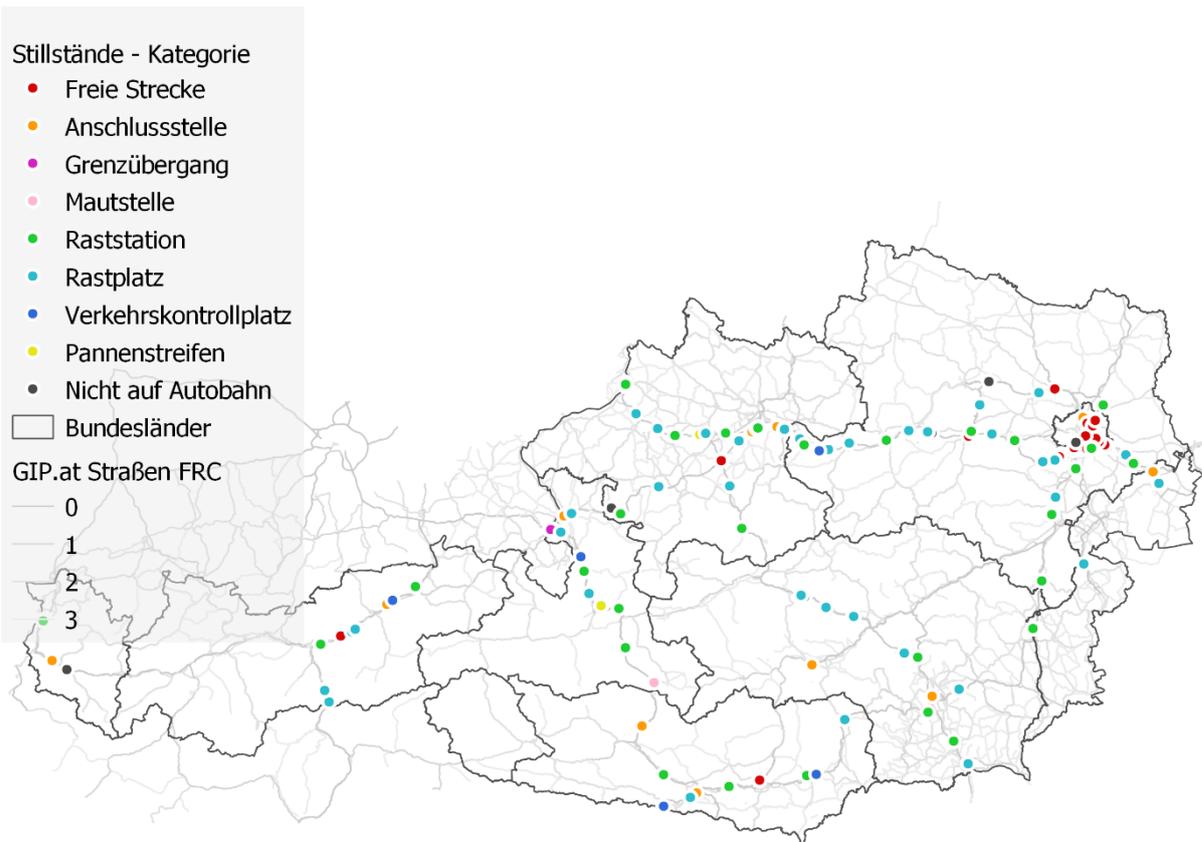
**Abbildung 21: Räumliche Verteilung und Klassifikation der Stillstände im Datensatz 1
(13.11.2017)**

In Tabelle 14 werden für den 13.11.2017 die Anzahl von Stillständen bzw. die Anzahl von Trajektorien mit Stillständen pro Kategorie aufgelistet. Aufgrund von umfangreichen Staus gibt es deutlich mehr Stillstände in den Kategorien ‚Freie Strecke‘ und ‚Grenzübergang‘. Auf der A4 zwischen der Anschlussstelle Neusiedl und der Raststation Köttlesbrunn treten auf einem Abschnitt von 12 km Länge 74 Stillstände auf. Auf der A1 zwischen der Anschlussstelle Enns Ost und dem Knoten Linz wurden 47 Stillstände auf einer Länge von 11 km identifiziert. In gesamten österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz wurden an diesem Tag 206 Stillstände auf ‚Freier Strecke‘ detektiert. Auf der A8 vor der Grenze zu Deutschland wurden auf einem Abschnitt von 5 km Länge 101 Stillstände detektiert.

Kategorie (Verkehrsbedingt)	# Stillstände	# Trajektorien
Freie Strecke	206	146
Anschlussstelle	73	68
Mautstation	3	3
Grenzübergang	120	70
Gesamt	402	287
Kategorie (Nicht verkehrsbedingt)	# Stillstände	# Trajektorien
Raststation	50	50
Rastplatz	75	73
Verkehrskontrollplatz	3	3
Pannestreifen	3	3
Nicht auf Autobahn	7	7
Gesamt	138	136

Tabelle 14: Klassifikation der Stillstände im Datensatz 1 (13.11.2017)

Die räumliche Verteilung der Stillstände am 14.11.2017 wird in Abbildung 22 dargestellt.



**Abbildung 22: Räumliche Verteilung und Klassifikation der Stillstände im Datensatz 2
(14.11.2017)**

In Tabelle 15 werden für den 14.11.2017 die Anzahl von Stillständen bzw. die Anzahl von Trajektorien mit Stillständen pro Kategorie aufgelistet. An diesem Tag gibt es keine umfangreichen Staus, die sich in dieser Statistik niederschlagen. Die meisten Stillstände gibt es für die Kategorie ‚Anschlussstelle‘.

Kategorie (Verkehrsbedingt)	# Stillstände	# Trajektorien
Freie Strecke	27	24
Anschlussstelle	110	92
Mautstation	2	2
Grenzübergang	18	13
Gesamt	157	131
Kategorie (Nicht verkehrsbedingt)	# Stillstände	# Trajektorien
Raststation	40	40
Rastplatz	70	68
Verkehrskontrollplatz	7	7

Pannestreifen	2	2
Nicht auf Autobahn	6	6
Gesamt	125	123

Tabelle 15: Klassifikation der Stillstände im Datensatz 2 (14.11.2017)

Eine automatische Klassifizierung von Stillständen wurde im Projekt OptiFCD nicht durchgeführt. Aus den Analysen werden allerdings Handlungsempfehlungen abgeleitet, wie eine solche Klassifikation durchzuführen wäre (s. Abschnitt 3.1.5).

3.1.4 Vergleich zwischen Stillstands-Clustern und Motion Patterns

Nachfolgend werden berechnete Stillstände aus der Cluster-Analyse mit „Motion Patterns“ verglichen. Bei der Detektion von „Motion Patterns“ (Verzögerungsmuster) wird die Verzögerungsrate eines Fahrzeugs (Vergleich der aktuellen Geschwindigkeit in Relation zur Freiflussgeschwindigkeit) entlang einer GPS-Trajektorie ermittelt. Für GPS-Trajektorien mit GPS-Abtastintervallen unter 10 Sekunden wird ein Verfahren auf Basis einer Zeitreihenanalyse angewandt (Brunauer & Rehr 2014). In diesem Fall wird die über 70 Meter geglättete Verzögerungsrate (m/s, d.h. Distanz-basierte Bewertung der aktuellen Geschwindigkeit im Vergleich zur Freiflussgeschwindigkeit) schwellwertbasiert in Verzögerungstypen klassifiziert. Aufgrund der Genauigkeit der Eingangsdaten können dadurch auch Stillstände unter 10 Sekunden detektiert werden. Für GPS-Trajektorien mit Abtastintervallen ab 10 Sekunden wird ein vereinfachter Algorithmus eingesetzt, der die Geschwindigkeit zwischen 2 GPS-Messungen ermittelt und die aktuelle Geschwindigkeit schwellwertbasiert in Relation zur Freifluss-Geschwindigkeit setzt. In beiden Fällen wird die errechnete Verzögerung zu so genannten Motion Patterns klassifiziert (Tabelle 16).

Für den Vergleich werden für beide Testdatensätze (1) mit der Clusteranalyse Stillstände gesucht und (2) mit dem FCD-System der FCD-Modellregion Salzburg für alle Trajektorien mit Stillständen auf Autobahnen Travels (Befahrungen von GIP-Links) und Motion Patterns (Verzögerungsmuster) berechnet. In der Folge werden die Stillstände (Punkt) und Motion Patterns (Liniengeometrie) räumlich und zeitlich übereinandergelegt.

Bei jenen Stillständen, die sich mit Travels und Motion Pattern überschneiden, kann noch unterschieden werden, mit welchen Motion Pattern Typen sie sich überschneiden. Die folgende Liste zeigt, wie die Motion Patterns im Zusammenhang mit Stillständen interpretiert werden können. In der Tabelle 16 sind die möglichen Travels und Motion Pattern zusammengefasst.

- **Nur Travels („Free Flow“):** In diesem Teil der GPS-Trajektorie wurde ein freier Verkehrsfluss ohne Verzögerungen detektiert. Eine Überlappung mit einem Stillstand sollte es nur dann geben, wenn der Stillstand als nicht verkehrsbedingt klassifiziert wurde.
- **Motion Pattern „Not Traversed“:** Wird für jenen Teil eines Straßensegments generiert, der nicht befahren wurde. Dies kann beispielsweise zutreffen, wenn ein Fahrzeug von der Autobahn abfährt und anschließend gleich wieder auf. Dann wurde ein Teil der Autobahn an dieser Stelle nicht befahren. Das Motion Pattern tritt immer in Kombination mit einem anderen Motion Pattern (oder mit freier Fahrt) auf. Das Motion Pattern deutet korrekterweise auf eine Unterbrechung der GPS-Trajektorie hin und könnte sich mit einem nicht verkehrsbedingten Stillstand überschneiden.
- **Motion Pattern „Single Stop“:** Bei diesem Motion Pattern ist ein einzelner Stillstand korrekt erkannt worden. Daher sollte sich dieses Motion Pattern direkt mit einem Stillstand überschneiden.
- **Motion Pattern „Unusual Delay“:** Bei diesem Motion Pattern ist eine unübliche Verzögerung auf diesem Straßensegment erkannt worden. Das könnte evtl. auf einen Stillstand hindeuten. Bei nicht verkehrsbedingten Stillständen wäre das eine richtige Klassifikation.
- **Motion Patterns „Delayed“, „Stop and Go“:** Diese Motion Patterns sollten sich richtigerweise mit verkehrsbedingten Stillständen überschneiden, da diese Motion Patterns einen gelben bzw. roten „Level of Service“ und Verzögerungen verursachen. Wenn diese Motion Patterns allerdings mit einem nicht verkehrsbedingten Stillstand zusammenfallen werden falsche Verkehrsinformationen generiert.

Tabelle 16: Bedeutung und Bewertung der Travels und Motion Patterns während Stillständen

Travels & MPs	Bedeutung	Bewertung
Nur Travels	Freie Fahrt, keine Verzögerung	Track nicht unterbrochen, Keine Verzögerungen
MP Single Stop	Einzelner Stopp (kurze Distanz, hohe Verzögerung, Detektion ist nur beim genauen Algorithmus möglich)	
MP Unusual Delay	Ungewöhnliche Verzögerung (Schwellwerte für Delayed oder Stop&Go sind nicht erfüllt)	
MP Delayed	Mittlere Verzögerung (mind. 200 Meter Distanz, mind. 1 Minute und max. 2 Minuten Verzögerung)	Track nicht unterbrochen, Verzögerungen
MP Stop and Go	Starke Verzögerung (mind. 200 Meter Distanz, mind. 2 Minuten Verzögerung)	
MP Not Traversed	Segmentteil nicht befahren	Track korrekt unterbrochen, Keine Verzögerungen
Keine Travels	Keine Travels generiert	

Im Vergleich der verkehrsbedingten Stillstände überwiegt korrekterweise die Übereinstimmung mit dem Motion Pattern „Stop and Go“ (Abbildung 23). Die annähernd 25% Unusual Delay bzw. die ca. 15% fehlenden Travels stellen in diesem Fall eine falsche Klassifikation dar. Bei den nicht verkehrsbedingten Stillständen ist es korrekt, dass für die Hälfte der Stillstände keine Travels und Motion Patterns berechnet wurden. Auch die Klassifikation als „Free Flow“ bzw. „Unusual Delay“ ist in diesem Fall korrekt. Nur die Klassifikation als „Stop&Go“ ist falsch und führt in ca. 35% der Fälle zu einer falschen Klassifizierung und daher falschen Verkehrsinformation.

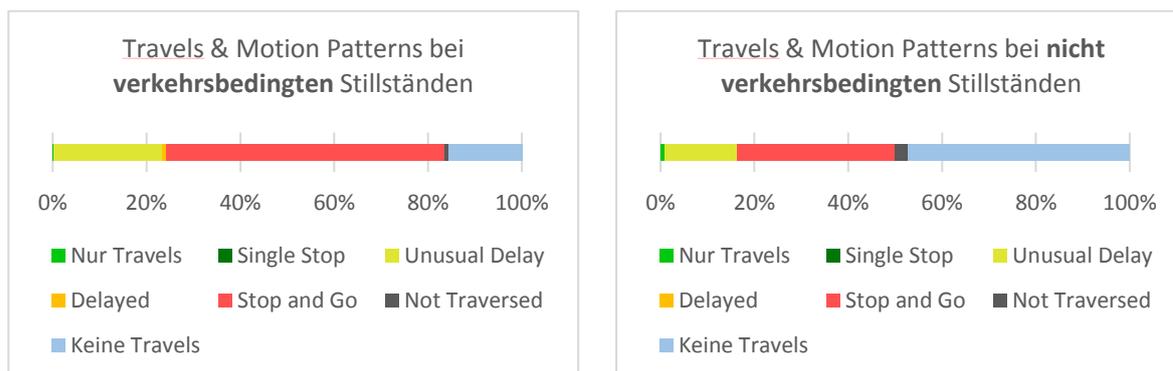


Abbildung 23: Überschneidung von Stillständen mit Travels und Motion Patterns am 14.11.2017

3.1.5 Interpretation und Schlussfolgerungen

Der evaluierte Algorithmus zur Detektion von Stillständen (Ye et al. 2009) hat sich als brauchbar erwiesen. Der Algorithmus erkennt Stillstände in GPS-Trajektorien zuverlässig, sofern die Stillstände den definierten raumzeitlichen Kriterien (Distanz, Dauer) entsprechen. Ein Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass sowohl die Distanz als auch die Stillstands-Dauer als Parameter angegeben werden können. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass der Algorithmus noch vor dem Map Matching direkt auf die GPS-Trajektorien angewendet werden kann. Dadurch kann bereits eine Vorselektion von GPS-Trajektorien durchgeführt werden, in denen Stillstände enthalten sind. Außerdem können bereits jene GPS-Punkte identifiziert werden, die Teil eines Stillstands sind. Es wird daher empfohlen, diesen Algorithmus jedenfalls in der Vorverarbeitung der GPS-Trajektorien anzuwenden. Die Detektion von Motion Patterns hat sich vor allem für GPS-Trajektorien bewährt, deren Abtastintervalle weniger als 10 Sekunden betragen. Eine Erstdetektion der Stillstände mit Hilfe des Clustering-Algorithmus stellt eine gute Ergänzung dar.

Die wesentliche Herausforderung bei der Stillstands-Detektion besteht allerdings in der Klassifikation der Stillstände in verkehrsbedingt und nicht-verkehrsbedingte Stillstände. Diese Klassifikation muss aufgrund der Menge der auftretenden Stillstände automatisiert erfolgen. Außerdem ist sie notwendig, da die nicht-verkehrsbedingten Stillstände nicht zu Verkehrsinformationen verarbeitet werden dürfen. Ohne eine zuverlässige Klassifikation kommt es zu vielen falschen Interpretationen.

Obwohl die automatische Klassifikation in diesem Projekt nicht vollständig umgesetzt und getestet werden konnte, können Empfehlungen gegeben werden, die folgendermaßen zusammengefasst werden können:

- **Nicht verkehrsbedingte Stillstände abseits der Fahrbahn/Autobahn:** Für diese Kategorie von Stillständen (Stillstände auf Raststationen/Rastplätzen

/Verkehrskontrollplätzen/Nicht auf Autobahn) besteht eine relativ einfache Möglichkeit der Klassifikation darin, zusätzliche geographische Informationen wie beispielsweise die Lage von Raststationen oder Rastplätzen aus ASFINAG-internen Systemen heranzuziehen. Dadurch sollten sich viele der nicht-verkehrsbedingten Stillstände klassifizieren lassen, die nicht unmittelbar auf der Fahrbahn liegen aber dennoch im Umkreis der Autobahn auftreten. Für die Testdaten sind das 135 (25 %) der Stillstände am 13.11.2017 bzw. 123 (44 %) der Stillstände am 14.11.2017. Die GPS-Punkte dieser Stillstände sollten aus der weiteren Generierung der Verkehrsinformation ausgeschlossen werden.

- **Verkehrsbedingte Stillstände auf der Fahrbahn:** Alle anderen Stillstände (freie Strecke, Anschlussstellen, Grenzübergänge, Mautstellen), die auf der Fahrbahn liegen, sollten grundsätzlich als verkehrsbedingt klassifiziert werden. Dabei handelt es sich um 402 (74 %) der Stillstände am 13.11.2017 und 157 (56 %) der Stillstände am 14.11.2017. In der Kombination dieser beiden Methoden können bereits über 99% der Stillstände korrekt klassifiziert werden.
- **Nicht verkehrsbedingte Stillstände auf der Fahrbahn:** Am schwierigsten ist die Klassifikation bei nicht verkehrsbedingten Stillständen auf der Fahrbahn wie beispielsweise dem kurzen Anhalten am Pannestreifen oder in einer Pannenbucht sowie einem verkehrsbedingten Stillstand am Fahrstreifen. Allerdings sind jene Fälle in den Testdaten mit 3 Fällen am 13.11.2017 und 2 Fällen am 14.11.2017 verschwindend gering. Aufgrund der geringen Anzahl können diese falschen Klassifikationen ignoriert werden.

3.2 Szenario „Stau-Detektion“

In diesem Abschnitt werden auf Basis der in Arbeitspaket 2 beschriebenen theoretischen Grundlagen Berechnungen zur Ermittlung von geeigneten FCD-Durchdringungsgraden für 9 ausgewählte Stauereignisse durchgeführt. Dabei wird einerseits versucht die Stauwurzel bzw. das Stauende aus FC-Daten sowie aus Detektordaten zu extrahieren um dadurch die Staulänge sowie die Ausbreitungsgeschwindigkeit zu berechnen. Andererseits wird auch für einige Beispiele versucht, die Ausbreitungsgeschwindigkeit anhand verschiedener Modellrechnungen zu ermitteln, sodass festgestellt werden kann, welche Methode für welches Stauereignis zielführend wäre.

In weiterer Folge werden anhand der FCD-Testdaten sowie der Verkehrsstärken vor dem Staubereich die erreichten FCD-Durchdringungsgrade sowie die räumliche und zeitliche Genauigkeit der Stau-Detektion berechnet. Am Ende erfolgt die Berechnung, welche FCD-

Durchdringungsgrade für die Stauereignisse bei einer räumlichen Genauigkeit der Stau-Detektion von 500 Metern erreicht werden müssten.

3.2.1 Berechnungsmethoden und Visualisierungen

Die Analyse der Stauereignisse erfolgt anhand folgender Systematik:

1. **Analyse der Staudynamik:** Zur Analyse der Staudynamik werden die Lage- bzw. zeitliche Dynamik des Stauendes anhand von drei unterschiedlichen Methoden aus den FC- bzw. Querschnittsdaten berechnet.
 - a. **Methode 1a:** Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik des Stauendes aus den FCD-basierten Erst- und Letztdetektionen des Stauendes
 - b. **Methode 1b:** Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik des Stauendes aus den Sensor-basierten Erst- und Letztdetektionen des Stauendes
 - c. **Methode 2:** Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik des Stauendes aus FCD- und querschnittsbasierten Messwerten
 - d. **Methode 3:** Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik des Stauendes ausschließlich anhand von querschnittsbasierten Messwerten
2. **Berechnung der tatsächlichen FCD-Durchdringungsgrade:** Anhand der Testdaten der FCD Modellregion Salzburg werden für die Stauereignisse die tatsächlich erreichten FCD-Durchdringungsgrade berechnet.
3. **Berechnung der erreichten räumlichen und zeitlichen Genauigkeit:** Anhand der Anzahl der FCD-Messungen sowie der Lagedynamik wird die erreichte räumliche bzw. zeitliche Genauigkeit der Staudetektion berechnet.
4. **Berechnung der notwendigen FCD-Durchdringungsgrade:** Anhand der Berechnungen zur Lagedynamik werden für die jeweilige Stausituation sowie einer definierten räumlichen Genauigkeit von 500 Metern die notwendigen FCD-Durchdringungsgrade berechnet.

Tabelle 17 gibt einen Überblick über die verwendeten Formeln für die Analyse der Stauszenarien.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Definitionen für die Analyse der Stauszenarien

Kennwert [Einheit]	Berechnung
Lagedynamik des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{s_c - s_b}{z_c - z_b} \dots \text{in Kilometrierungsrichtung}$ $v_w = \frac{-(s_c - s_b)}{z_c - z_b} \dots \text{gegen Kilometrierungsrichtung}$

	s_b ... KM bei Beginn der Lageveränderung, s_c ... KM bei Ende, z_b ... Zeit bei Beginn, z_c ... Zeit bei Ende
Zeitliche Dynamik: Minuten, die das Stauende für die Strecke (s) benötigt [min]	$t = \left\lfloor \frac{s}{v_w} * 0,06 \right\rfloor$
Benötigte FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Fahrzeuge]	$q_{FCD} = -\ln(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{t}$
Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q_b}$ <p>q_{FCD} ... FCD-Stärke, q_b ... Verkehrsstärke vor Stau</p>
Zeitliche Genauigkeit [sek] (wahrscheinliche Dauer bis zur Ankunft des nächsten Fahrzeugs)	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{q_{FCD}}$
Räumliche Genauigkeit [m] (wahrscheinliche Genauigkeit in der Detektion des Stauendes)	$s = T * \frac{ v_w }{3,6}$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b}$ <p>v_b ... Geschwindigkeit vor Stau</p>
Abstand zwischen Fahrzeugen im Stau [m]	$d_a = f(v_a) = \begin{cases} v_a * 0,55 & v_a * 0,55 > 2 \\ 2 & \text{sonst} \end{cases}$ <p>v_a ... Geschwindigkeit im Stau</p>
Verkehrsdichte im Stau [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = \frac{1000 * n}{(l_{PKW} + d_a) * (1 - p_{LKW}) + (l_{LKW} + d_a) * p_{LKW}}$ <p>l_{PKW} ... PKW-Länge (5m), l_{LKW} ... LKW-Länge (16,5m), p_{LKW} ... LKW-Anteil, n ... Fahrspuren</p>
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a$
Lagedynamik des Stauendes [km/h] (Schockwellen-Formel ⁸)	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b}$

⁸ https://en.wikibooks.org/wiki/Fundamentals_of_Transportation/Shockwaves

Abbildung 24 stellt anhand eines fiktiven Stau-Ereignisses die Vorgehensweise bei den unterschiedlichen Berechnungsmethoden dar. Die Sensoren 1-3 bezeichnen dabei Messquerschnitte vor dem Stau, im Stau und nach dem Stau. Die Variable q bezeichnet die am Messquerschnitt gemessene Verkehrsstärke, v die Geschwindigkeit (die Messung der Geschwindigkeit kann alternativ auch über FCD erfolgen). v_w bezeichnet die Lagedynamik des Staus, die anhand der genannten Formeln aus den Messwerten berechnet werden kann. Sobald zwei zeitlich aufeinanderfolgende FCD-Messungen des Stauendes vorliegen, kann die Lagedynamik auch über den Zeitpunkt und die Lage der FCD-Messungen berechnet werden.

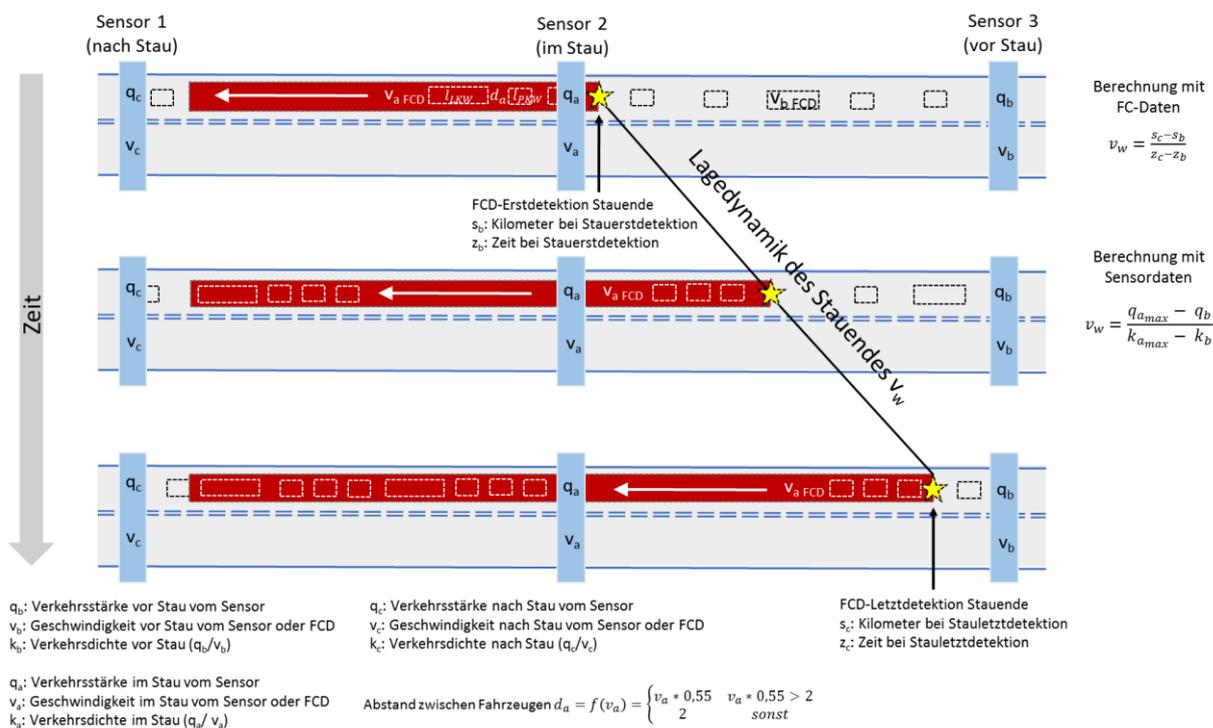


Abbildung 24: Visualisierung der Berechnungsmethoden anhand eines fiktiven Staubeispiels

Zur Visualisierung der Lage- bzw. zeitlichen Dynamik werden die FC-Daten als Weg-Zeit-Diagramme dargestellt (Abbildung 25). Gleichzeitig werden auch die Daten der Querschnittsmessungen im Diagramm dargestellt. Die Weg-Zeit-Diagramme können wie folgt interpretiert werden:

- Flache Befahrungslinien deuten auf Befahrungen ohne Verzögerungen bzw. mit geringen Verzögerungen hin, da eine Strecke innerhalb einer kurzen Zeit (geringe vertikale Differenz) zurückgelegt wird.
- Steile Befahrungslinien deuten auf Befahrungen mit Verzögerungen hin, da für eine Strecke eine längere Zeit (höhere vertikale Differenz) benötigt wird.
- Die Farben zeigen zusätzlich den aus den Verzögerungen (Motion Patterns)

abgeleiteten Level-of-Services (LoS). Dieser sollte mit der Steigung der Befahrungen korrelieren.

- Querschnittsmessungen auf den Autobahnen werden im Diagramm durch eine vertikale Linie dargestellt. Die Verkehrsstärke wird durch die Dicke der Linie angegeben, die Durchschnittsgeschwindigkeit mit der Farbe.
- Anschlussstellen werden von der ersten Ausfahrt bis zur letzten einmündenden Auffahrt markiert.

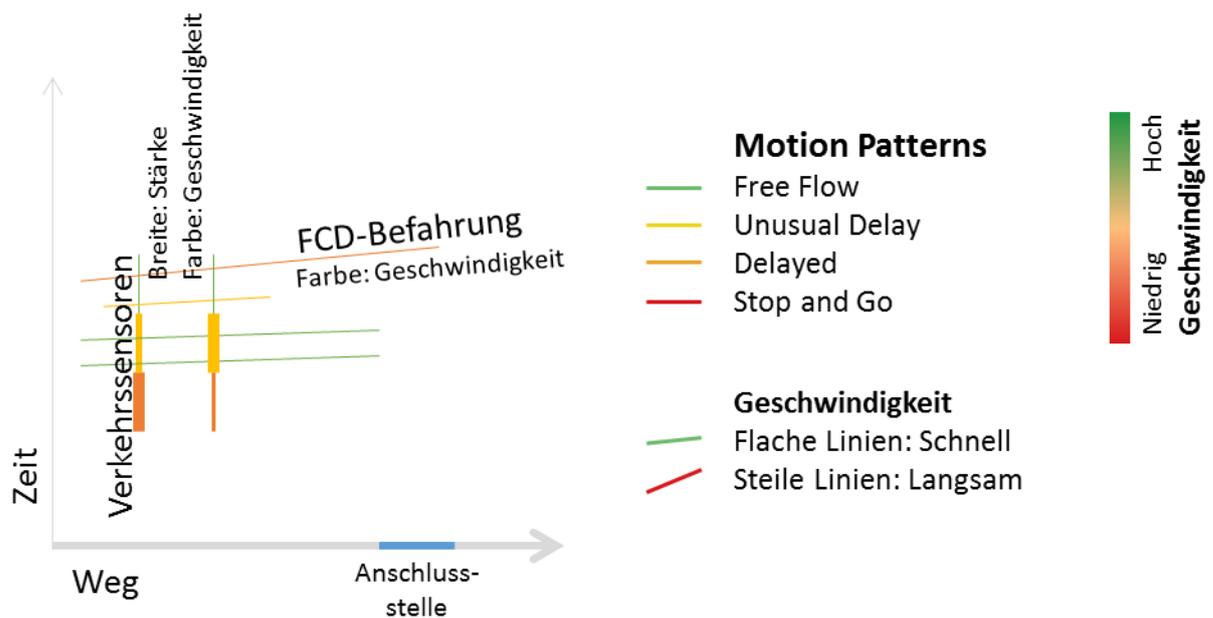


Abbildung 25: Legende für die Weg-Zeit-Diagramme

3.2.2 Stauereignisse

Um die FCD-Durchdringungsgrade für konkrete Stauereignisse berechnen zu können, wurden von der ASF INAG 9 verschiedene Stauereignisse im November 2017 ausgewählt. Tabelle 18 gibt einen Überblick über die ausgewählten Stauereignisse.

Tabelle 18: Übersicht über die ausgewählten Stauereignisse

Nr	Stauereignis	Fahrt- richtung	Datum	Ursache	Besonderheiten
1	A1 – Westautobahn beim Knoten Linz	Salzburg	27.11.2017	Unfall	Abfließender Verkehr zur A7
2	A2 – Südatobahn beim Knoten Vösendorf	Wien	15.11.2017	Überlastung	Mehrere Anschlussstellen

3	S1 - Wiener Außenring Schnellstraße	A2	15.11.2017	Unfall	Mehrere Anschlussstellen
4	A4 – Ostautobahn bei Neusiedl am See	Ungarn	9.11.2017	Überlastung	
5	A12 – Inntalautobahn zwischen Zirl und Innsbruck	Innsbruck	20.11.2017	Überlastung	
6	A10 – Tauernautobahn vor Hieflertunnel	Salzburg	27.11.2017	Totalsperre	Staubereich im Tunnel
7	A22 – Donauuferautobahn beim Knoten Kaisermühlen	A23	15.11.2017	Überlastung	Staubereich im Tunnel
8	A7 – Mühlkreisautobahn durch Linz	Freistadt	24.11.2017	Überlastung	Mehrere Anschlussstellen
9	A23 – Südosttangente beim Knoten Kaisermühlen	A2	15.11.2017	Überlastung	Mehrere Anschlussstellen

Für diese Stauereignisse wurden von der ASFINAG minütliche Daten der Messquerschnitte (Q_KFZ, Q_LKW, V_PKW, V_LKW) im Staubereich sowie ein Messquerschnitt mit Freifluss vor dem Staubereich und ein Messquerschnitt mit Freifluss nach dem Staubereich geliefert. Für die Messquerschnitte wurde auch die genaue Lageinformation geliefert.

Neben den Messdaten der ASFINAG wurden die FC-Daten der FCD Modellregion Salzburg für die Analysen herangezogen. Bei diesem Testdatensatz handelt es sich um einen Flottenquerschnitt von PKWs und LKWs, die die gewählten Abschnitte im Zeitraum befahren haben.

3.2.3 Stauereignis 1: A1 – Westautobahn beim Knoten Linz

3.2.3.1 Beschreibung des Stauereignisses

Auf der A1, Richtungsfahrbahn Salzburg, hat sich am 27.11.2017 um ca. 17:30 Uhr unmittelbar nach dem Knoten Linz kurz vor der Anschlussstelle Ansfelden (KM 170) ein Unfall ereignet. Aufgrund des Unfalls und der Fahrspurreduktion bildete sich ein Stau mit einer statischen Stauwurzel. Aufgrund der Lage der Stauwurzel unmittelbar nach dem Knoten mit der A7 hat sich der Staubereich sowohl auf der A1 als auch auf die A7 ausgebreitet. Abbildung 26 zeigt das Stauereignis inkl. der Querschnittsmessstellen zum Zeitpunkt der maximalen Stauausdehnung.



Abbildung 26: Umgebungskarte der A1 beim Knoten Linz mit Unfallstelle (Stern) und Verkehrssensoren (blau: vor Stau, rot: im Stau, gelb: stockender Verkehr, grün: nach Stau)

Das Ereignis wird auch durch folgende Verkehrsmeldung beschrieben:

- A1 Richtung Salzburg: kurz vor der Raststation Ansfelden ist ein Unfall passiert. Die rechte und die mittlere Spur sind blockiert. Der Stau reicht schon bis kurz nach Asten zurück. Auf der A7 staut es wegen des Unfalles Richtung A1 ebenfalls schon ab der Wiener Straße bis zum Knoten Linz.“ (Quelle: www.liferadio.at)

3.2.3.2 Berechnung der Lage- bzw. zeitlichen Dynamik der Staubildung

Für die Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik werden die ersten und letzten Stau-Detektionen der FC-Daten herangezogen (Geschwindigkeit unter 30 km/h). Wie aus der Abbildung 27 ersichtlich ist, erfolgte bei diesem Stauereignis die Erstdetektion des Stauendes um 17:31 Uhr bei KM 169,151, die Letztdetektion um 18:44 Uhr bei KM 161,369 (siehe auch die rote Linie in Abbildung 27).

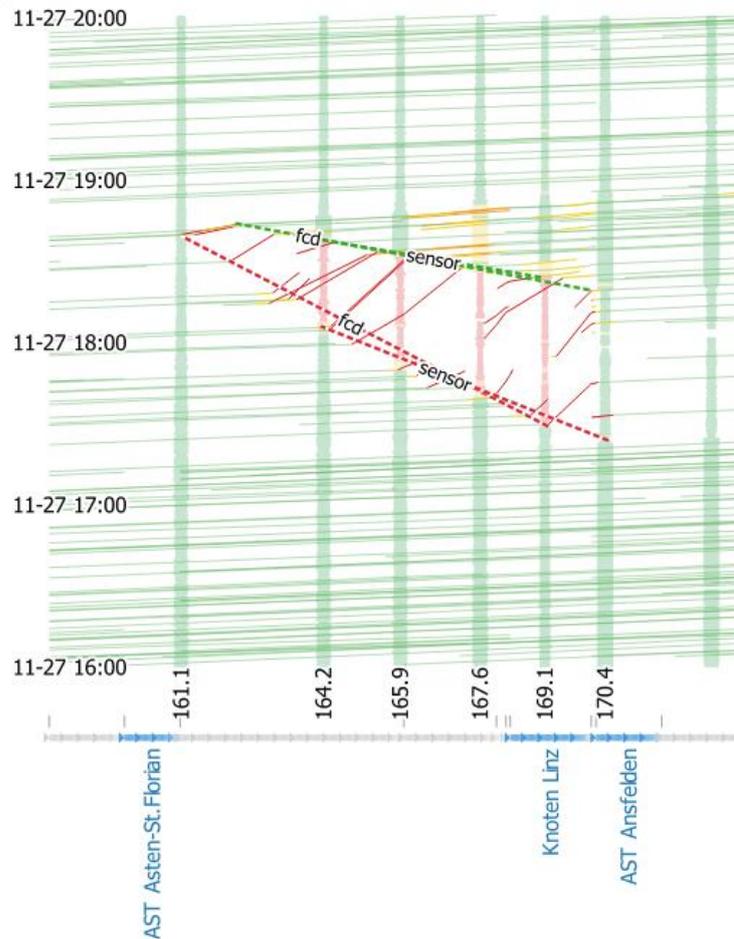


Abbildung 27: Darstellung der FCD- und Querschnittsgeschwindigkeiten in einem Weg-Zeit-Diagramm für das Stauereignis am 27.11.2018 auf der A1 – Westautobahn beim Knoten Linz. Gekennzeichnet sind die Staubildung (rot strichlierte Linien) und die Stauauflösung (grün strichlierte Linien).

Anhand der Erst- und Letztdetektionen des Stauendes (rote strichlierte Linie) kann nun die annähernd lineare Lagedynamik des Stauendes abgeleitet werden.

Methode 1a: Berechnung der Lagedynamik durch FCD-Staudetektionen (Referenzwert)

Geschwindigkeit des Stauendes in
Kilometrierungsrichtung [km/h]

$$v = \frac{161,369 \text{ km} - 169,151 \text{ km}}{18:44 \text{ h} - 17:31 \text{ h}} = \frac{-7,782 \text{ km}}{1:13 \text{ h}} = -6,40$$

Methode 2: Berechnung der Lagedynamik mit FCD-Daten und Querschnittsmessungen	
FCD-Messung um 17:30:46 zwischen KM 169,151 und KM 170,094	
FCD-Geschwindigkeit im Stau [km/h]	$v_a = 2,54$
Querschnittsmessung 17:30 – 17:35 Uhr vor dem Stau bei KM 167,648	
LKW-Anteil [%]	$p_{LKW} = 20,20\%$
Geschwindigkeit vor Stau [km/h]	$v_b = 87,29$
Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_b = 3564$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b} = \frac{3564}{87,29} = 41$
Geschwindigkeit des Stauendes	
Abstand zwischen Fahrzeugen im Stau	$d_a = f(v_a) = \begin{cases} v_a * 0,55 & v_a * 0,55 > 2 \\ 2 & sonst \end{cases} = 2$
Verkehrsdichte im Stau (3 Spuren) [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = \frac{1000 * 3}{(5 + 2) * (1 - 0,202) + (16,5 + 2) * 0,202} = 322$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 818$
Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} = \frac{818 - 3564}{322 - 41} = \frac{-2746}{281} = -9,77$

Aufgrund der Lage des Staubereichs am Knoten Linz dürfte die Berechnung mit Methode 2 anhand der nachkommenden Verkehrsstärke zu hoch gegriffen sein, da lt. FC-Daten ca. 42% der Fahrzeuge die A1 am Knoten Linz verlassen. Dadurch ergibt sich eine höhere errechnete Geschwindigkeit des Stauendes im Vergleich zu den FCD-Detektionen.

Methode 3 konnte in diesem Beispiel nicht erfolgreich angewendet werden, da in diesem Beispiel die gemessene Geschwindigkeit am Detektorquerschnitt im Stau vor der Stauwurzel bei KM 169,074 mit 25,96 km/h deutlich zu hoch im Vergleich zu der FCD-Staugeschwindigkeit von 2,54 km/h ist. Die Ursache dafür dürfte sein, dass sich der Messquerschnitt nach der Abfahrt zur A7 an einer ungünstigen Stelle befindet, da sich durch den vorherigen Verkehrsabfluss auf die A7 an dieser Stelle eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit ergibt. Daher wurde diese Berechnungsmethode in diesem Fall nicht angewandt, da sie nicht zu plausiblen Werten führen würde.

3.2.3.3 Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Anhand der Anzahl der FCD-Befahrungen sowie der Verkehrsstärke vor dem Stau kann nun der tatsächlich erreichte FCD-Durchdringungsgrad bestimmt werden.

FCD-Durchdringungsgrad der Testdaten	
FCD-Verkehrsstärke [Kfz/h]	$q_{FCD} = 36$
Verkehrsstärke bei KM 161,07 [Kfz/h]	$q_b = 3564$
Durchdringungsgrad [%]	$p = \frac{q_{FCD}}{q_b} = \frac{36}{3564} = 1,01 \%$

Anhand der berechneten Stauausbreitungsgeschwindigkeit von -6,40 km/h sowie der Anzahl der FCD-Befahrungen ergibt sich nach dem stochastischen Modell folgende zeitliche und räumliche Genauigkeit (95% Wahrscheinlichkeit) der Stauende-Detektion.

Zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion	
Zeitliche Genauigkeit bei 36 Kfz/h [s]	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{36} = 300 \text{ s}$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -6,40 km/h [m]	$s = T * \frac{ v }{3,6} = 300 * \frac{ -6,40 }{3,6} = 533 \text{ m}$

Um das Stauende mit einer räumlichen Genauigkeit von max. 500 Metern zu detektieren, wird folgender FCD-Durchdringungsgrad, der mit den folgenden Berechnungen ermittelt wird, benötigt.

Berechneter FCD-Durchdringungsgrade bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit	
Verkehrsstärke am Stauende [Kfz/h]	$q = 3564$
Minuten, die das Stauende für 500 Meter benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right = \left \frac{500}{-6,40} * 0,06 \right = 4,69$ $= 4:41$
FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Kfz/h]	$q_{FCD} = -\ln(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{4,69} = 38,32$
FCD-Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{38,32}{3564} = 0,0159 = 1,07 \%$

3.2.4 Stauereignis 2: A2 – Südbahn beim Knoten Vösendorf

3.2.4.1 Beschreibung des Stauereignisses

Am 15.11.2017 zwischen 07:00 Uhr und 09:00 Uhr staute sich der Verkehr auf der A2 am Knoten Vösendorf bei KM 4,7 bedingt durch die Verkehrsüberlastung und Reduktion der Fahrspuren. Zwischen 06:30 Uhr und 07:00 Uhr breitete sich eine Schockwelle vom Knoten Vösendorf (Abfahrt bei KM 5,0) bis zum Knoten Guntramsdorf aus. Diese Störung hielt aber nur kurz an und löste sich wieder auf. Zwischen 07:00 Uhr und 07:45 bildete sich ein weiterer Rückstau vom Knoten Vösendorf zurück zur AST Wiener Neudorf.

Die Herausforderung in der Berechnung der Stauausbreitung entsteht in diesem Beispiel durch die Lage an einem großen Verkehrsknotenpunkt mit vielen Anschlussstellen. Es herrscht eine hohe Verkehrsdichte über den gesamten Zeitraum und eine kleine Störung kann bereits einen Stau auslösen. Für die Analyse werden die Messquerschnitte auf der A2 zwischen KM 20 und KM 0 herangezogen. Die folgende Abbildung 28 zeigt die Situation um 07:00 Uhr während der maximalen Stauausdehnung.

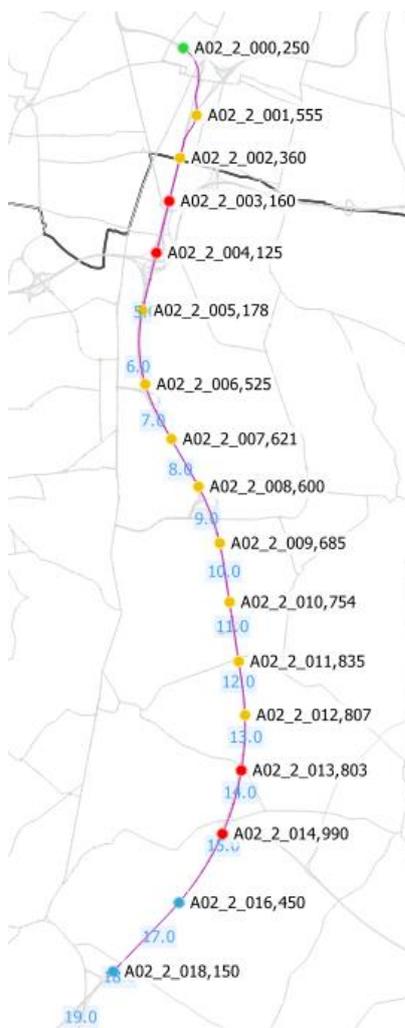


Abbildung 28: Umgebungskarte der A2 zwischen den Knoten Vösendorf und Guntramsdorf mit Verkehrssensoren (blau: vor Stau, rot: im Stau, gelb: stockender Verkehr, grün: nach Stau)

3.2.4.2 Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik der Staubildung

Für die Berechnung der Lagedynamik werden nach Methode 1 die ersten und letzten Stau-Detektionen der FC-Daten herangezogen (Geschwindigkeit < 30 km/h). Wie aus der Abbildung 28 ersichtlich ist, besteht dieses Stauereignis eigentlich aus zwei Ereignissen. Die Erstdetektion des Stauendes erfolgte um 06:29 Uhr bei KM 5,6 (Knoten Vösendorf, die

Letztdetektion um 07:02 Uhr bei KM 15,43 (Knoten Guntramsdorf) (siehe rote Linie mit der Beschriftung ‚fcd‘ in Abbildung 29).

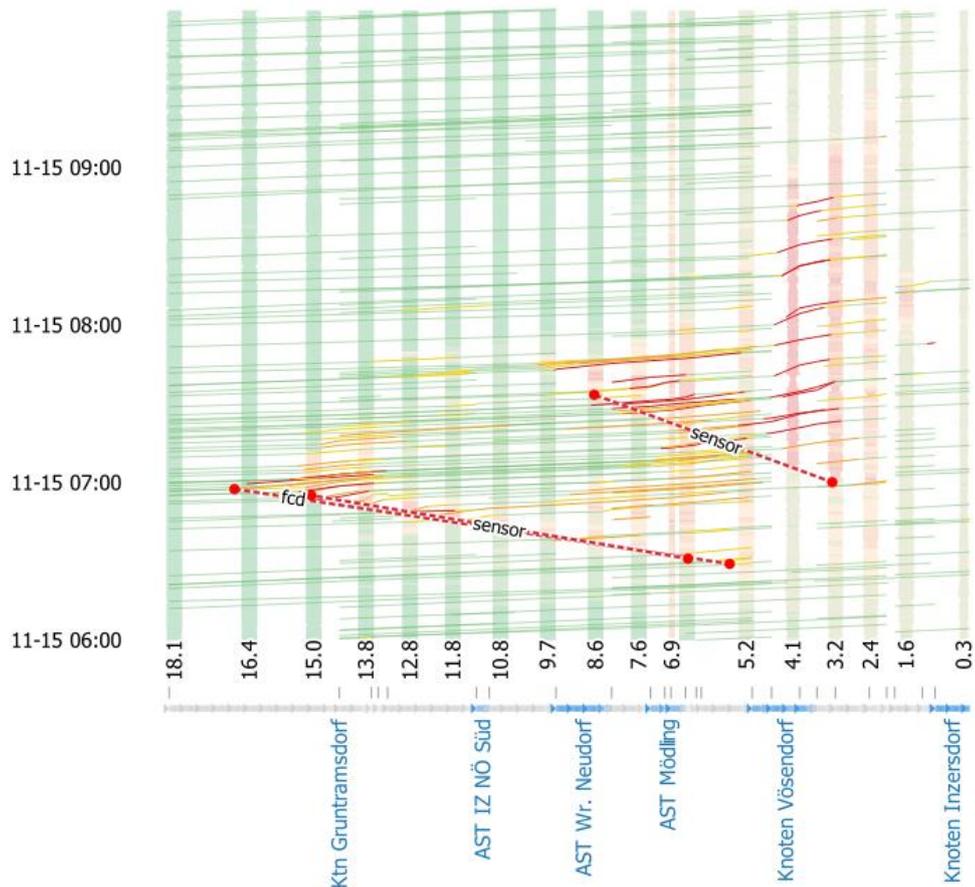


Abbildung 29: Darstellung der FCD- und Querschnittsgeschwindigkeiten in einem Weg-Zeit-Diagramm für das Stauereignis am 15.11.2017 auf der A2 Südautobahn zwischen Knoten Inzersdorf und Guntramsdorf- Gekennzeichnet sind die Staubildung (rote, strichlierte Linien) und Stauauflösung (grüne, strichlierte Linien).

Anhand der Erst- und Letztdetektionen des Stauendes (rote strichlierte Linie) kann nun die annähernd linear verlaufende Lagedynamik des Stauendes berechnet werden.

Methode 1a: Berechnung der Lagedynamik durch FCD-Staudetektionen

Geschwindigkeit des Stauendes gegen Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{-(15,43 \text{ km} - 5,6 \text{ km})}{07:02 \text{ h} - 06:29 \text{ h}} = \frac{-9,83 \text{ km}}{0:33 \text{ h}}$ $= -17,87$
---	---

Aufgrund der hohen Dichte an Querschnittsmessungen entlang dieser Strecke wird für dieses Beispiel auch eine Berechnung anhand der Staudetektionen aus den Querschnittsdaten vorgenommen. Die erste Detektion des aufbauenden Stauendes erfolgte bei KM 5,18 (Knoten

Vösendorf) um 06:28 Uhr, die letzte Detektion bei KM 14,99 (Knoten Guntramsdorf) um 06:57 Uhr (siehe rote Linie mit Beschriftung ‚sensor‘ in Abbildung 29).

Methode 1b: Berechnung der Lagedynamik durch Staudetektionen der Querschnittsmessungen	
Geschwindigkeit des Stauendes gegen Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{-(14,99 \text{ km} - 5,18 \text{ km})}{06:57 \text{ h} - 06:28 \text{ h}} = \frac{-9,81 \text{ km}}{0:31 \text{ h}}$ $= -18,99$

Methode 2: Berechnung der Lagedynamik mit FCD-Daten und Querschnittsmessungen	
FCD-Messung um 06:39:17 zwischen KM 8,94 und KM 8,35	
FCD-Geschwindigkeit im Stau [km/h]	$v_a = 23,27$
Querschnittsmessung 06:35 – 06:40 Uhr vor dem Stau bei KM 9,685	
LKW-Anteil [%]	$p_{LKW} = 10,4\%$
Geschwindigkeit vor Stau [km/h]	$v_b = 94,68$
Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_b = 8748$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b} = \frac{8748}{94,68} = 92$
Geschwindigkeit des Stauendes	
Verkehrsdichte im Stau (4 Spuren) [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = 211$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 4910$
Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} = \frac{4910 - 8748}{211 - 92} = \frac{-3838}{119}$ $= -23,76$

Die FCD-Geschwindigkeit ist in diesem Beispiel wahrscheinlich zu niedrig. Es ist möglich, dass auf den unterschiedlichen Fahrspuren unterschiedliche Geschwindigkeiten gefahren werden. Zwischen 06:50 und 06:55 nimmt die Verkehrsdichte kurzfristig wieder ab (vgl. Abbildung 30). Das dürfte genügen, um wieder einen flüssigen Verkehr herzustellen.

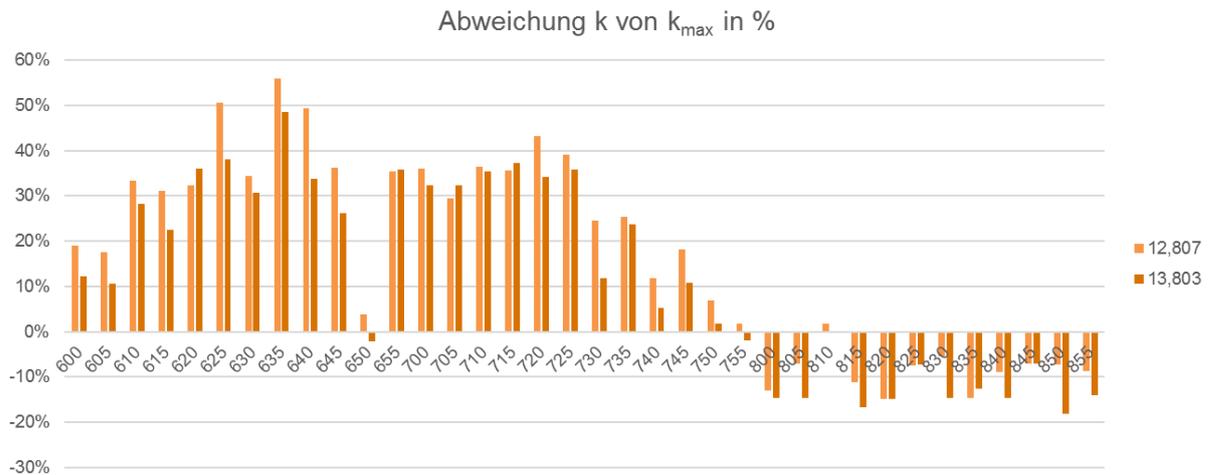


Abbildung 30: Abweichung von k und k_{\max} in % bei den Sensoren bei KM 12,8 und 13,8

Aufgrund der erneut zunehmenden Verkehrsdichte bildete sich zwischen 7:00 und 7:45 von KM 3,16 bis KM 8,6 ein zweiter Staubereich (rechte rote Linie in Abbildung 29). Anhand der Erst- und Letztdetektionen des Stauendes (rote strichlierte Linie) kann nun ebenfalls die annähernd linear verlaufende Lagedynamik des Stauendes berechnet werden.

Methode 1a: Berechnung der Lagedynamik durch FCD-Staudetektionen

Geschwindigkeit des Stauendes gegen Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{-(8,6 \text{ km} - 3,16 \text{ km})}{07:35 \text{ h} - 07:00 \text{ h}} = \frac{-5,44 \text{ km}}{0:35 \text{ h}}$ $= -9,33$
---	---

Bedingt durch die vielen Anschlussstellen lässt sich die Stauausbreitung in diesem Beispiel mittels Schockwellen-Formel nur bedingt berechnen. Daher wurde von einer Berechnung Abstand genommen.

3.2.4.3 Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Anhand der Anzahl der FCD-Befahrungen sowie der Verkehrsstärke vor dem Stau kann nun der tatsächlich erreichte FCD-Durchdringungsgrad bestimmt werden.

FCD-Durchdringungsgrad der Testdaten

FCD-Befahrungen mit verifizierter Verzögerung am Stauende [Kfz/h]	$q_{FCD} = 60$
Verkehrsstärke bei KM 18,1 [Kfz/h]	$q_b = 4978$
Durchdringungsgrad [%]	$p = \frac{q_{FCD}}{q_b} = \frac{60}{4978} = 1,2 \%$

Anhand der berechneten Stauausbreitungsgeschwindigkeit von -17,87 km/h sowie der Anzahl der FCD-Befahrungen ergibt sich nach dem stochastischen Modell folgende zeitliche und räumliche Genauigkeit (95% Wahrscheinlichkeit) der Stauende-Detektion.

Zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion	
Zeitliche Genauigkeit bei 60 Kfz/h [s]	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{60} = 180 \text{ s}$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -17,87 km/h [m]	$s = T * \frac{ v }{3,6} = 180 * \frac{ -17,87 }{3,6} = 892 \text{ m}$

Um eine räumliche Genauigkeit des Stauendes von max. 500 Metern zu detektieren, wird folgender FCD-Durchdringungsgrad benötigt.

Berechneter FCD-Durchdringungsgrade bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit	
Verkehrsstärke am Stauende [Kfz/h]	$q = 4978$
Minuten, die das Stauende für 500 Meter benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right = \left \frac{500}{-17,87} * 0,06 \right = 1,68$ $= 1:41$
FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Kfz/h]	$q_{FCD} = -\ln(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{1,68} = 107$
Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{107}{4978} = 0,0214 = 2,1 \%$

Dadurch, dass alle Kilometer eine Querschnittsmessung durchgeführt wird, ist in diesem Beispiel für die Detektion des Stauendes vermutlich auch ein geringerer Durchdringungsgrad ausreichend.

3.2.5 Stauereignis 3: S1 - Wiener Außenring Schnellstraße

3.2.5.1 Beschreibung des Stauereignisses

Am 15.11.2017 um 16:05 Uhr ereignete sich auf der S1 Richtung Knoten Vösendorf bei KM 2,7 (Anschlussstelle Laxenburger Straße) ein Unfall. Der Rückstau breitete sich schnell aus bis zum Knoten Rustenfeld. Nach Räumung der Unfallstelle kam es zur Auflösung des Staus von beiden Richtungen.

- „S1 Wiener Außenring Schnellstraße: Vösendorf Richtung Schwechat Anschlußstelle Voralberger Allee Unfall, zäher Verkehr, nach VU/S bei km 2,71, alle Fahrstreifen frei befahrbar“ – spritvergleich.at 15.11.2017 - 16:27:11

Durch den Unfall liegt eine statische Stauwurzel vor. Das Verkehrsaufkommen ist während des Unfalls hoch. Im Stauegebiet gibt es mehrere Anschlussstellen, die das Auf- und Abfahren erlauben. Es gibt jedoch keine Informationen über den Zu- und Abfluss am Knoten Rustenfeld, der AST Rothneusiedl, der AST Güterzentrum Wien Süd und der AST Laxenburger Straße. Der letzte Sensor bei KM 2,7 befindet sich kurz nach der Unfallstelle. Dadurch entsprechen

die gemessenen Geschwindigkeiten nicht der durchschnittlichen Staugeschwindigkeit. Der Sensor bei KM 1,6 lieferte keine Daten. Die in Abbildung 31 gezeigte Stausituation zeigt die maximaler Stauausdehnung um 16:30 Uhr zwischen KM 10,5 und KM 0.



Abbildung 31: Umgebungskarte der S1 mit Unfallstelle (Stern) und Verkehrssensoren (blau: vor Stau, rot: im Stau, gelb: stockender Verkehr, grün: nach Stau)

3.2.5.2 Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik der Staubildung

Für die Berechnung der Lagedynamik werden nach Methode 1a die ersten und letzten Stau-Detektionen der FC-Daten herangezogen (Geschwindigkeit < 30 km/h). Die erste FCD-Detektion des aufbauenden Stauendes erfolgte bei KM 3,08 um 16:03 Uhr, die letzte Detektion bei KM 8,81 um 16:30 Uhr (siehe rote Linie in Abbildung 32). Der Aufbau des Stauendes erfolgte näherungsweise linear.

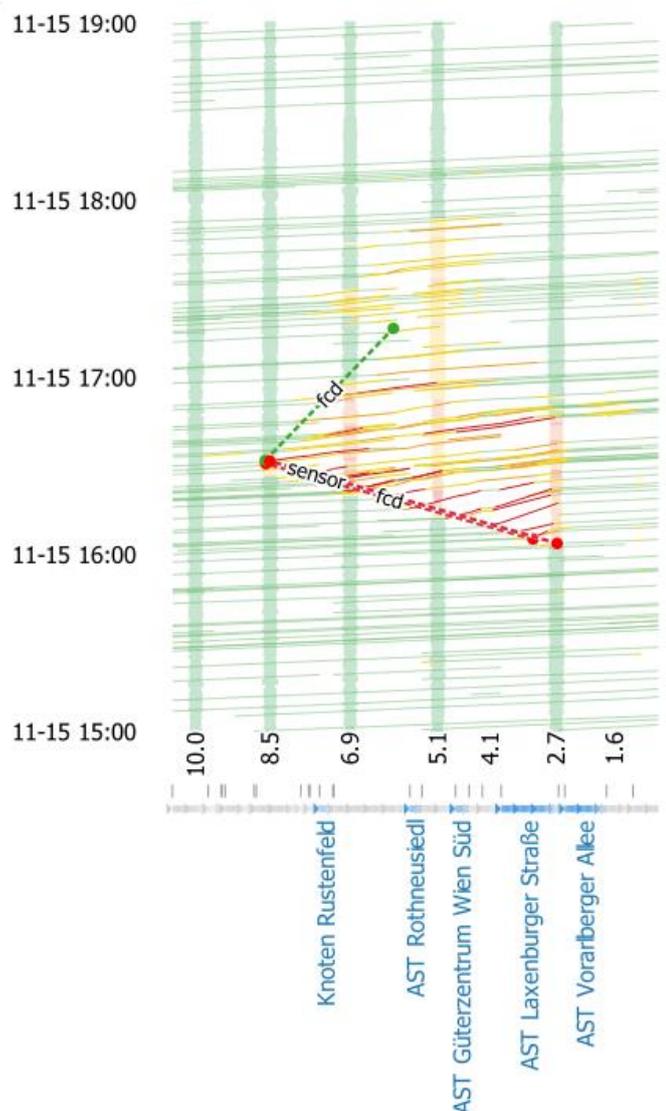


Abbildung 32: Weg-Zeit-Diagramm für das Stauereignis am 15.11.2017 für die S1 mit Staubildung (rote, strichlierte Linien) und Stauauflösung (grüne, strichlierte Linien)

Methode 1a: Berechnung der Staubildungsdynamik durch FCD-Staudetektionen

Geschwindigkeit des Stauendes gegen Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{-(8,81 \text{ km} - 3,08 \text{ km})}{16:30 \text{ h} - 16:03 \text{ h}} = \frac{-5,73 \text{ km}}{0:27 \text{ h}}$ $= -12,73$
---	---

Methode 2: Berechnung der Staubildungsdynamik mit FCD-Daten und Querschnittsmessungen

FCD-Messung um 16:03:25 zwischen KM 3,08 und KM 2,70

Geschwindigkeit im Stau [km/h]	$v_a = 23,61$
--------------------------------	---------------

Querschnittsmessung 16:00 – 16:05 Uhr vor dem Stau bei KM 5,1	
LKW-Anteil [%]	$p_{LKW} = 17,9\%$
Geschwindigkeit vor Stau [km/h]	$v_b = 91,23$
Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_b = 3084$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b} = \frac{3084}{91,23} = 33$
Geschwindigkeit des Stauendes	
Abstand zwischen Fahrzeugen im Stau [m]	$d_a = f(v_a) = \begin{cases} v_a * 0,55 & v_a * 0,55 > 2 \\ 2 & \text{sonst} \end{cases} = 12,99$
Verkehrsdichte im Stau (2 Spuren) [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = \frac{1000 * 2}{(5 + 12,99) * (1 - 0,179) + (16,5 + 12,99) * 0,179} = 100$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 2361$
Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} = \frac{2361 - 3084}{100 - 33} = \frac{-723}{67} = -10,79$

Methode 3: Berechnung der Staubildungsdynamik ausschließlich anhand von querschnittsbasierten Messwerten

Querschnittsmessung 16:05 – 16:10 Uhr im bzw. kurz nach dem Stau bei KM 2,725	
Geschwindigkeit im Stau [km/h]	$v_a = 41,87$
LKW-Anteil [%]	6,12 %
Querschnittsmessung 16:05 – 16:10 Uhr vor dem Stau bei KM 5,1	
Geschwindigkeit vor Stau [km/h]	$v_b = 90,02$
Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_b = 3288$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b} = \frac{3288}{90,02} = 37$
Geschwindigkeit des Stauendes	
Abstand zwischen Fahrzeugen im Stau [m]	$d_a = f(v_a) = \begin{cases} v_a * 0,55 & v_a * 0,55 > 2 \\ 2 & \text{sonst} \end{cases} = 23$
Verkehrsdichte im Stau (2 Spuren) [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = \frac{1000 * 2}{(5 + 23) * (1 - 0,0612) + (16,5 + 23) * 0,0612} = 71$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 70 * 41,87 = 2931$

Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} = \frac{2931 - 3288}{70 - 37} = \frac{-357}{33}$ $= -10,81$
--------------------------------------	--

3.2.5.3 Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik der Stauauflösung

Für dieses Beispiel wurde auch die Stauauflösungsdynamik berechnet. Der Stau baute sich zwischen 16:30 und 17:15 Uhr ab (Ermittlung anhand FC-Daten). Die letzte Detektion des aufbauenden Staus erfolgt um 16:30 Uhr bei KM 8,81 und die letzte Detektion des auflösenden Staus erfolgt um 17:15 Uhr bei KM 6,12. Der Abbau des Stauendes erfolgte näherungsweise linear.

Methode 1a: Berechnung der Stauauflösungsdynamik anhand von FCD-Detektionen

Geschwindigkeit des Stauendes gegen Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{-(6,12 \text{ km} - 8,81 \text{ km})}{17:15 \text{ h} - 16:30 \text{ h}} = \frac{2,69 \text{ km}}{0:45 \text{ h}}$ $= +3,59$
--	---

Methode 2: Berechnung der Stauauflösungsdynamik anhand von FC-Daten und Querschnittsmessungen

Sensor bei KM 6,885 (im Stau)	
Gemessene Geschwindigkeit im Stau [km/h]	$v_a = 37,04$
LKW Anteil im Stau [%]	$p_{LKW} = 14,5\%$
Maximale Verkehrsdichte im Stau [Kfz/km]	$k_{max} = 74$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{max} = 2741$
Sensor bei KM 10,0 (vor Stau)	
Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_b = 2580$
Sensor-Geschwindigkeit vor Stau [km/h]	$v_b = 80,05$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = 32$
Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{max} - q_b}{k_{max} - k_b} = \frac{2741 - 2580}{74 - 32} = \frac{161}{42}$ $= +3,83$

3.2.5.4 Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Anhand der Anzahl der FCD-Befahrungen der Testdaten sowie der Verkehrsstärke vor dem Stau kann nun der tatsächlich erreichte FCD-Durchdringungsgrad bestimmt werden. FCD-Befahrungen mit einer verifizierten Verzögerung am Stauende (<30 km/h) zwischen 16:00 und 18:00 Uhr werden für die Berechnung herangezogen.

FCD-Durchdringungsgrad der Testdaten

FCD-Verkehrsstärke [Kfz/h]	$q_{FCD} = 27$
Verkehrsstärke bei KM 10,0 [Kfz/h]	$q_b = 3086$
Durchdringungsgrad [%]	$p = \frac{q_{FCD}}{q_b} = \frac{27}{3086} = \mathbf{0,87\%}$

Anhand der berechneten Stauausbreitungsgeschwindigkeit von -12,73 km/h sowie der Anzahl der FCD-Befahrungen ergibt sich nach dem stochastischen Modell folgende zeitliche und räumliche Genauigkeit (95% Wahrscheinlichkeit) der Stauende-Detektion.

Zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion

Zeitliche Genauigkeit bei 27 Kfz/h [s]	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{27} = \mathbf{399\ s}$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -12,73 km/h [m]	$s = T * \frac{ v }{3,6} = 399 * \frac{ -12,73 }{3,6} = \mathbf{1412\ m}$

Die tatsächliche räumliche Differenz zwischen den einzelnen FCD-Detektionen beträgt im arithmetischen Mittel 378 Meter (Minimum: 10 Meter, Maximum: 996 Meter).

Um eine räumliche Genauigkeit des Stauendes von max. 500 Metern zu detektieren, wird folgender FCD-Durchdringungsgrad benötigt.

Berechneter FCD-Durchdringungsgrade bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit

Verkehrsstärke am Stauende [Kfz/h]	3086
Minuten, die das Stauende für 500 Meter benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right = \left \frac{500}{-12,73} * 0,06 \right = 2,36$ $= 2:21$
FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Kfz/h]	$q_{FCD} = -\ln(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{2,36} = 76$
Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{76}{3086} = 0,025 = \mathbf{2,5\%}$

3.2.6 Stauereignis 4: A4 – Ostautobahn bei Neusiedl am See

3.2.6.1 Beschreibung des Stauereignisses

Am 9.11.2017 bildete sich zwischen 08:30 Uhr bis 11:30 auf der A4 in Fahrtrichtung Ungarn bei der AST Neusiedl ein Rückstau, der bis zum Knoten Bruckneudorf zurückreichte. Folgende Pressemeldung dokumentiert das Ereignis:

- „Im Raum Parndorf (Bezirk Neusiedl am See) sorgte das heute, Donnerstag, stattfindende "Christmas Late Night Shopping" schon am Vormittag für

Verkehrsbehinderungen.“ (Quelle: derstandard.at/2000067517960/Late-Night-Shopping-in-Parndorf-sorgt-fuer-Staus-bei-Neusiedl)

Durch die Situation bei der AST Neusiedl war die Stauwurzel statisch und während des Staus herrschte es ein hohes Verkehrsaufkommen. Für die Analyse sind die zwei Anschlussstellen im Staubereich (AST Parndorf, AST Neusiedl) sowie die Messquerschnitte auf der A4 zwischen KM 26 und KM 54 relevant. Die Abbildung 33 zeigt die Situation um 10:00 Uhr während der maximalen Stauausdehnung.

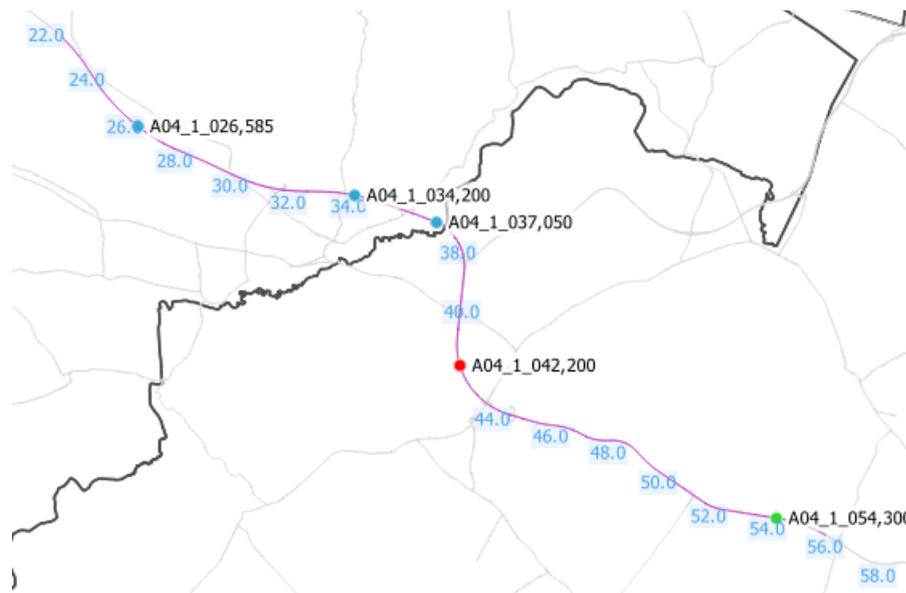


Abbildung 33: Umgebungskarte der A4 bei Neusiedl mit Verkehrssensoren (blau: vor Stau, rot: im Stau, gelb: stockender Verkehr, grün: nach Stau)

3.2.6.2 Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik

Für die Berechnung der Lagedynamik werden nach Methode 1 die ersten und letzten Stau-Detektionen der FC-Daten herangezogen (Geschwindigkeit < 30 km/h). Die erste Detektion des Stauendes erfolgte bei KM 43,08 um 08:25 Uhr, die letzte Detektion bei KM 37,66 um 09:48 Uhr (siehe rote Linie in Abbildung 34). Der Aufbau des Stauendes erfolgte näherungsweise linear.

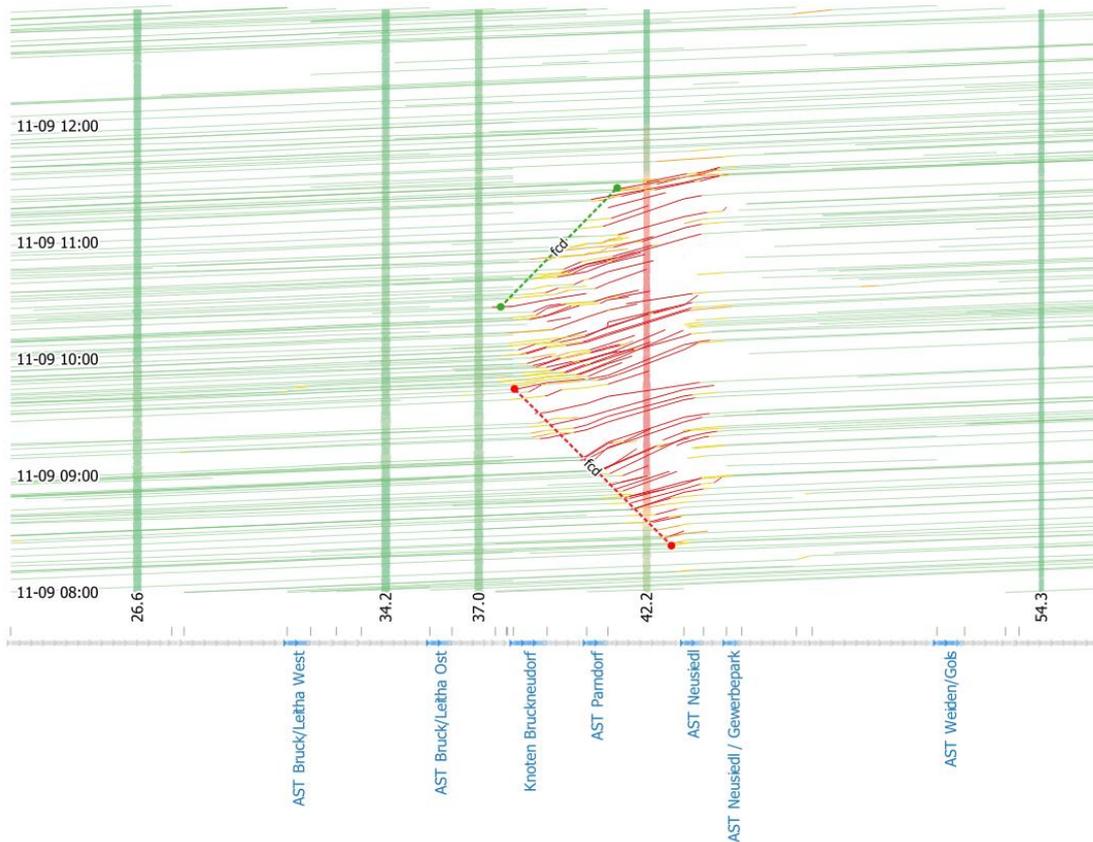


Abbildung 34: Weg-Zeit-Grafik für die A4 mit Staubildung (rote, strichlierte Linien) und Stauauflösung (grüne, strichlierte Linien)

Methode 1a: Berechnung der Lagedynamik durch FCD-Staudetektionen

Geschwindigkeit des Stauendes in Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{37,66 \text{ km} - 43,08 \text{ km}}{09:48 \text{ h} - 08:25 \text{ h}} = \frac{-5,42 \text{ km}}{1:23 \text{ h}} = -3,92$
---	---

Methode 2: Berechnung der Lagedynamik mit FCD-Daten und Querschnittsmessungen

FCD-Messung um 08:25:42 zwischen KM 42,97 und KM 43,34

Geschwindigkeit im Stau [km/h] $v_a = 13,50$

Querschnittsmessung 08:25 – 08:30 Uhr vor dem Stau bei KM 37,05

LKW-Anteil $p_{LKW} = 17,17\%$

Geschwindigkeit vor dem Stau [km/h] $v_b = 100,60$

Verkehrsstärke vor dem Stau [Kfz/h] $q_b = 2376$

Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b} = \frac{2376}{100,60} = 24$
Geschwindigkeit des Stauendes	
Verkehrsdichte im Stau (2 Spuren) [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = 139$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 1877$
Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} = \frac{1877 - 2376}{139 - 24} = \frac{-499}{115}$ $= -4,34$

Die berechnete Stauende-Geschwindigkeit ist in diesem Beispiel etwas zu hoch, da der Abfluss bei der AST Parndorf nicht berücksichtigt werden kann.

3.2.6.3 Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Anhand der Anzahl der FCD-Befahrungen der Testdaten sowie der Verkehrsstärke vor dem Stau kann nun der tatsächlich erreichte FCD-Durchdringungsgrad bestimmt werden.

FCD-Durchdringungsgrad der Testdaten	
FCD-Verkehrsstärke [Kfz/h]	$q_{FCD} = 57$
Verkehrsstärke bei km 37,0 [Kfz/h]	$q_b = 2545$
Durchdringungsgrad [%]	$p = \frac{q_{FCD}}{q_b} = \frac{57}{2545} = 2,24 \%$

Anhand der berechneten Stauausbreitungsgeschwindigkeit von -3,92 km/h sowie der Anzahl der FCD-Befahrungen ergibt sich nach dem stochastischen Modell folgende zeitliche und räumliche Genauigkeit (95% Wahrscheinlichkeit) der Stauende-Detektion.

Zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion	
Zeitliche Genauigkeit bei 57 Kfz/h [s]	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{57} = 189 \text{ s}$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -3,92 km/h [m]	$s = T * \frac{ v }{3,6} = 189 * \frac{ -3,92 }{3,6} = 206 \text{ m}$

Um eine räumliche Genauigkeit des Stauendes von max. 500 Metern zu detektieren, wird folgender FCD-Durchdringungsgrad benötigt.

Berechneter FCD-Durchdringungsgrade bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit	
Verkehrsstärke am Stauende [Kfz/h]	$q = 2376$
Minuten, die das Stauende für 500 Meter benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right = \left \frac{500}{-3,92} * 0,06 \right = 7,65$ $= 7:39$

FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Kfz/h]	$q_{FCD} = -\ln(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{7,65} = 23$
Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{23}{2376} = 0,0097 = \mathbf{0,97\%}$

3.2.7 Stauereignis 5: A12 – Inntalautobahn bei Zirl

3.2.7.1 Beschreibung des Stauereignisses

Durch die hohe Verkehrsbelastung staute es auf der A12 bei der AST Zirl Ost am 20.11.2017 zwischen 07:00 Uhr und 08:00 Uhr. Der zufließende Verkehr auf die A12 an der Anschlussstelle Zirl Ost Richtung Innsbruck erzeugte einen Rückstau auf der A12. Danach kann der Verkehr trotz hoher Verkehrsbelastung wieder frei fließen. Im Auflösungsbereich des Staus werden sehr hohe Verkehrsstärken q bei einer Verkehrsdichte k , welche die maximal zulässige Verkehrsdichte k_{max} übersteigt, erreicht. Der Stau löst sich sehr schnell wieder auf, nachdem ab 08:00 Uhr wesentlich weniger Fahrzeuge auf der A12 aus Richtung Landeck nachkommen.

Zusammenfassende Eigenschaften des Staus sind (1) die statische Stauwurzel bei der Anschlussstelle Zirl Ost, (2) das erhöhte Verkehrsaufkommen an der Stauwurzel und (3) die Ausbreitung des Stauendes auf der A12 in Richtung Landeck. Die Messquerschnitte auf der A12 in Richtung Innsbruck zwischen KM 94 und KM 78 sind in der Abbildung 35 ersichtlich. Die Farben bei den Verkehrssensoren zeigen die Situation während der maximalen Stauausdehnung um 07:30 Uhr.



Abbildung 35: Umgebungskarte der A12 bei Zirl mit Verkehrssensoren (blau: vor Stau, rot: im Stau, gelb: stockender Verkehr, grün: nach Stau)

3.2.7.2 Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik

Für die Berechnung der Lagedynamik werden nach Methode 1a die ersten und letzten Stau-Detektionen der FC-Daten herangezogen (Geschwindigkeit < 30 km/h). Die erste FCD-Detektion des aufbauenden Stauendes erfolgte bei KM 86,56 um 7:02 Uhr, die letzte Detektion bei KM 89,64 um 07:27 (siehe rote Linie in Abbildung 36). Der Aufbau des Stauendes erfolgte näherungsweise linear.

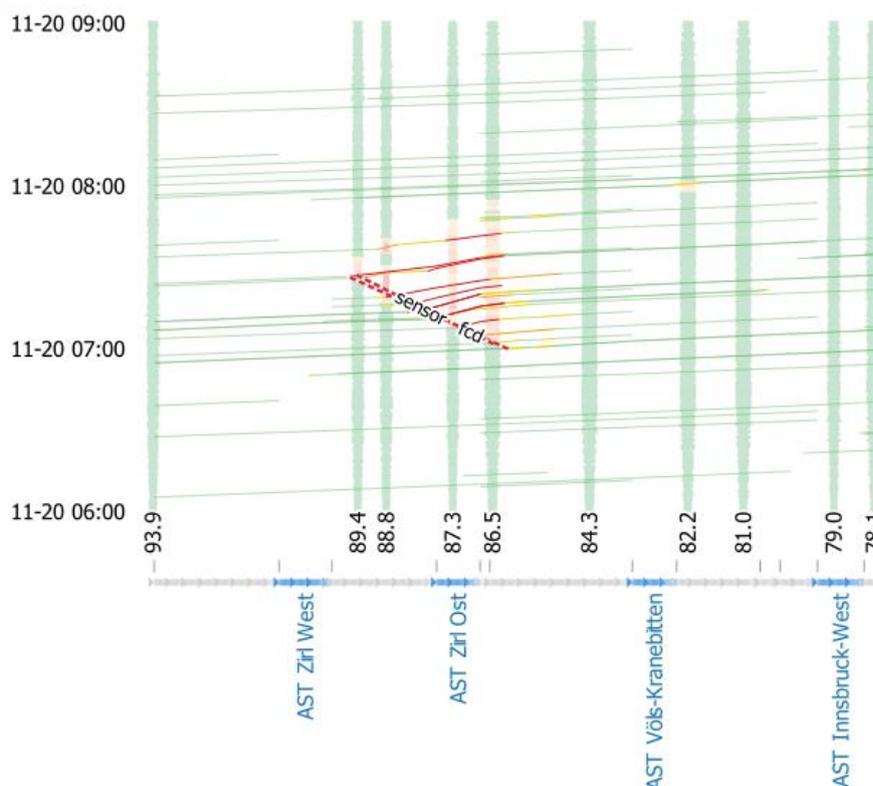


Abbildung 36: Weg-Zeit-Diagramm für das Stauereignis am 20.11.2017 auf der A12 Richtung Innsbruck bei der AST Zirl Ost mit Staubildung (rote, strichlierte Linien) und Stauauflösung (grüne, strichlierte Linien)

Methode 1a: Berechnung der Stauauflösungsdynamik anhand von FCD-Detektionen

Geschwindigkeit des Stauendes gegen Kilometrierungsrichtung [km/h]	$\frac{-(89,64 \text{ km} - 86,56 \text{ km})}{07:28 \text{ h} - 07:02 \text{ h}} = \frac{-3,08 \text{ km}}{0:26 \text{ h}}$ $= -7,11$
---	--

Methode 2: Berechnung der Staubildungsdynamik mit FCD-Daten und Querschnittsmessungen

FCD-Messung um 07:08:17 zwischen KM 87,24 und KM 86,74

Geschwindigkeit im Stau [km/h]	$v_a = 9,56$
Querschnittsmessung 07:05 – 07:10 Uhr vor dem Stau bei KM 88,806	
LKW-Anteil [%]	$p_{LKW} = 9,4\%$
Geschwindigkeit vor Stau [km/h]	$v_b = 97,25$
Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_b = 2796$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b} = \frac{2796}{97,25} = 29$
Geschwindigkeit des Stauendes	
Abstand zwischen Fahrzeugen im Stau [m]	$d_a = f(v_a) = \begin{cases} v_a * 0,55 & v_a * 0,55 > 2 \\ 2 & \text{sonst} \end{cases}$ $= 4,78$
Verkehrsdichte im Stau (2 Spuren) [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = \frac{1000 * 2}{(5 + 4,78) * (1 - 0,094) + (16,5 + 4,78) * 0,094} = 176$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 1683$
Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} = \frac{1682 - 2796}{176 - 29} = \frac{-1114}{147}$ $= -7,57$

Methode 3: Berechnung der Staubildungsdynamik ausschließlich anhand von querschnittsbasierten Messwerten

Querschnittsmessung 07:10 – 07:15 Uhr im Stau bei KM 87,345	
Geschwindigkeit im Stau (zu hoch?) [km/h]	$v_a = 46,39$
LKW-Anteil [%]	$p_{LKW} = 51,7\%$
Querschnittsmessung 07:10 – 07:15 Uhr vor dem Stau bei KM 88,806	
Geschwindigkeit vor Stau [km/h]	$v_b = 92,30$
Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_b = 2808$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b} = \frac{2808}{92,30} = 30$

Geschwindigkeit des Stauendes	
Verkehrsdichte im Stau [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = 55$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 55 \frac{Kfz}{km} * 46,39 \frac{km}{h}$ $= 2551$
Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} = \frac{2551 - 2808}{55 - 30} = \frac{-257}{25}$ $= -10,28$

Die Geschwindigkeit des Stauendes wird ermittelt, um die Bewegung des Stauendes zwischen zwei FCD-Befahrungen zu interpolieren. Im Beispiel der A12 findet eine Befahrung zu 95% alle 400 Sekunden statt. Dadurch ergibt sich durch die Methoden folgende Ungenauigkeit gegenüber der tatsächlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit von -7,11 km/h:

Ungenauigkeit bei der Stauende-Detektion bei Methode 2 und 3	
Methode 2 [m]	$s_{m1} = \left \frac{(v_{w_{m1}} - v_{w_{FCD}}) * T}{3,6} \right $ $= \frac{(-7,57 - 7,11) * 400}{3,6} = 51$
Methode 3 [m]	$s_{m2} = \left \frac{(v_{w_{m2}} - v_{w_{FCD}}) * T}{3,6} \right $ $= \frac{(-10,28 - 7,11) * 400}{3,6}$ $= 352$
Ohne Interpolation [m]	$s = \frac{ -7,11 * 400}{3,6} = 790$

3.2.7.3 Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Anhand der Anzahl der FCD-Befahrungen sowie der Verkehrsstärke vor dem Stau kann nun der tatsächlich erreichte FCD-Durchdringungsgrad bestimmt werden. Für die Berechnungen werden FCD-Befahrungen mit einer verifizierten Verzögerung am Stauende (<30 km/h) zwischen 07:00 und 08:00 Uhr herangezogen.

FCD-Durchdringungsgrad der Testdaten	
FCD-Verkehrsstärke [Kfz/h]	$q_{FCD} = 16$
Verkehrsstärke bei km 89,4 [Kfz/h]	$q_b = 2137$
Durchdringungsgrad [%]	$p = \frac{q_{FCD}}{q_b} = \frac{16}{2137} = 0,75 \%$

Anhand der berechneten Stauausbreitungsgeschwindigkeit von -7,11 km/h sowie der Anzahl der FCD-Befahrungen ergibt sich nach dem stochastischen Modell folgende zeitliche und räumliche Genauigkeit (95% Wahrscheinlichkeit) der Stauende-Detektion.

Zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion

Zeitliche Genauigkeit bei 16 Kfz/h [s]	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{16} = 674 \text{ s}$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -7,11 km/h [m]	$s = T * \frac{ v }{3,6} = 674 * \frac{ -7,11 }{3,6} = 1331 \text{ m}$

Die tatsächliche räumliche Differenz zwischen den einzelnen FCD-Detektionen beträgt im arithmetischen Mittel 561 Meter (Minimum: 29 Meter, Maximum: 3402 Meter).

Um eine räumliche Genauigkeit des Stauendes von max. 500 Metern zu detektieren, wird folgender FCD-Durchdringungsgrad benötigt.

Berechneter FCD-Durchdringungsgrade bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit

Verkehrsstärke am Stauende (KM 45,3) [Kfz/h]	$q = 2137$
Minuten, die das Stauende für 500 Meter benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right = \left \frac{500}{-7,11} * 0,06 \right = 4,22$ $= 4:13 \text{ min}$
FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Kfz/h]	$q_{FCD} = -\ln(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{4,22} = 43$
FCD-Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{43}{2137} = 0,015 = 2,0\%$

Theoretische zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion

Zeitliche Genauigkeit bei 43 Kfz/h [sek]	$T_{500} = -\ln(1 - 0,95) * \frac{2137}{43} = 149 \text{ s}$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -7,57 km/h und einem Durchdringungsgrad von 16 Kfz/h [m]	$s_{500} = T_{500} * \frac{ v }{3,6} = 149 * \frac{ -7,57 }{3,6} = 313 \text{ m}$

3.2.8 Stauereignis 6: A10 – Tauernautobahn vor Hieflertunnel

3.2.8.1 Beschreibung des Stauereignisses

Am 27.11.2017 um ca. 06:30 Uhr hat sich auf der A10 Tauernautobahn in Fahrtrichtung Salzburg nach dem Hiefler/Ofenauertunnel vor der AST Golling ein Unfall ereignet. Folgende Verkehrsmeldungen dokumentieren das Ereignis (Quelle: www.spritvergleich.at):

- 06:52 – Sperre: „A10 Tauern Autobahn: Villach Richtung Salzburg Zwischen Anschlußstelle Pass Lueg und Anschlußstelle Golling gesperrt, Unfall, mit mehreren Fahrzeugen im Hieflertunnel derzeit Totalsperre“
- 7:24 – Sperre: „A10 Tauern Autobahn: Villach Richtung Salzburg Zwischen Anschlußstelle Pass Lueg und Anschlußstelle Golling gesperrt, Unfall, mit mehreren Fahrzeugen im Hieflertunnel derzeit Totalsperre, 3-4 km Stau, Ausweichen über Pass Lueg nur für PKW empfohlen“
- 7:41 – Sperre: „A10 Tauern Autobahn: Villach Richtung Salzburg Zwischen Anschlußstelle Lammertal und Autobahnknoten Pongau gesperrt, Unfall, Reittunnel derzeit gesperrt, VU nach dem Tunnel, Vorsicht beim Stauende.“
- 7:44: „A10 Tauern Autobahn: Villach Richtung Salzburg Zwischen Anschlußstelle Pass Lueg und Anschlußstelle Golling Straße geräumt, Unfall, 5-8 km Stau, löst sich langsam auf“
- 8:11: „A10 Tauern Autobahn: Villach Richtung Salzburg Zwischen Anschlußstelle Lammertal und Autobahnknoten Pongau ein Fahrstreifen gesperrt, Unfall, Reittunnel wieder offen, Unfallstelle einspurig passierbar. Stau (wichtig nicht ausweichen über B 159, da zwischen Pöham und Bischofshofen eine Totalsperre wegen Felssturz ist)“
- 9:10: „A10 Tauern Autobahn: Villach - Salzburg Zwischen Anschlußstelle Pass Lueg und Anschlußstelle Golling in beiden Richtungen (Meldung aufgehoben)“

Aufgrund des Unfallorts unmittelbar nach dem Ofenauertunnel wurden beide Tunnel gesperrt. Daher ist die Stauwuzel statisch und hat sich vor den Hieflertunnel verlagert. Für LKW gab es keine Ausweichmöglichkeit. Durch den weiteren Staufbau kam es zu weiteren Tunnelsperren. Auffallend ist, dass die Fahrzeuge schnell auf das Stauende auffahren und innerhalb weniger Meter von 100 km/h auf 0 km/h abbremsen. Die folgende Abbildung 38 zeigt die Messquerschnitte auf der A10 zwischen den Kilometern 45 und 29. Der Unfall hat sich um 07:45 Uhr im Hiefler-Tunnel zwischen Kilometer 33 und 31 ereignet.



Abbildung 37: Umgebungskarte des Stauereignisses auf der A10 beim Ofenauertunnel mit vermuteter Unfallstande (Stern) und Verkehrssensoren (blau: vor Stau, rot: im Stau, gelb: stockender Verkehr, grün: nach Stau)

3.2.8.2 Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik der Staubildung

Für die Berechnung der Lagedynamik werden nach Methode 1a die ersten und letzten Stau-Detektionen der FC-Daten herangezogen (Geschwindigkeit < 30 km/h). Die erste Die erste FCD-Detektion erfolgte bei KM 34,5 um 6:51 Uhr, die letzte FCD-Detektion des aufbauenden Stauendes bei KM 43,1 um 07:30 Uhr. Der Aufbau des Stauendes erfolgte näherungsweise linear. Die Validierung mit Querschnittsmessungsdaten erfolgt mit allen Minutenwerten < 30 km/h (rot) und zwischen 30 km/h und 45 km/h (gelb).

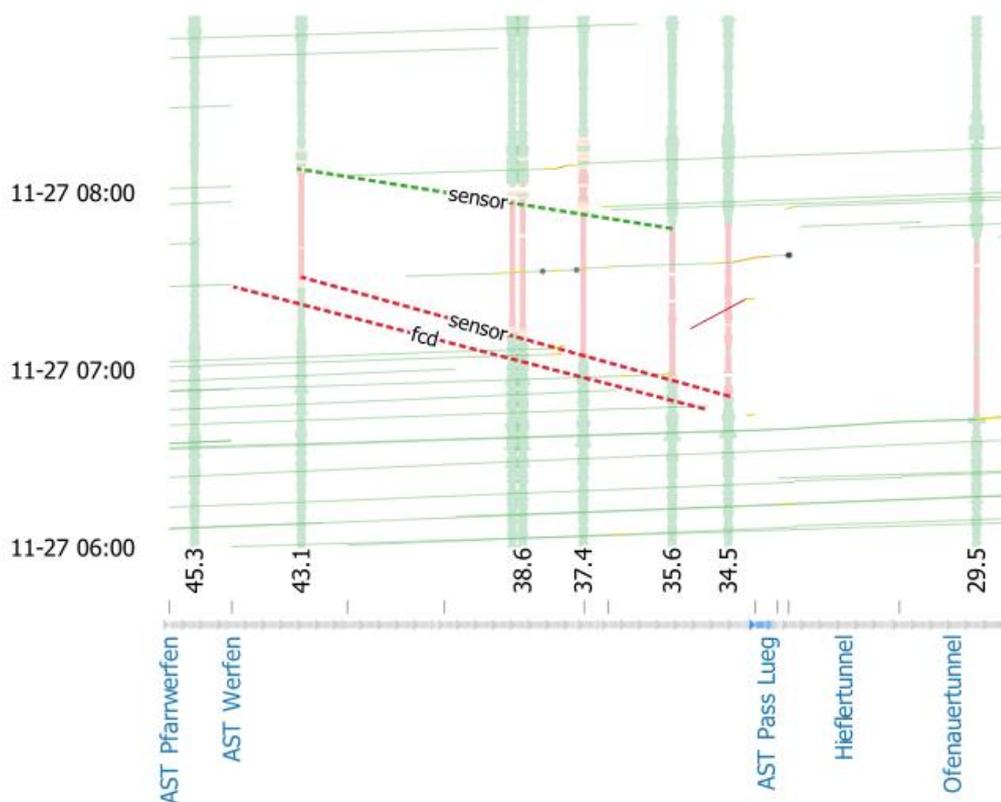


Abbildung 38: Weg-Zeit-Diagramm für das Stauereignis am 27.11.2017 auf der A10 Tauernautobahn in Fahrrichtung Salzburg beim Ofenauer/Hieflertunnel mit Staubildung (rote, strichlierte Linien) und Stauauflösung (grüne, strichlierte Linien)

Die Validierung mit FC-Daten wird mit allen Verzögerungen < 30 km/h durchgeführt. Die erste Detektion des aufbauenden Stauendes erfolgte bei KM 34,9 um 6:47 Uhr, die letzte Detektion bei KM 42,17 um 07:32 Uhr (siehe rote Linie in Abbildung 38). Der Aufbau des Stauendes erfolgte näherungsweise linear. Die Ausbreitung des Staus aus FC-Daten ist jedoch schwer zu detektieren, da nur wenige Daten verfügbar sind.

Methode 1a: Berechnung der Staubildungsdynamik anhand von FCD-Detektionen

Geschwindigkeit des Stauendes gegen Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{-(42,17 \text{ km} - 34,9 \text{ km})}{7:32 \text{ h} - 6:47 \text{ h}} = \frac{-7,37 \text{ km}}{0:45 \text{ h}}$ $= -9,69$
---	---

Methode 1b: Berechnung der Staubildungsdynamik anhand von Staudetektionen der Querschnittsmessungen

Geschwindigkeit des Stauendes gegen Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{-(43,1 \text{ km} - 34,5 \text{ km})}{7:30 \text{ h} - 6:51 \text{ h}} = \frac{-8,6 \text{ km}}{0:39 \text{ h}}$ $= -13,23$
---	---

Bei einer Totalsperre beträgt die Geschwindigkeit im Stau 0 km/h.

Methode 2: Berechnung der Staubildungsdynamik mit FCD-Daten und Querschnittsmessungen

Querschnittsmessung 06:45 – 06:50 Uhr vor dem Stau bei KM 45,25	
LKW-Anteil [%]	$p_{LKW} = 14,29\%$
Geschwindigkeit vor Stau [km/h]	$v_b = 105,11$
Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_b = 1680$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b} = \frac{1680}{105,11} = 16$
Geschwindigkeit des Stauendes	
Geschwindigkeit im Stau [km/h]	$v_a = 0$
Verkehrsdichte im Stau (2 Spuren) [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = 231$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 0$
Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} = \frac{0 - 1680}{231 - 16} = \frac{-1680}{215}$ $= -7,8$

3.2.8.3 Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik der Stauauflösung

Mit der Öffnung der Totalsperre löst sich der Stau auf. Die Stauwurzel bewegt sich dabei mit negativer Geschwindigkeit entgegen der Fahrtrichtung (vgl. mit grüner Linie in Abbildung 38).

Methode 1a: Berechnung der Stauauflösungsdynamik anhand von FCD-Detektionen

Geschwindigkeit der Stauwurzel gegen Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{-(43,1 \text{ km} - 35,6 \text{ km})}{8:08 \text{ h} - 7:50 \text{ h}} = \frac{-7,5 \text{ km}}{0:18 \text{ h}}$ $= -25$
--	--

Die Querschnittsmessung erfolgt zwischen 07:45 und 07:50 Uhr nach dem Stau bei KM 34,5.

Methode 1b: Berechnung der Stauauflösungsdynamik anhand von Staudetektionen der Querschnittsmessungen

Querschnittsmessung (07:45 – 07:50 Uhr) nach dem Stau bei KM 34,5	
LKW-Anteil [%]	$p_{LKW} = 15,29\%$
Geschwindigkeit nach Stau [km/h]	$v_c = 90,50$

Verkehrsstärke nach Stau [Kfz/h]	$q_c = 1884$
Verkehrsdichte nach dem Stau [Kfz/km]	$k_c = \frac{q_c}{v_c} = \frac{1884}{90,50} = 21$
Geschwindigkeit des Stauendes	
Verkehrsdichte im Stau (2 Spuren) [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = 228$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 0$
Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_c - q_{a_{max}}}{k_c - k_{a_{max}}} = \frac{1884 - 0}{21 - 228} = \frac{1884}{-207} = -9,09$

3.2.8.4 Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Anhand der Anzahl der FCD-Befahrungen sowie der Verkehrsstärke vor dem Stau kann nun der tatsächlich erreichte FCD-Durchdringungsgrad bestimmt werden. Zur Berechnung werden FCD-Befahrungen mit einer verifizierten Verzögerung am Stauende (<30 km/h) zwischen 06:30 und 08:30 Uhr herangezogen.

FCD-Durchdringungsgrad der Testdaten	
FCD-Verkehrsstärke [Kfz/h]	$q_{FCD} = 8$
Verkehrsstärke bei KM 45,25 [Kfz/h]	$q_b = 1196$
Durchdringungsgrad [%]	$p = \frac{q_{FCD}}{q_b} = \frac{8}{1196} = 0,6 \%$

Anhand der berechneten Stauausbreitungsgeschwindigkeit von -9,69 km/h sowie der Anzahl der FCD-Befahrungen ergibt sich nach dem stochastischen Modell folgende zeitliche und räumliche Genauigkeit (95% Wahrscheinlichkeit) der Stauende-Detektion.

Zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion	
Zeitliche Genauigkeit bei 8 Kfz/h [s]	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{8} = 1348 \text{ s}$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -9,69 km/h [m]	$s = T * \frac{ v }{3,6} = 1348 * \frac{ -9,69 }{3,6} = 3629 \text{ m}$

Um eine räumliche Genauigkeit des Stauendes von max. 500 Metern zu detektieren, wird folgender FCD-Durchdringungsgrad benötigt.

Berechneter FCD-Durchdringungsgrad bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit	
Verkehrsstärke am Stauende (KM 45,25) [Kfz/h]	$v_c = 1196$

Minuten, die das Stauende für 500 Meter benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right = \left \frac{500}{-9,69} * 0,06 \right = 3,05$ $= 3:03 \text{ min}$
FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Kfz/h]	$q_{FCD} = -\ln(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{3,05} = 59$
FCD-Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{59}{1196} = 0,049 = 4,9 \%$

3.2.9 Stauereignis 7: A22 – Donauuferautobahn in Wien

3.2.9.1 Beschreibung des Stauereignisses

Aufgrund einer Baustelle bei der Einmündung in die A23 und aufgrund von Verkehrsüberlastung auf der A23 am Knoten Kaisermühlen staute sich der Verkehr am 15.11.2017 zwischen 15:00 Uhr und 18:25 Uhr auf der A22 Donauuferautobahn vor dem Knoten Kaisermühlen. Folgende Verkehrsmeldung dokumentiert das Ereignis:

- „A22 Donauufer Autobahn: Stockerau Richtung Wien Zwischen Tunnel Kaisermühlen und Autobahnknoten Kaisermühlen Stau“ (Quelle: spritvergleich.at 15.11.2017 – 16:24)

Die statische Stauwurzel liegt an einer Baustelle und es herrscht ein hohes Verkehrsaufkommen. Im Bereich des Staus gibt es zwei Anschlussstellen (AST Kaisermühlen, AST Reichsbrücke/VIC). Wegen des Kaisermühlentunnels sind die FC-Daten im Staubereich nur bedingt verfügbar. Bei den Anschlussstellen im Staubereich ist kein Ab- und Zufluss bekannt. Die Anzahl von Fahrspuren ist unterschiedlich: 4-spurig bis zum Kaisermühlen Tunnel, 3-spurig bis Auffahrt A23 und danach 2-spurig. Für die Analyse sind die Messquerschnitte auf der A22 zwischen KM 6 und KM 0 relevant. Die Abbildung 39 zeigt die Situation um 17:00 Uhr während der maximalen Stauausdehnung.



Abbildung 39: Umgebungskarte der A22 beim Kaisermühlentunnel mit Verkehrssensoren (blau: vor Stau, rot: im Stau, gelb: stockender Verkehr, grün: nach Stau)

3.2.9.2 Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik der Staubildung

Für die Berechnung der Lagedynamik werden nach Methode 1 die ersten und letzten Stau-Detektionen der FC-Daten herangezogen (Geschwindigkeit < 30 km/h). Die erste FCD-Detektion des Stauendes erfolgte bei KM 1,50 um 15:57 Uhr, die letzte Detektion bei KM 3,71 um 16:11 Uhr (siehe rote Linie in Abbildung 40). Die Lagedynamik des Stauendes ist näherungsweise linear.

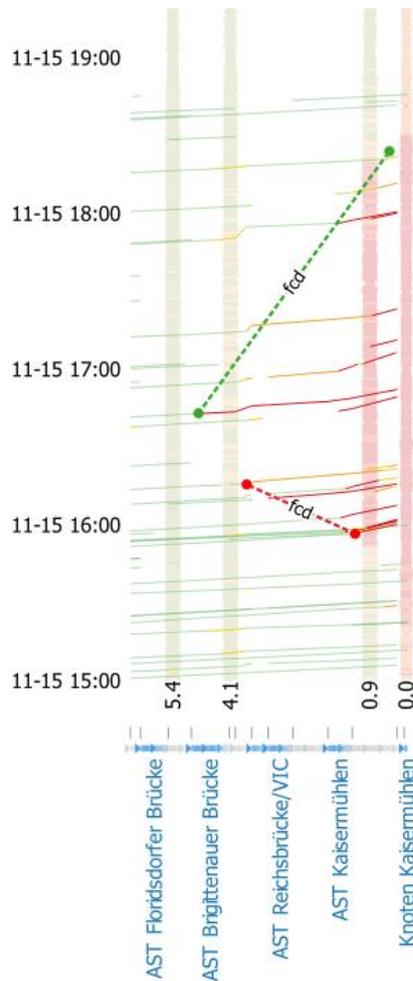


Abbildung 40: Weg-Zeit-Diagramm für das Stauereignis am 15.11.2017 auf der A22 Donauuferautobahn am Knoten Kaisermühlen. Die Staubildung ist mit roten, strichlierten Linien und die Stauauflösung mit grünen strichlierten Linien dargestellt.

Methode 1a: Berechnung der Lagedynamik durch FCD-Staudetektionen

Geschwindigkeit des Stauendes gegen
Kilometrierungsrichtung [km/h]

$$v = \frac{-(3,71 \text{ km} - 1,5 \text{ km})}{16:11 \text{ h} - 15:57 \text{ h}} = \frac{-2,21 \text{ km}}{0:14 \text{ h}} = -9,47$$

Methode 2: Berechnung der Lagedynamik mit FCD-Daten und Querschnittsmessungen

FCD-Messung um 15:57:37 zwischen KM 1,22 und KM 0,23

Geschwindigkeit im Stau [km/h]

$$v_a = 9,71$$

Querschnittsmessung 15:55 – 16:00 Uhr vor dem Stau bei KM 4,051

LKW-Anteil [%]	$p_{LKW} = 8,4\%$
Geschwindigkeit vor Stau [km/h]	$v_b = 83,67$
Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_b = 3840$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b} = \frac{3840}{83,67} = 46$
Geschwindigkeit des Stauendes	
Verkehrsdichte im Stau (2 Spuren / Auffahrt) [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = 177$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 1719$
Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} = \frac{1719 - 3840}{177 - 46} = \frac{-2121}{131} = -15,95$

Die Geschwindigkeit des Stauendes ist vermutlich zu hoch, da ein unbekannter Anteil der Fahrzeuge Richtung A23 Nord abfließt.

3.2.9.3 Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Anhand der Anzahl der FCD-Befahrungen sowie der Verkehrsstärke vor dem Stau kann nun der tatsächlich erreichte FCD-Durchdringungsgrad bestimmt werden.

FCD-Durchdringungsgrad der Testdaten	
FCD-Verkehrsstärke [Kfz/h]	$q_{FCD} = 13$
Verkehrsstärke bei km 4,1 [Kfz/h]	$q_b = 4046$
Durchdringungsgrad [%]	$q = \frac{q_{FCD}}{q_b} = \frac{13}{4046} = 0,3\%$

Anhand der berechneten Stauausbreitungsgeschwindigkeit von -9,47 km/h sowie der Anzahl der FCD-Befahrungen ergibt sich nach dem stochastischen Modell folgende zeitliche und räumliche Genauigkeit (95% Wahrscheinlichkeit) der Stauende-Detektion.

Zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion	
Zeitliche Genauigkeit bei 13 Kfz/h [s]	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{13} = 829 \text{ s}$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -9,47 km/h [m]	$s = T * \frac{ v }{3,6} = 829 * \frac{ -9,47 }{3,6} = 2182 \text{ m}$

Um eine räumliche Genauigkeit des Stauendes von max. 500 Metern zu detektieren, wird folgender FCD-Durchdringungsgrad benötigt.

Berechneter FCD-Durchdringungsgrade bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit	
Verkehrsstärke am Stauende [Kfz/h]	$q = 4046$
Minuten, die das Stauende für 500 Meter benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right = \left \frac{500}{-9,47} * 0,06 \right = 3,17$ $= 3:10$
FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Kfz/h]	$q_{FCD} = -\log(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{3,17} = 57$
Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{57}{4046} = 0,0141 = 1,4\%$

3.2.10 Stauereignis 8: A7 – Mühlkreisautobahn durch Linz

3.2.10.1 Beschreibung des Stauereignisses

Am 24.11.2017 um kurz vor 12 Uhr mittags ereignete sich Auf der A7 Mühlkreisautobahn in Fahrtrichtung Freistadt ein Unfall mit mehreren Fahrzeugen. Aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens auf diesem Autobahnabschnitt kam es unmittelbar zu einer Staubildung, die in den Spitzenzeiten bis zurück zum Knoten Linz reichte.

Folgende Verkehrsmeldungen dokumentieren das Ereignis:

- 24.11.2017 - 12:08:34: A7 Mühlkreis Autobahn: Linz Richtung Freistadt Anschlußstelle Hafestraße gesperrt, Unfall mit mehreren Fahrzeugen, Stau (Quelle: <https://spritvergleich.at>)
- 24.11.2017 - 12:17:17: A7 Mühlkreis Autobahn: Linz Richtung Freistadt Voest-Brücke Unfall, Verkehrsbehinderung, Verkehrsunfall mit drei Fzg.- Sachschaden- Wechselseitige Sperre - Aufnahme erfolgt. (Quelle: <https://spritvergleich.at>)
- 24.11.2017 - 12:59:57: A7 Mühlkreis Autobahn: Linz Richtung Freistadt Voest-Brücke Unfallstelle geräumt (Quelle: <https://spritvergleich.at>)
- 24.11.2017 - 13:04:57: A7 Mühlkreis Autobahn: Linz Richtung Freistadt Anschlußstelle Hafestraße (Meldung aufgehoben) (Quelle: <https://spritvergleich.at>)

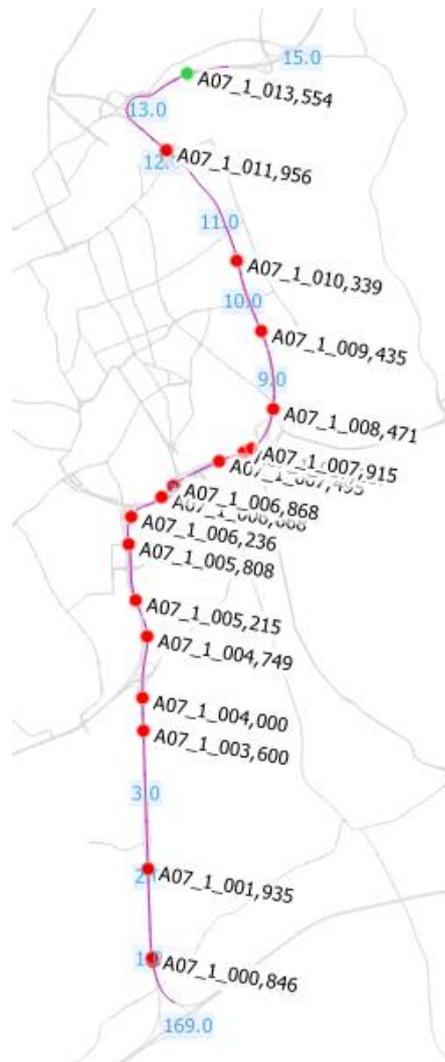


Abbildung 41: Umgebungskarte der A7 durch Linz mit Verkehrssensoren (blau: vor Stau, rot: im Stau, gelb: stockender Verkehr, grün: nach Stau)

3.2.10.2 Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik der Staubildung

Für die Berechnung der Lagedynamik werden nach Methode 1a die ersten und letzten Stau-Detektionen der FC-Daten herangezogen (Geschwindigkeit < 30 km/h). Die erste FCD-Detektion des aufbauenden Stauendes erfolgte bei KM 12,0 um 11:49 Uhr, die letzte Detektion bei KM 0,8 um 13:19 Uhr (siehe rote Linie in Abbildung 42). Der Aufbau des Stauendes erfolgte phasenweise linear, aufgrund der vielen Anschlussstellen in diesem Bereich teilweise aber auch nicht-linear.

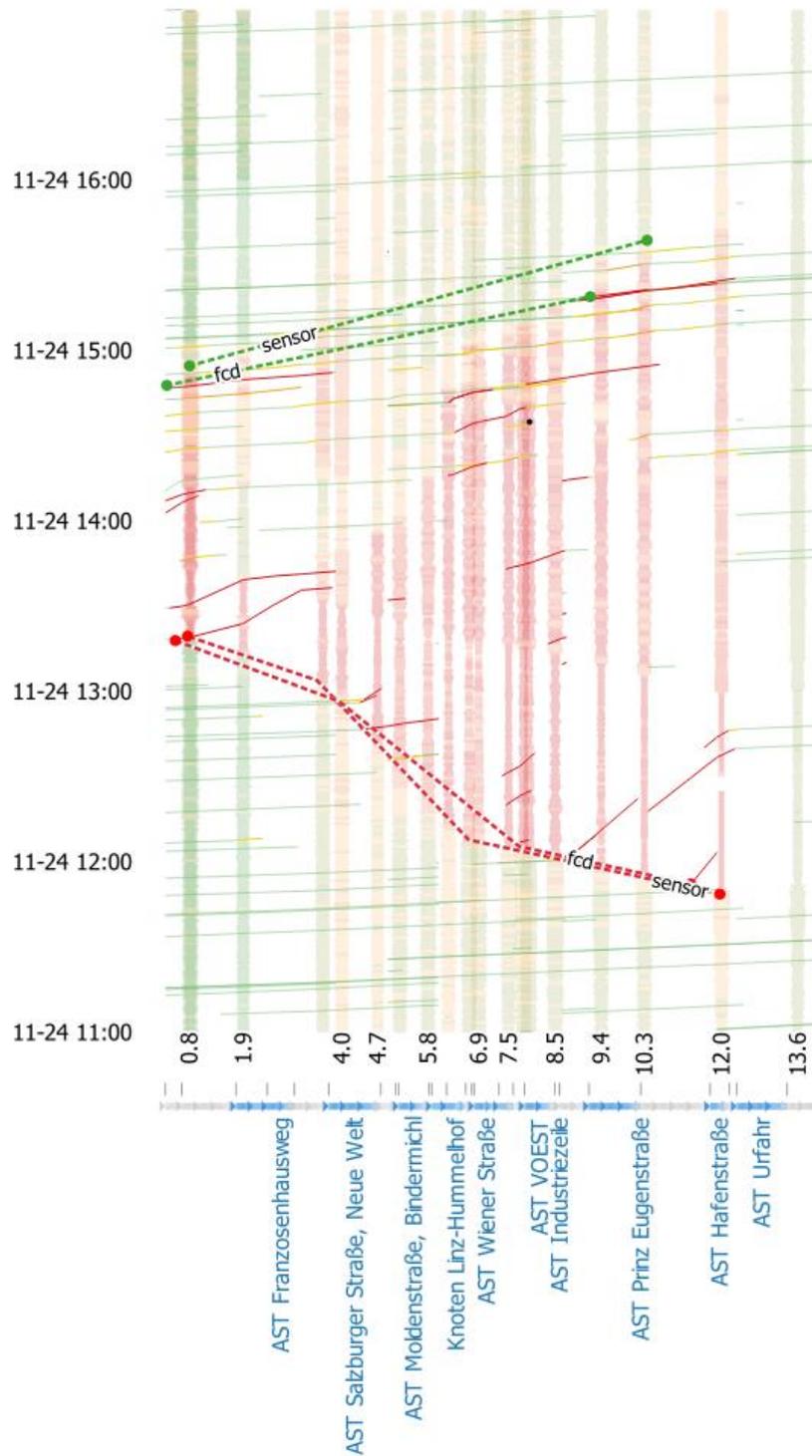


Abbildung 42: Weg-Zeit-Diagramm für die A7 mit Staubildung (rote, strichlierte Linien) und Stauauflösung (grüne, strichlierte Linien)

Methode 1a: Berechnung der Staubildungsdynamik anhand von FCD-Detektionen

Durchschnittliche Geschwindigkeit des Stauendes in Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{0,8 \text{ km} - 12,0 \text{ km}}{13:19 \text{ h} - 11:49 \text{ h}} = \frac{-11,2 \text{ km}}{1:30 \text{ h}}$ $= -7,47$
---	--

Aufgrund der hohen Dichte an Querschnittsmessungen entlang dieser Strecke wird für dieses Beispiel auch eine Berechnung anhand der Staudetektionen aus den Querschnittsdaten vorgenommen. Die erste Detektion des aufbauenden Stauendes erfolgte bei KM 12.0 (Anschlussstelle Urfahr) um 11:51 Uhr, die letzte Detektion bei KM 0,8 (Knoten Linz) um 13:20 Uhr (siehe rote Linie mit Beschriftung ‚sensor‘ in Abbildung 42).

Methode 1b: Berechnung der Lagedynamik durch Staudetektionen der Querschnittsmessungen

Geschwindigkeit des Stauendes in Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{0,8 \text{ km} - 12,0 \text{ km}}{13:20 \text{ h} - 11:51 \text{ h}} = \frac{-11,2 \text{ km}}{1:29 \text{ h}}$ $= -7,55$
---	--

Methode 2: Berechnung der Lagedynamik mit FCD-Daten und Querschnittsmessungen

FCD-Messung um 11:52:01 zwischen KM 11,3 und KM 11,8

FCD-Geschwindigkeit im Stau [km/h]	$v_a = 6,85$
------------------------------------	--------------

Querschnittsmessung 06:35 – 06:40 Uhr vor dem Stau bei KM 9,435

LKW-Anteil [%]	$p_{LKW} = 8,0\%$
----------------	-------------------

Geschwindigkeit vor Stau [km/h]	$v_b = 73,86$
---------------------------------	---------------

Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_b = 2954$
---------------------------------	--------------

Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_b = \frac{q_b}{v_b} = \frac{2954}{73,86} = 40$
----------------------------------	---

Geschwindigkeit des Stauendes

Verkehrsdichte im Stau (3 Spuren) [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = 206,45$
--	------------------------

Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a = 1414$
--------------------------------	--

Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} = \frac{1414 - 2954}{206 - 40} = \frac{-1540}{166}$ $= -9,28$
--------------------------------------	--

3.2.10.3 Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Anhand der Anzahl der FCD-Befahrungen sowie der Verkehrsstärke vor dem Stau kann nun der tatsächlich erreichte FCD-Durchdringungsgrad bestimmt werden. Für die Berechnungen

werden FCD-Befahrungen mit einer verifizierten Verzögerung am Stauende (<30 km/h) zwischen 12:00 und 13:00 Uhr herangezogen.

FCD-Durchdringungsgrad der Testdaten	
FCD-Verkehrsstärke [Kfz/h]	$q_{FCD} = 10$
Verkehrsstärke bei KM 0,8 [Kfz/h]	$q_b = 2954$
Durchdringungsgrad [%]	$p = \frac{q_{FCD}}{q_b} = \frac{10}{2954} = 0,34 \%$

Anhand der berechneten Stauausbreitungsgeschwindigkeit von -7,47 km/h sowie der Anzahl der FCD-Befahrungen ergibt sich nach dem stochastischen Modell folgende zeitliche und räumliche Genauigkeit (95% Wahrscheinlichkeit) der Stauende-Detektion.

Zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion	
Zeitliche Genauigkeit bei 10 Kfz/h [s]	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{10} = 1078$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -7,47 km/h [m]	$s = T * \frac{ v }{3,6} = 1078 * \frac{ -7,47 }{3,6} = 2238$

Um eine räumliche Genauigkeit des Stauendes von max. 500 Metern zu detektieren, wird folgender FCD-Durchdringungsgrad benötigt.

Berechneter FCD-Durchdringungsgrade bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit	
Verkehrsstärke am Stauende [Kfz/h]	$q = 2954$
Minuten, die das Stauende für 500 Meter benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right = \left \frac{500}{-7,47} * 0,06 \right = 4,0$ $= 4:00$
FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Kfz/h]	$q_{FCD} = -\ln(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{4,0} = 45$
Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{45}{2954} = 0,0165 = 1,5\%$

3.2.11 Stauereignis 9: A23 – Südosttangente

3.2.11.1 Beschreibung des Stauereignisses

Auf der A23 – Südosttangente tritt am 15.11.2017 zwischen 15:00 bis 19:00 eine Verkehrsüberlastung auf. Der Stau breitet sich zwischen der AST Hirschstetten und dem Knoten Kaisermühlen und weiter als stockender Verkehr bis zur Anschlussstelle Favoriten aus. Die Überlastung tritt sehr plötzlich auf und setzt sich sehr schnell fort. Die Situation löst sich aber ebenso schnell wieder auf. Folgende Verkehrsmeldung beschreibt das Ereignis:

- „A23 Südost Tangente: Vösendorf - Kagran Zwischen Autobahnknoten Inzersdorf-Süd und Autobahnknoten Kaisermühlen in beiden Richtungen zäher Verkehr“ (Quelle: spritvergleich.at 15.11.2017 – 18:26)

Die allgemeine Ausgangssituation auf der A23 ist sehr komplex. Es gibt insgesamt 8 Möglichkeiten von Zu- und Abflüssen des Verkehrs innerhalb des Staubereichs mit großen Verkehrsknotenpunkten. Im Staubereich ändert sich die Anzahl an Fahrspuren öfters. Von Osten kommend ist die Fahrbahn bis zum Knoten Kaisermühlen zweispurig, bis zur AST Handelskai dreispurig, bis zum Knoten Prater vierspurig, bis zur AST Gürtel Landstraße fünfspurig, danach wieder vierspurig und bis zur AST Favoriten dreispurig. Die Abbildung 43 zeigt die Situation um 17:00 Uhr während der maximalen Staubelastung mit den Messquerschnitte auf der A23 zwischen KM 17 und KM 4.

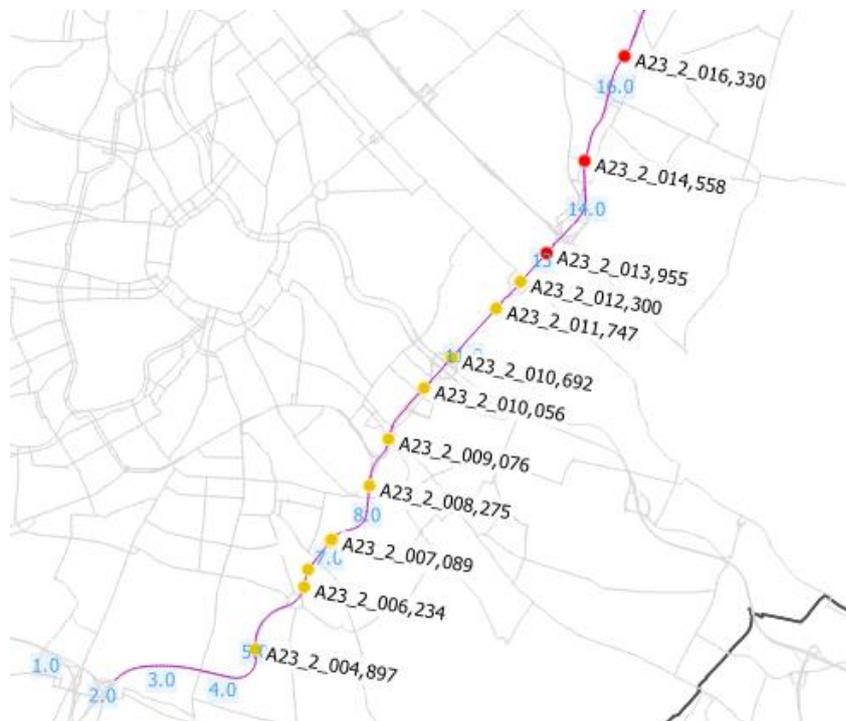


Abbildung 43: Umgebungskarte der A23 mit Verkehrssensoren (blau: vor Stau, rot: im Stau, gelb: stockender Verkehr, grün: nach Stau)

3.2.11.2 Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik der Staubildung

Für die Berechnung der Lagedynamik werden nach Methode 1 die ersten und letzten Stau-Detektionen der FC-Daten herangezogen (Geschwindigkeit < 30 km/h).

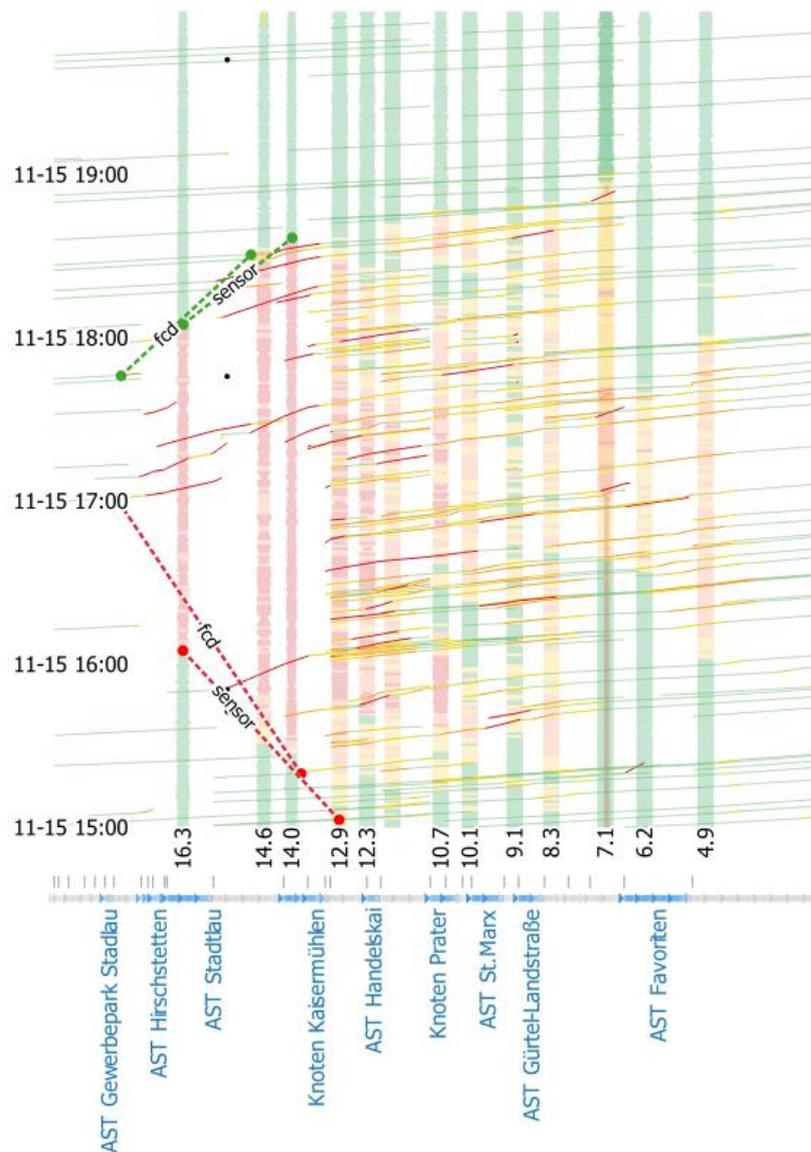


Abbildung 44: Weg-Zeit-Diagramm für die A23 mit Staubildung (rote, strichlierte Linien) und Stauauflösung (grüne, strichlierte Linien)

Die maximale Verkehrsdichte auf der A23 wird zwischen KM 13 (Knoten Kaisermühlen) und KM 5 (AST Favoriten) um 15:00 Uhr erreicht. Die hohe Verkehrsdichte macht den Verkehr extrem störanfällig und jede weitere Einmündung an den Anschlussstellen stört den Verkehrsfluss. Dadurch gerät der Verkehr ins Stocken. Dies passiert fast zur gleichen Zeit auf der gesamten Strecke. Von der A22 einmündender Verkehr ist der Auslöser für einen Stau am Knoten Kaisermühlen, wobei sich der Rückstau bis zur Anschlussstelle Hirschstetten entwickelt. Ab 19:00 mündet weniger Verkehr ein und der stockende Verkehr kann sich an mehreren Stellen, vor allem im Bereich von Abfahrten, gleichzeitig auflösen.

Methode 1a: Berechnung der Staubildungsdynamik anhand von FCD-Detektionen

Durchschnittliche Geschwindigkeit des Stauendes gegen Kilometrierungsrichtung [km/h]

$$v = \frac{-(17,8 \text{ km} - 13,7 \text{ km})}{17:01 \text{ h} - 15:19 \text{ h}} = \frac{-4,1 \text{ km}}{1:42 \text{ h}} = -2,41$$

Verkehrsdichte bei ausgewählten Sensoren

Die Abbildung 45 zeigt die Abweichung der Verkehrsdichte (k) und der maximalen Verkehrsdichte (k_{max}) in Prozent vor bzw. zu Beginn der Stausituation zwischen 15:00 und 16:00 Uhr

KM 6,3: Nach Abfahrt AST Favoriten (geringere Verkehrsdichte)

Die Messquerschnitte bei KM 9,1 und 10,1 haben eine geringere Verkehrsdichte wegen abgehender Spuren und sind deshalb nicht in der Grafik ersichtlich. Zwischen 15:45 und 16:00 ist die Verkehrsdichte höher als die theoretisch mögliche Verkehrsdichte ($k > k_{max}$).

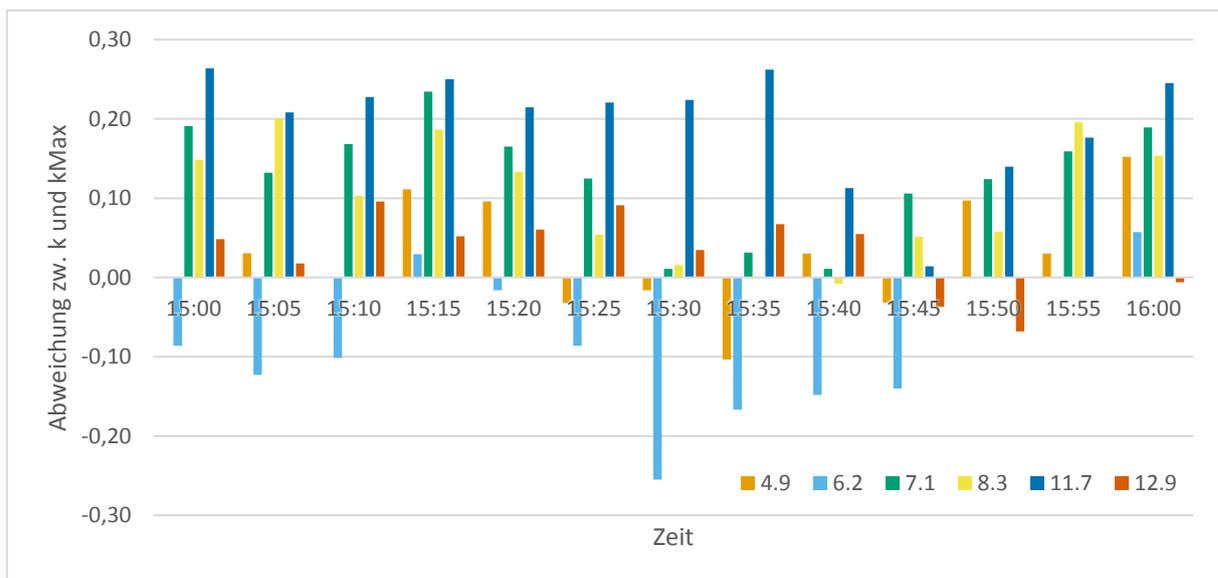


Abbildung 45: Abweichung der Verkehrsdichte k von der maximalen Verkehrsdichte k_{max}

3.2.11.3 Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Für dieses Beispiel fehlen die Messwerte von einem Sensor vor dem Stauende. Daher können die FCD-Durchdringungsgrade nur nach dem Stauereignis berechnet werden.

Anhand der Anzahl der FCD-Befahrungen sowie der Verkehrsstärke vor dem Stau kann nun der tatsächlich erreichte FCD-Durchdringungsgrad bestimmt werden. Für die Berechnungen werden FCD-Befahrungen mit einer verifizierten Verzögerung am Stauende ($<30 \text{ km/h}$) zwischen 15:00 und 16:00 Uhr herangezogen.

FCD-Durchdringungsgrad der Testdaten	
FCD-Verkehrsstärke [Kfz/h]	$q_{FCD} = 14$
Verkehrsstärke bei KM 7,1 [Kfz/h]	$q_b = 6971$
Durchdringungsgrad [%]	$p = \frac{q_{FCD}}{q_b} = \frac{14}{6971} = 0,20 \%$

Anhand der berechneten Stauausbreitungsgeschwindigkeit von -2,41 km/h sowie der Anzahl der FCD-Befahrungen ergibt sich nach dem stochastischen Modell folgende zeitliche und räumliche Genauigkeit (95% Wahrscheinlichkeit) der Stauende-Detektion.

Zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion	
Zeitliche Genauigkeit bei 14 Kfz/h [s]	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{14} = 770$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -2,41 km/h [m]	$s = T * \frac{ v }{3,6} = 770 * \frac{ -2,41 }{3,6} = 516$

Um eine räumliche Genauigkeit des Stauendes von max. 500 Metern zu detektieren, wird folgender FCD-Durchdringungsgrad benötigt.

Berechneter FCD-Durchdringungsgrade bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit	
Verkehrsstärke am Stauende [Kfz/h]	$q = 6971$
Minuten, die das Stauende für 500 Meter benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right = \left \frac{500}{-2,41} * 0,06 \right = 12,45$ $= 12:27$
FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Kfz/h]	$q_{FCD} = -\ln(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{12,45} = 14,4$
Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{14,4}{6971} = 0,0021 = 0,21 \%$

3.2.12 Interpretation und Schlussfolgerungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der 9 Beispiele interpretiert und daraus Schlussfolgerungen abgeleitet.

3.2.12.1 Interpretation der Berechnung der Lagedynamik bei Staubildung

Nachfolgende Tabelle 19 listet die auf Basis der 4 vorgeschlagenen Methoden berechnete Lagedynamik bei der Staubildung für 8 Beispiele auf. Nicht für alle Beispiele konnten alle Methoden angewandt werden, da beispielsweise einzelne Werte fehlten bzw. als nicht zuverlässig eingestuft wurden oder die Methode zu gänzlich unplausiblen Werten führte. Für die A23 konnte aufgrund der Komplexität der Situation und der beinahe gleichzeitigen

Entstehung des Staus über den gesamten Abschnitt die Lagedynamik der Staubildung nicht berechnet werden.

Nr.	Methode 1a	Methode 1b	Methode 2	Methode 3
1: A1	-6,40		-9,77	
2: A2	-17,87 -9,33	-18,99	-23,76	
3: S1	-12,73		-10,79	-10,81
4: A4	-3,92		-4,34	
5: A12	-7,11		-7,57	-10,28
6: A10	-9,83	-13,23	-7,82	
7: A22	-9,47		-15,95	
8: A7	-7,47		-9,28	
9: A23	-2,41			

Tabelle 19: Lagedynamik der Staubildung vw [km/h] berechnet anhand der 4 unterschiedlichen Methoden für 9 Stauereignisse

Aus Tabelle 19 wird ersichtlich, dass die Stauereignisse in den 9 Beispielen unterschiedliche Lagedynamiken der Staubildung aufweisen. Die Lagedynamik der Staubildung wird vor allem durch die Verkehrsdichte im Stau sowie die nachkommende sowie abfließende Verkehrsstärke beeinflusst⁹. Die Verkehrsdichte im Stau wiederum ergibt sich durch die Geschwindigkeit im Stau. Je nach Stauereignis liegen natürlich unterschiedliche Staugeschwindigkeiten sowie Verkehrsstärken vor, wodurch sich unterschiedliche Geschwindigkeiten der Staubildung ergeben. Um die Lagegenauigkeit des Stauendes nun möglichst genau bestimmen zu können, ist eine möglichst genaue Erfassung der notwendigen Parameter (Staugeschwindigkeit, Verkehrsstärke) notwendig. Jede Erfassungsmethode hat Vor- und Nachteile. Mit FCD ist eine exakte Lagebestimmung des Stauendes zu einem Zeitpunkt t möglich, allerdings müssen in bestimmten zeitlichen Abständen immer wieder FCD-Fahrzeuge nachkommen, um die Lage des Stauendes wieder neu bestimmen zu können. Auch die Staugeschwindigkeit lässt sich mit

⁹ <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Chapter-8.-Shock-wave-analysis.pdf>

FCD gut detektieren, da die Messung nicht querschnittsbezogen an einem Messquerschnitt erfolgt, sondern streckenbezogen, was einer deutlich aussagekräftigeren Messung entspricht, vor allem wenn sich die Staugeschwindigkeit im Staubereich ändert. Eine Herausforderung besteht allerdings in fahrstreifenbezogen unterschiedlichen Staugeschwindigkeiten, die beispielsweise durch einen höheren LKW-Anteil entstehen können. Dadurch kann die Messung der Staugeschwindigkeit beeinflusst werden.

Querschnittsmessungen haben den Vorteil, dass sie alle Fahrzeuge messen, die den Querschnitt passieren. Bzgl. Verkehrsstärke bilden diese Messungen die Grundlage. Wichtig dabei ist, dass es zumindest eine Messung vor dem Staubereich gibt, die möglichst zuverlässig die nachkommende Verkehrsstärke detektiert. Für die Detektion der Staugeschwindigkeit weisen die Querschnittsmessungen den Nachteil auf, dass sie nur an definierten Messquerschnitten messen. Bei einer homogenen Staugeschwindigkeit ist das kein Problem, allerdings kann es auch vorkommen, dass die Querschnittsmessungen aufgrund von Anschlussstellen beeinflusst ist, wodurch sich für unterschiedliche Stauabschnitte möglicherweise unterschiedliche Staugeschwindigkeiten ergeben. Bei einer ungünstigen Position des Messquerschnitts können die gemessenen Geschwindigkeitswerte verzerrt werden. Ein Vorteil der Querschnittsmessung ist allerdings, dass die Fahrstreifen getrennt gemessen werden können.

Im Vergleich der Ergebnisse fällt auf, dass die Unterschiede zwischen den Berechnungsmethoden je nach Beispiel unterschiedliche variieren. Die ähnlichsten Ergebnisse zwischen den Methoden 1, 2 und 3 wurden für das Stauereignis 3 (S1) erzielt. Gute Ergebnisse zwischen den Methoden 1 und 2 wurden auch für die A4 bzw. die A12 erzielt. Es lassen sich aus den Ergebnissen keine allgemeingültigen Aussagen ableiten, allerdings können folgende Folgerungen abgeleitet werden:

- **Querschnittsmessungen im Stau** liefern potentiell für den Stau nicht repräsentative Geschwindigkeitswerte. Das ist vermutlich durch starke Schwankungen der Staugeschwindigkeit am Querschnitt bedingt. Das betrifft alle Stau-Beispiele.
- Eine Änderung der **Anzahl der Fahrspuren** im Staubereich (Abbiege-Spuren, Einbiege-Spuren) hat einen direkten Einfluss auf die Berechnung der maximal möglichen Verkehrsdichte und Verkehrsstärke (z.B. bei Stauereignis 9: A23 bei Knoten Prater, Abschnitt 3.2.11).
- Die **FC-Daten** können **Lücken** aufweisen (z.B. im Tunnel) und dadurch kann auch die Detektion des Stauendes lückenhaft sein. Auch ein höherer Durchdringungsgrad schafft hier keine Lösung (Stauereignis 7: A22 beim Kaisermühlentunnel, Abschnitt

3.2.9).

- Die **FC-Daten** weisen aufgrund verschiedener Erfassungsmethoden eine **unterschiedliche Qualität** auf. Dadurch kann die berechnete Geschwindigkeit im Stau von der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit abweichen.
- Viele **Einmündungen und Abfahrten** im Staubereich erschweren die Berechnung der Geschwindigkeit des Stauendes. Verlassen beispielsweise im Staubereich viele Fahrzeuge die Autobahn, ist die Fahrzeugstärke vor dem Stau potentiell zu hoch (Stauereignis 1: A1 und Stauereignis 7: A22).
- Ist **keine Querschnittsmessung** vor dem Stau vorhanden, kann der nachkommende Verkehr nicht gemessen und somit auch die Veränderung der Lage des Stauendes nicht berechnet werden (Stauereignis 9: A23).
- Desto mehr **Fahrspuren**, desto schlechter lässt sich die Ausbreitung eines Staus prognostizieren. Die Homogenität nimmt ab. Während bei einer Fahrspur die Ausbreitung klar ist, spielt bei fünf Fahrspuren der Kontext (in 2 km biegen die rechten beiden Spuren ab) eine wesentliche Rolle und das Stauende kann sich beispielsweise über 3 von 5 Spuren mit einer anderen Geschwindigkeit ausbreiten wie auf den anderen beiden Spuren.
- Der **LKW-Anteil** beeinflusst ebenfalls die Homogenität des Staus. Bei langsameren Geschwindigkeiten steigt der LKW-Anteil auf der rechten Spur, bzw. die meisten PKWs wechseln auf die anderen Spuren. Dadurch wird die Stauausbreitung auf der rechten Spur zum Sonderfall. Betrachtet man einen Querschnitt, wird somit der potentielle Fehler größer.
- Bei Staus, die nicht wegen einer Verkehrsüberlastung entstehen (z.B. Unfälle, etc.), ist das **Stauende** schärfer abgegrenzt. Innerhalb kürzester Zeit bremsen Fahrzeuge von 100 km/h auf 0 km/h ab. Die Auflösung dieser Staus erfolgt dann in der Regel von der Wurzel zum Ende, da die Fahrzeuge wieder schneller abfließen.
- Bei Verkehr stark an der **Belastungsgrenze** ($k \geq k_{max}$) kann durch eine kleine Störung bereits ein Stau entstehen. Wird der Verkehr nicht gestört, kann es aber auch „funktionieren“.
- **Zu- und Abfahrten** bringen einen Unsicherheitsfaktor in die Berechnung mit ein, da vor allem während einer Stausituation gerne Ausweichrouten benutzt werden.

Besonderheiten bei Querschnittsmessungen:

- Bei langsam fließendem Verkehr nimmt die Zuverlässigkeit der Querschnittsmessungen stark ab. Mögliche Ursachen könnten sein:

- Wegen Bildung der Rettungsgasse werden die Sensoren nicht mehr zentral durchfahren und zählen somit doppelt oder gar nicht.
- Die Geschwindigkeit kann teilweise nicht mehr gemessen werden bzw. weist starke Abweichungen auf.
- Die Zählung wird fehleranfälliger, da eine kleinere Verkehrsstärke anfälliger gegenüber Messfehlern wird (kleinste Fehlereinheit ist ein Fahrzeug und ein Fahrzeug bei insgesamt 5 Fahrzeugen sind 20% Fehler. Ein Fahrzeug bei 500 Fahrzeugen sind nur noch 0,2 % Fehler).
- Bei Verkehrsstillstand liefern die Sensoren keine Werte.

Besonderheiten bei FC-Daten:

- Die FC-Daten repräsentieren keine Grundgesamtheit, sondern nur eine Stichprobe. Die Repräsentativität der Stichprobe kann in der Regel nicht bestimmt werden.
- In der Stichprobe befinden sich in der Regel auch LKWs, welche überwiegend die rechte Spur befahren. LKWs wechseln in einer Stausituation seltener ihre Spur. Bei Grenzübergängen stauen sich die LKWs unabhängig von den PKWs da es eine eigene LKW Abfertigung gibt. Die detektierten Stopps von LKWs sind somit möglicherweise nicht für alle Fahrspuren repräsentativ.
- Im Falle von stehendem Verkehr wird die GSP-Trajektorie möglicherweise unterbrochen. Das kann beispielsweise im Stillstandsfall auftreten, wenn die Fahrzeuglenkerinnen bzw. -lenker den Motor abstellen.
- Im ungünstigsten Fall ist die Verkehrsstärke vor dem Stau gering. Außerdem breitet sich bei einer Totalsperre der Stau schneller aus und die Detektionsrate ist geringer, da bei einer geringeren Verkehrsstärke ein höherer (relativer) Durchdringungsgrad benötigt wird.
- Im günstigen Fall ist die Verkehrsstärke vor dem Stau hoch, der Stau baut sich durch die Verkehrsüberlastung langsam auf und es gibt wenige Ein- und Abfahrten.

3.2.12.2 Interpretation der FCD-Durchdringungsgrade

Tabelle 21 listet die FCD-Durchdringungsgrade der Beispiele sowie die räumliche und zeitliche Genauigkeit der Detektion des Stauendes in Meter bzw. Sekunden. Die angegebene räumliche Genauigkeit bedeutet, dass sich mit 95% Wahrscheinlichkeit die Lage des Stauendes zwischen dem Eintreffen des nächsten FCD-Fahrzeugs nicht weiter als S_{FCD} verändert hat und dass nicht mehr als T_{FCD} Sekunden vergehen.

	D_{FCD} [%]	S_{FCD} [m]	T_{FCD} [s]
1: A1	1,01 %	533 m	300 s
2: A2	1,21 %	892 m	180 s
3: S1	0,87 %	1.412 m	399 s
4: A4	2,24 %	206 m	189 s
5: A12	0,75 %	1.331 m	674 s
6: A10	0,60 %	3.628 m	1.348 s
7: A22	0,32 %	2.182 m	829 s
8: A7	0,34 %	2.238 m	1.078 s
9: A23	0,20 %	516 m	770 s

Tabelle 20: Durchdringungsgrade DFCD und die räumliche und zeitliche Genauigkeit der Detektion SFCD bzw. TFCD des Stauendes in Meter bzw. Sekunden für 9 ausgewählte Stauereignisse berechnet anhand der Testdaten

Die höchste räumliche Genauigkeit wird beim Stauereignis auf der A4 erreicht. Bei einem Durchdringungsgrade von 2,24% verändert sich das Stauende mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% maximal um 206 Meter bis zum nächsten Eintreffen eines FCD-Fahrzeugs. Die schlechteste räumliche Genauigkeit wird beim Stauereignis auf der A10 erreicht. Bei einem Durchdringungsgrad von nur 0,60% verändert sich das Stauende mit 95% Wahrscheinlichkeit bei diesem Beispiel um maximal 3,6 Kilometer bis zum Eintreffen des nächsten FCD-Fahrzeugs.

Tabelle 21 listet die benötigten FCD-Durchdringungsgrade für eine räumliche Genauigkeit der Detektion des Stauendes von 250, 500 und 1000 Metern für die berechneten Geschwindigkeiten des Stauendes v_w der Stauereignisse.

Im Vergleich mit den tatsächlichen FCD-Durchdringungsgraden ist ersichtlich, dass für alle Stauereignisse außer jenes auf der A4 die benötigten FCD-Durchdringungsgrade für eine Genauigkeit von 250 bzw. 500 Metern nicht erfüllt werden. Für die Stauereignisse auf der A1 bzw. A23 werden die benötigten FCD-Durchdringungsgrade für 500 Meter Genauigkeit

annähernd erfüllt. Für das Stauereignis auf der A2 wird der benötigte FCD-Durchdringungsgrad für 1000 Meter Genauigkeit erfüllt.

Tabelle 21 zeigt, dass die notwendigen FCD-Durchdringungsgrade stark vom jeweiligen Stauereignis abhängen. Die höchsten FCD-Durchdringungsgrade sind für das Stauereignis auf der A10 notwendig. Bei diesem Beispiel führt eine schlechte Kombination von hoher Lagedynamik mit einer Staugeschwindigkeit von 0 km/h (aufgrund einer Totalsperre) zu den hohen notwendigen FCD-Durchdringungsgraden. Bei allen anderen Stauereignissen zeigt sich, dass sich mit einem FCD-Durchdringungsgrad von max. 2,5% eine räumliche Genauigkeit von zumindest 500 Metern erreichen lässt. Mit einem FCD-Durchdringungsgrad von knapp über einem Prozent lassen sich zumindest 1000 Meter Genauigkeit erreichen.

	v_w [km/h]	D_{250} [%]	D_{500} [%]	D_{1000} [%]
1: A1	-6,40	3,19 %	1,60 %	0,80 %
2: A2	-17,87 -9,33	4,30 %	2,15 %	1,08 %
3: S1	-12,73	4,94 %	2,47 %	1,24 %
4: A4	-3,92	1,98 %	0,99 %	0,49 %
5: A12	-7,11	3,99 %	1,99 %	1,00 %
6: A10	-9,83	9,85 %	4,92 %	2,46 %
7: A22	-9,47	2,80 %	1,40 %	0,70 %
8: A7	-7,47	3,03 %	1,50 %	0,76 %
9: A23	-2,41	0,41 %	0,21 %	0,10 %

Tabelle 21: Benötigte FCD-Durchdringungsgrade für die Detektion des Stauendes mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% und einer räumlichen Genauigkeit von 250, 500 und 1000 m

3.2.12.3 Schlussfolgerungen zur Berechnung der Lagedynamik bei Stauereignissen

Zusammenfassend können drei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Berechnung der Lagedynamik bei Stauereignissen empfohlen werden:

1. Ideale Vorgehensweise
2. Vorgehensweise bei Überlastung mit vielen Auf- und Abfahrten
3. Vorgehensweise bei Totalsperre

Ideale Vorgehensweise

Voraussetzungen:

- Wenige oder keine Auf- und Abfahrten im Staugebiet und zwischen den Sensoren.
- Guter Durchdringungsgrad, um das Stauende mit der geforderten Zuverlässigkeit zu erkennen.
- Ein Messquerschnitt vor dem Stau ist gegeben.
- Zwischen dem Messquerschnitt und dem Stauende sollte möglichst keine Zu- oder Abfahrt sein.
- Ein Messquerschnitt nach dem Stau ist notwendig, um die Auflösung des Staus zu detektieren.

Umsetzungen:

1. Detektion des Stauendes aus FC-Daten/Stillstands-Erkennung
2. Annahme: Dichte im Stau = k_{max} (auch wenn Sensor vorhanden, da Sensorwerte im Stau unzuverlässig sind, siehe Details zu Sensordaten)
3. Notieren der nachkommenden Verkehrsstärke q
4. Berechnen der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Stauendes aus der Schockwellenformel.
5. Nächste Detektion des Stauendes aus FC-Daten oder an einem Sensorquerschnitt.
6. Korrektur der Ausbreitungsgeschwindigkeit, Annahme Ausbreitungsgeschwindigkeit ist linear. Demnach: Ausbreitungsgeschwindigkeit ist Abstand zwischen räumlicher Abstand zwischen Detektion 2 und Detektion 1 dividiert durch zeitlichen Abstand zwischen Detektion 1 und Detektion 2.
7. Wenn q davor $< q$ im Stau dann baut sich der Stau von hinten ab. Oder bei q danach $> q$ im Stau baut sich der Stau von vorne ab.

Vorgehensweise bei Überlastung mit vielen Auf- und Abfahrten

In diesem Fall baut sich der Stau gleichzeitig an mehreren Stellen auf und auf einer Strecke von mehreren Kilometern bildet sich fast aus dem Nichts ein Stau. Ebenso schnell löst sich dieser wieder auf. Dies ist dadurch bedingt, dass die Verkehrsdichte sich am Maximum ($k \geq k_{max}$) befindet. Nun ist das kein Problem, außer der Verkehrsfluss wird gestört. Das ist wiederum abhängig von dem Verkehr an den Einmündungen. Zu Berufsverkehrszeiten kann es passieren, dass an mehreren Einmündungen fast gleichzeitig der Verkehrsfluss auf der Hauptstrecke gestört wird und so der komplette Verkehr zum Erliegen kommt. Hier gibt es eigentlich keine Stauwurzel oder kein Stauende im klassischen Sinne. Somit kann nur anhand

von k_{\max} und eventuell dem einfließenden Verkehr (wenn detektiert) prognostiziert werden, dass demnächst ein Stau auftreten könnte.

Voraussetzungen:

- Viele Messquerschnitte auf der Staustrecke.
- Messquerschnitte von Auf- und Abfahrten.

Umsetzung:

- Verwenden der Verkehrsstärke (q) und der Geschwindigkeit (v) an den Messquerschnitten, um die aktuelle Verkehrsdichte (k) zu berechnen.
- Vergleich von Verkehrsdichte (k) mit k_{\max} , berechnet aus der Geschwindigkeit und des theoretischen Fahrzeugabstands sowie der LKW-Dichte.
- Beobachtung der Verkehrsstärke an den Einmündungen.
- Nimmt die Verkehrsstärke zu, ist ein Stau wahrscheinlich.
- Nimmt die Verkehrsstärke an den Ausfahrten zu, kann sich der Stau ebenso schnell wieder auflösen.

Vorgehensweise bei Totalsperre

Voraussetzungen:

- Wenige bzw. keine Auf- und Abfahrten im Stauegebiet und zwischen den verwendeten Sensoren.
- Extrem hoher Durchdringungsgrad oder Messquerschnitte in regelmäßigen Abständen (z.B. 1-2 km)
- Messquerschnitt vor dem Stau. Zwischen Messquerschnitt und Stauende sollte möglichst keine Zu- oder Abfahrt sein.

Umsetzung

- Detektion des Stauendes aus FC-Daten oder durch eine Verkehrsmeldung aus Notruf etc.
- Annahme: Dichte im Stau = k_{\max} ; Geschwindigkeit im Stau = 0; Verkehrsstärke im Stau = 0
- Ausbreitungsgeschwindigkeit ist allein vom nachkommenden Verkehr (Verkehrsstärke) abhängig. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird mit der Schockwellenformel berechnet.
- Beim nächsten Messquerschnitt oder bei einer FC-Detektion die Ausbreitungsgeschwindigkeit korrigiert (Annahme linear). Sind die Messquerschnitte in akzeptablen Abständen, sollten nur diese verwendet werden, da die Daten dennoch homogener sind als die FC-Daten und somit das Ergebnis

zuverlässiger. Prinzipiell sind Geschwindigkeitsabfälle an Messquerschnitten zuverlässiger, da sie der Durchschnitt aller Fahrzeuge darstellen und nicht ein einzelnes Fahrzeug.

3.3 Österreichweite Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden

Während im letzten Abschnitt nur einzelne Stauereignisse und die dadurch betroffenen Autobahnabschnitte analysiert wurden, stellt sich die Frage, wie sich die FCD-Durchdringungsgrade für andere Autobahnabschnitte mit Messquerschnitten verhalten. Da für diese Messquerschnitte keine Staudaten vorliegen, wurden von der ASFINAG durchschnittliche Jahreszählwerte (JDTV) zur Verfügung gestellt, um die durchschnittliche Verkehrsstärke an den Messquerschnitten zu erhalten. Neben den durchschnittlichen Verkehrsstärken der Dauerzählstellen wurden auch die LKW-Anteile sowie die Anzahl der Fahrspuren von der ASFINAG zur Verfügung gestellt. Alle anderen für die Berechnungen notwendigen Parameter können in der Excel-Liste konfiguriert werden. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 22 aufgelistet.

Parameter	Quelle	Standardwert
Verkehrsstärke (Maximum) q_a	ASFINAG PDF	
Verkehrsstärke (Q30) q_b	ASFINAG PDF	
LKW-Anteil p_{LKW}	ASFINAG PDF	
Fahrspuren n	ASFINAG PDF + manuelle Nachbearbeitung	
Geschwindigkeit im Stau v_a	Variable	10 km/h
Geschwindigkeit bei freier Fahrt v_b	Variable	100 km/h
Durchschnittliche Länge PKW l_{PKW}	Variable	5
Durchschnittliche Länge LKW l_{LKW}	Variable	16,5
Räumliche Genauigkeit s	Variable	500 m
Alpha α	Variable	0.95

Tabelle 22: Parameter für die österreichweite Darstellung der Durchdringungsgrade in QGIS

Zusätzlich wurde im Open Source-Programm QGIS¹⁰ auch ein Projekt erstellt, mit dem sich die Verkehrsstärken und die dazugehörigen FCD-Durchdringungsgrade auf einer Österreich-Karte geografisch darstellen lassen. Analog zum Excel werden jene Parameterwerte, die von

¹⁰ <https://www.qgis.org/de/site/>

der ASFINAG zur Verfügung gestellt wurden verwendet und alle frei wählbaren Parameter werden in den QGIS Projekteigenschaften im Bereich ‚Variablen‘ festgelegt.

Da die Anzahl der Fahrspuren im ASFINAG-Bericht nur für beide Richtungen angegeben wird, war eine manuelle Nachbearbeitung notwendig, um die Anzahl der Fahrspuren pro Richtung zu ermitteln. Grundsätzlich werden dabei die Fahrspuren auf beide Richtungen aufgeteilt. Wenn die Gesamtanzahl eine gerade Zahl ist, werden gleich viele Fahrspuren pro Richtung festgelegt. Wenn die Gesamtanzahl eine ungerade Zahl ist, muss in anderen Datensätzen (Luftbildern, GIP) überprüft werden, wie viele Fahrspuren pro Richtung verlaufen. In einem weiteren Schritt werden die ermittelten Werte noch validiert (Prüfung, wenn bei nachfolgenden Querschnitten eine abweichende Anzahl von Fahrspuren vorliegt).

Folgende Formeln werden für die Berechnungen verwendet:

Formeln für die Berechnungen	
Maximale Verkehrsdichte (Theoretisch)	
Abstand zwischen Fahrzeugen im Stau [m]	$d_a = f(v_a) = \begin{cases} v_a * 0,55 & v_a * 0,55 > 2 \\ 2 & \text{sonst} \end{cases}$
Abstand zwischen Fahrzeugen vor Stau [m]	$d_b = f(v_b) = \begin{cases} v_b * 0,55 & v_b * 0,55 > 2 \\ 2 & \text{sonst} \end{cases}$
Verkehrsdichte im Stau [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = \frac{1000 * n}{(l_{PKW} + d_a) * (1 - p_{LKW}) + (l_{LKW} + d_a) * p_{LKW}}$
Verkehrsdichte vor Stau [Kfz/km]	$k_{a_{max}} = \frac{1000 * n}{(l_{PKW} + d_b) * (1 - p_{LKW}) + (l_{LKW} + d_b) * p_{LKW}}$
Durchdringungsgrad	
Verkehrsstärke vor Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{b_{max}} * v_b$
Verkehrsstärke im Stau [Kfz/h]	$q_{a_{max}} = k_{a_{max}} * v_a$
Geschwindigkeit des Stauendes [km/h]	$v_w = \frac{q_{a_{max}} - q_b}{k_{a_{max}} - k_b} \quad v_w = \frac{q_a - q_b}{k_{a_{max}} - k_b}$
Minuten, die das Stauende für festgelegte Strecke (s) benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right $
FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Fahrzeuge]	$q_{FCD} = -\log(1 - \alpha) * 60 * \frac{1}{t}$
Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q_b}$

q_{FCD} ... FCD-Stärke, q_b ... Verkehrsstärke vor Stau

In der Karte (Abbildung 46) werden die Durchdringungsgrade gemeinsam mit der Richtung und der Verkehrsstärke dargestellt. Die Richtung wird dabei in eckigen Klammern gezeigt und ist entweder 1 (gleiche Richtung wie Autobahnkilometrierung) oder 2 (gegen Autobahnkilometrierung). In der Abbildung 46 bezieht sich die Richtung 1 der A1 – Westautobahn auf die Richtungsfahrbahn Salzburg bzw. Walsertal, die Richtung 2 bezieht sich auf Richtung Wien.

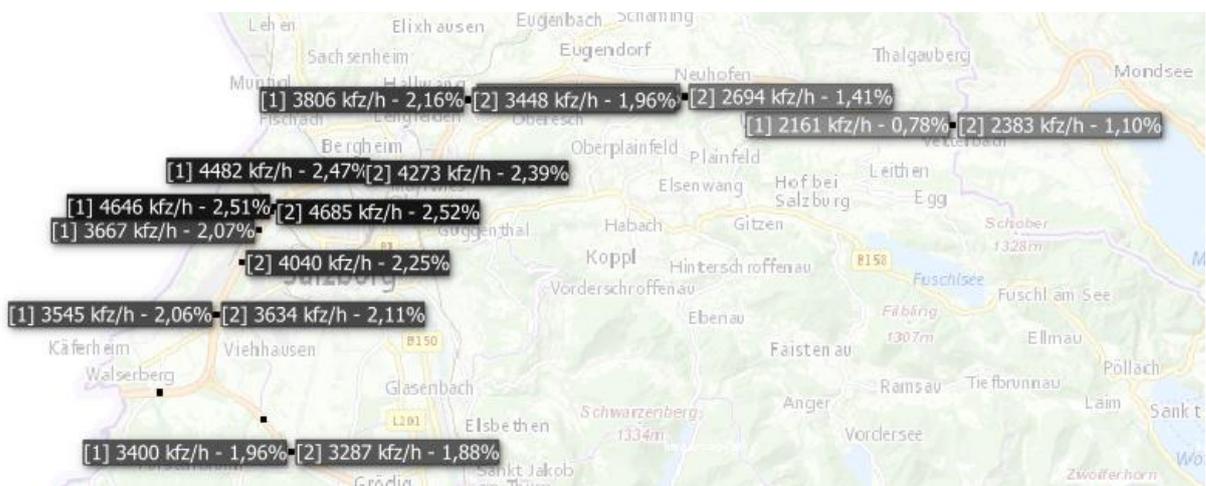


Abbildung 46: Ausschnitt der Karte rund um Salzburg mit Verkehrsstärken (Q30) und berechneten Durchdringungsgraden in %

In der Excel-Liste (Abbildung 47) können alle Berechnungsschritte abgelesen und Zwischen-Variablen einfach verändert werden. Hier gibt es zwei verschiedene Berechnungsmethoden in zwei Tabellenblättern. In der Tabelle ‚Durchdringungsgrade‘ wird für die maximale Verkehrsstärke ein theoretischer Wert berechnet (aus Anzahl Fahrspuren, Länge PKW und LKW sowie Sicherheitsabstand bei festgelegter Geschwindigkeit im Stau). In der Tabelle ‚Durchdringungsgrade_qMax‘ wird für die maximale Verkehrsstärke der von der ASFINAG gelieferte Wert verwendet.



Geschwindigkeit im Stau	10	Abstand zw. Fahrzeugen im Stau	3.1
Geschwindigkeit Freifluss	100	Abstand zw. Fahrzeugen Freifluss	30
Räumliche Genauigkeit	500	Durchschnittliche Länge PKW	5
Genauigkeit	0.95	Durchschnittliche Länge LKW	16.5



Zählstelle Zst.-Nr.	Zst.-Name	Verkehrsstärke Q30-RZ	LKW-% pKW	Fahrspuren L, R, S	Verkehrsdichte KFZ/km			Verkehrsrastrate KFZ/h		Stauende km/h		Stauende 500 m [min]		FCD-Distanz		Durchdringungsgrad		
					l, Stau-RZ	l, Stau-RZ	l, Stau-RZ	g, Stau-RZ	g, Stau-RZ	ww, RZ	ww, RZ	l, RZ	l, RZ	qFCD, RZ	qFCD, RZ	DS, RZ	DS, RZ	
935 Pressbaum	3345	1733	3.0	2	184.42	184.42	33.14	33.14	1844.17	1844.17	-1.93	0.38	13.38	20.80	11.59	3.33	0.73%	0.20%
383 Attilengbach	3341	3400	16.4	4	322.95	242.21	64.83	48.48	3229.45	2422.09	-0.43	-0.05	89.47	3.94	2.39	30.24	0.08%	0.89%
403 Sionlebach	3380	0.0	0.0	3	285.71	285.71	50.00	50.00	2857.14	2857.14		-2.22		13.52		13.29		0.39%
409 St.Pölten/A1	3317	3409	15.1	3	245.17	245.17	48.59	48.59	2451.68	2451.68	-4.40	-4.87	6.82	6.16	26.37	28.18	0.80%	0.86%
415 St. Pölten Süd/A1	3345	3245	17.9	3	238.88	238.88	48.34	48.34	2388.82	2388.82	-6.07	-4.49	4.94	6.88	36.36	26.92	1.03%	0.83%
423 Pöppendorf	3339	3379	17.1	3	240.64	240.64	48.41	48.41	2406.45	2406.45	-4.28	-5.06	6.18	9.93	29.07	30.21	0.87%	0.90%
961 Pöppendorf	3289	3416	17.4	3	239.88	239.88	48.38	48.38	2398.81	2398.81	-4.69	-3.30	6.38	3.66	28.12	31.78	0.83%	0.83%
431 Ybbs	3218	3279	17.7	3	239.32	239.32	48.36	48.36	2393.20	2393.20	-4.32	-4.64	6.93	6.47	23.88	27.79	0.80%	0.85%
977 Neumarkt An Der	3200	3261	18.7	3	237.14	237.14	48.27	48.27	2371.45	2371.45	-4.39	-4.71	6.84	6.37	26.28	28.22	0.82%	0.87%
983 Seisenegg	3162	3193	19.2	3	236.07	236.07	48.23	48.23	2360.72	2360.72	-4.27	-4.43	7.03	6.77	23.56	26.50	0.81%	0.83%
439 Ludwigsdorf	3100	3200	18.6	3	237.36	237.36	48.28	48.28	2373.61	2373.61	-3.84	-4.37	7.81	6.88	23.02	26.19	0.74%	0.82%
991 Oed	3114	3316	19.1	3	236.29	236.29	48.23	48.23	2362.96	2362.96	-3.99	-5.07	7.51	5.92	23.93	30.37	0.77%	0.92%
999 Endholz	3129	3236	18.9	3	236.71	236.71	48.23	48.23	2367.14	2367.14	-4.17	-4.88	7.19	6.19	24.88	29.21	0.79%	0.89%
450 Kötting	3124	3386	17.6	3	239.54	239.54	48.37	48.37	2395.40	2395.40	-3.81	-3.18	7.87	5.79	22.83	31.00	0.73%	0.92%
978 AStSteyr	3309	3557	17.0	3	240.87	240.87	48.42	48.42	2408.67	2408.67	-4.68	-5.97	6.41	3.03	28.03	33.75	0.83%	1.01%
467 Raffelstetten	4197	4272	16.0	3	243.11	243.11	48.51	48.51	2431.12	2431.12	-9.07	-9.46	3.31	3.17	34.37	56.68	1.30%	1.33%
412 Heid	4719	4745	19.8	3	243.57	243.57	48.53	48.53	2435.66	2435.66	-11.89	-11.84	2.57	2.53	70.02	70.94	1.49%	1.50%
110 Traun	4899	4952	15.1	4	226.38	226.38	64.78	64.78	2263.84	2263.84	-6.24	-6.44	4.81	4.86	37.38	39.59	0.76%	0.78%
483 Oberndorf	2929	3008	11.8	3	193.02	193.02	48.89	48.89	1930.19	1930.19	-0.53	-1.24	36.26	12.81	3.19	14.09	0.12%	0.47%
110 Seefeld	3087	3336	12.4	3	251.55	251.55	48.84	48.84	2515.51	2515.51	-2.82	-4.05	10.64	7.41	16.89	24.23	0.53%	0.78%
128 Vorchdorf	2797	3097	12.4	2	167.70	167.70	32.36	32.36	1677.01	1677.01	-8.29	-10.51	3.62	2.86	48.65	62.86	1.78%	2.03%
233 Ohnsdorf	2854	2964	12.3	2	167.86	167.86	32.37	32.37	1678.63	1678.63	-7.21	-9.30	4.16	3.16	43.69	56.92	1.63%	1.82%
259 Unterrammann	1913	2271	13.2	2	166.42	166.42	32.51	32.51	1664.17	1664.17	-1.86	-4.53	16.14	6.62	11.13	27.19	0.58%	1.20%
137 Kemating	2037	2217	12.3	3	251.31	167.24	48.83	32.55	2513.09	1673.39	2.25	-4.16	13.32	7.21	13.30	24.93	0.66%	1.11%
144 Haid	1953	2121	12.7	2	167.22	167.22	32.54	32.54	1672.17	1672.17	-0.09	-3.22	14.29	9.00	12.49	19.97	0.64%	0.94%
285 Sonnenleiten	2161	2383	11.4	2	169.33	169.33	32.62	32.62	1693.34	1693.34	-3.42	-5.04	8.77	5.85	20.30	30.22	0.93%	1.27%
272 Unzing	2679	2694	10.4	2	171.00	171.00	32.68	32.68	1709.99	1709.99	-6.98	-7.11	4.30	4.22	41.80	42.62	1.56%	1.58%
492 Mallwag	3306	3448	9.3	2	172.53	172.53	32.74	32.74	1725.25	1725.25	-14.89	-12.32	2.02	2.43	89.18	73.84	2.34%	2.14%
91 HAdS Bergheim We	4482	4273	9.8	3	258.02	258.02	49.08	49.08	2580.20	2580.20	-9.10	-9.10	3.30	3.70	54.93	48.54	1.22%	1.14%
305 AStKietheim	3667	4040	9.1	3	259.82	259.82	49.14	49.14	2598.19	2598.19	-3.07	-6.84	3.91	4.38	30.40	41.00	0.83%	1.01%
236 AStLederling	4646	4653	9.3	3	259.79	259.79	49.11	49.11	2597.69	2597.69	-6.82	-10.00	3.06	3.00	59.51	59.91	1.27%	1.28%
277 Weiz	3543	3614	10.4	3	256.50	256.50	49.02	49.02	2564.98	2564.98	-4.72	-5.15	6.33	3.82	28.30	30.87	0.80%	0.85%

Abbildung 47: Screenshot der Excel-Liste zur Berechnung der Durchdringungsgrade

3.4 Fahrzeitvergleich FC-Daten und Bluetooth-Daten

Um die Qualität der FCD-basierten Fahrzeiten zu evaluieren, stellte die ASFINAG Testdaten vom November 2017 aus der Bluetooth-basierten Fahrzeitmessung am A1 Grenzübergang Walsberg zur Verfügung. Die Fahrzeitmessung besteht aus drei Sensor-Standorten im Bereich des Knotens Salzburg. Aufgabe dieser Analyse ist es, die FC-basierten Fahrzeiten mit den Bluetooth-basierten Fahrzeiten zu vergleichen.

Die Bluetooth-Daten wurden mit den in Tabelle 23 aufgelisteten Attributen geliefert. Die Einzel-Befahrungen zwischen den Sensoren wurden aus den Daten extrahiert und zu 1-Minuten-Intervallen aggregiert. Das Attribut „count“ gibt die Anzahl der Befahrungen im Zeitintervall zwischen den Sensoren an und die angegebene Reisezeit ist ein durchschnittlicher Wert der jeweiligen Befahrungen.

Da im Rahmen des Projekts nicht geklärt werden konnte, ob sich das Attribut "time" auf die erste oder letzte Sichtung eines Fahrzeugs am Sensor bezieht, wurde angenommen, dass es sich jeweils um die erste Sichtung handelt.

Attribut	Datentyp	Beschreibung
Time	Timestamp	Uhrzeit bei Start oder Ziel der Befahrung
Section_origin	Text	Start-Sensor
Section_destination	Text	Ziel-Sensor

Traveltime	Real	Gesamte Fahrzeit in Sekunden
Count	Integer	Anzahl der Befahrungen in einer Minute
Traveltime_free	Real	Fahrzeit bei freier Fahrt
Traveltime_loss	Real	Verzögerungszeit in Sekunden

Tabelle 23: Attribute mit Datentyp und Beschreibung der Bluetooth-Fahrzeit-Daten

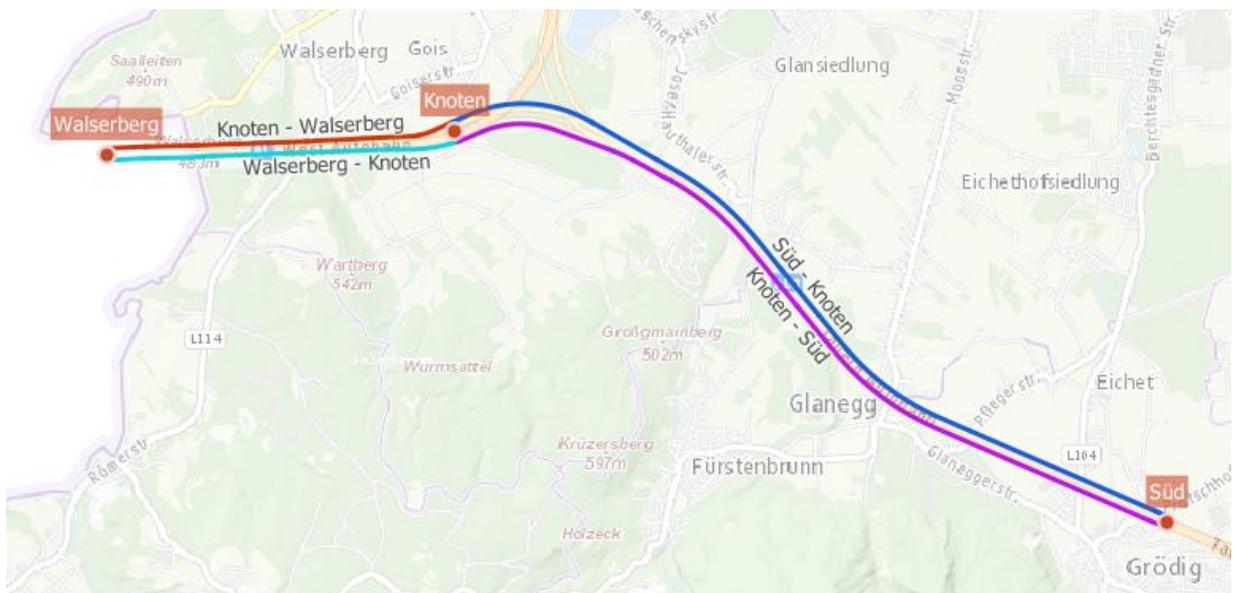


Abbildung 48: Abschnitte der A10 und A1 für die Bluetooth-Reisezeit-Analyse

In Abbildung 48 sind die Abschnitte der A10 und A1 dargestellt, auf denen die Bluetooth-Fahrzeitmessung erfolgt. Der erste Bluetooth-Sensor befindet sich auf der A10 nach der AST Salzburg Süd. Der nächste befindet sich direkt am Knoten Salzburg zwischen A1 und A10. Der dritte Sensor befindet sich nach der Grenze am Walsberg. Daraus ergeben sich (berücksichtigt man beide Richtungen) 4 Messabschnitte, die in Abbildung 48 farblich gekennzeichnet sind. Zusätzlich können auch noch Messungen über die gesamte Distanz (zwischen Sensor 1 und 3) als eigener Messabschnitt bezeichnet werden.

Die für den Vergleich verwendeten FC-Daten stammen aus einem Flottenmix mit unbekannter Fahrzeug-Zusammensetzung. Nur Daten auf den ausgewählten Straßenabschnitten zwischen den drei Sensoren werden berücksichtigt. FCD-Befahrungen, die beide Teilabschnitte umfassen, werden auch für die gesamte Strecke von Salzburg Süd bis zur Grenze berücksichtigt.

3.4.1 Fahrzeitvergleich mit FC-Daten

Für die Analysen wurden beispielhaft FC-Daten vom 1.11.2017 (Feiertag Allerheiligen) sowie vom 7.11.2017 (Mittwoch, normaler Arbeitstag) ausgewählt. Die folgenden Abbildungen zeigen den Fahrzeitvergleich der Bluetooth-Messungen mit den FCD-Befahrungen vom Sensor 1 auf der A10 nach der AST Salzburg Süd bis zum Sensor 3 nach der Grenze. Um die Datenmenge bei den Analysen übersichtlicher zu gestalten, wurden die Reisezeiten zu 15-Minuten-Zeitintervallen aggregiert. Während im ersten Beispiel (1.11., Abbildung 49) eine hohe Grenzwarzeit von bis zu 2 Stunden erreicht wird, läuft der Verkehr im zweiten Beispiel (Mittwoch, 08.11., Abbildung 50) mit einer kleinen Ausnahme am Abend relativ flüssig ohne nennenswerte Verzögerungen. Die FCD-Fahrzeiten werden nur für jene Zeitintervalle dargestellt, in denen zumindest eine Befahrung stattgefunden hat. In den restlichen Zeitintervallen hat keine Befahrung stattgefunden.

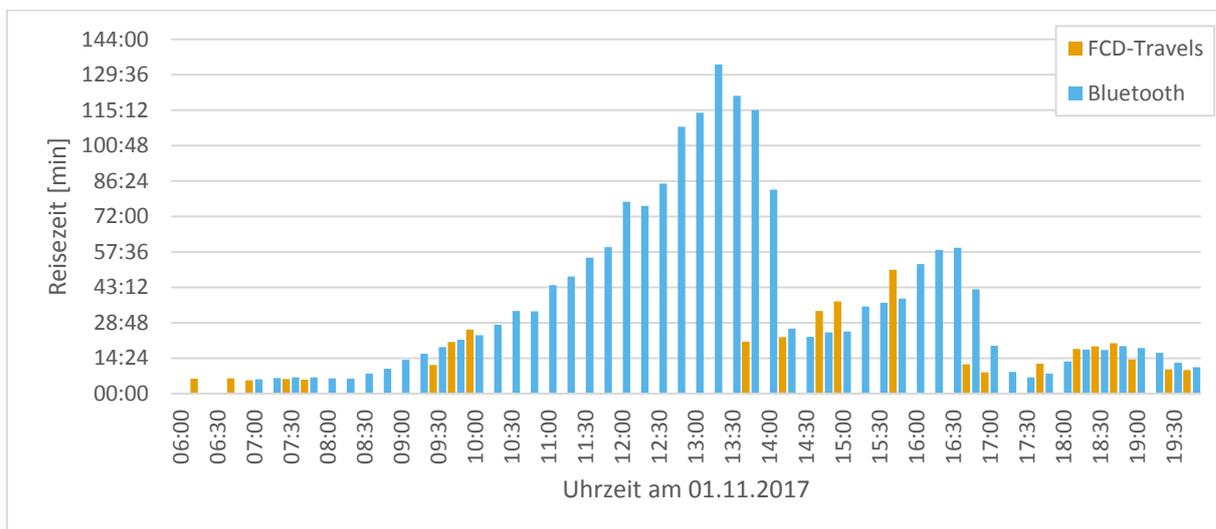


Abbildung 49: Vergleich der Fahrzeiten am 01.11.2017 zwischen FCD-Befahrungen und Bluetooth-Messungen; Gesamte Strecke von Salzburg Süd bis zur Grenze am Walsberg

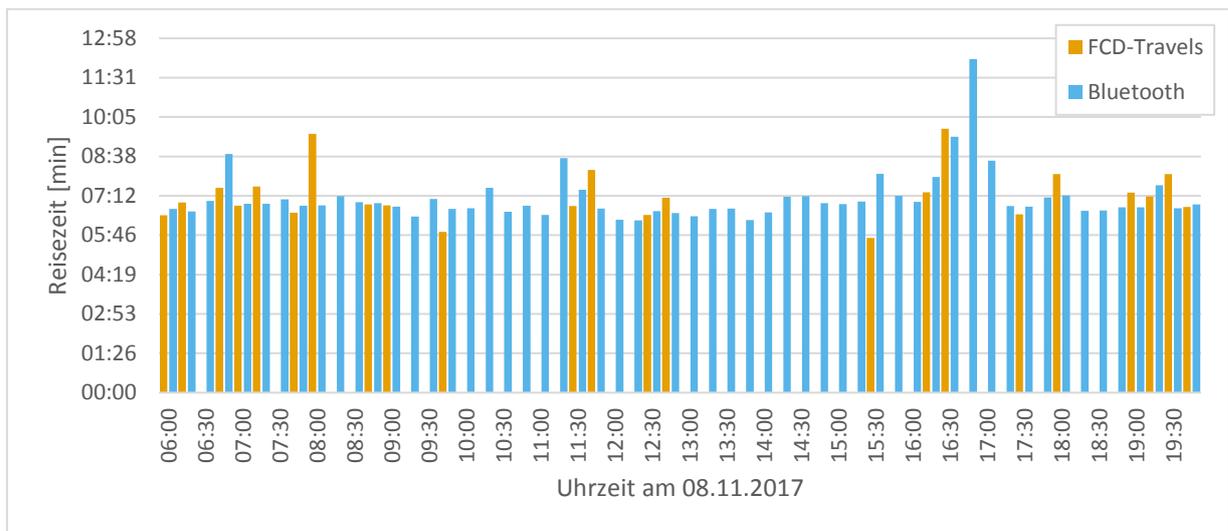


Abbildung 50: Vergleich der Reisezeiten am 08.11.2017 zwischen FCD-Befahrungen und Bluetooth-Messungen; Gesamte Strecke von Salzburg Süd bis zur Grenze am Walserberg

Die beiden Diagramme zeigen, dass die unterschiedlichen Arten der Fahrzeitmessung in vielen Fällen zu ähnlichen Ergebnissen führen. Am Höhepunkt der Wartezeit am 1.11. (ca. 13:15) zeigt sich, dass die FCD-Fahrzeiten viel früher wieder eine geringere Fahrzeit messen (ca. 20 Minuten ab 13:30), während die Bluetooth-Fahrzeiten bis 13:45 noch über 2 Stunden und bis 14:00 noch über eine Stunde Fahrzeit messen. Die Ursache für diese Verzögerung ist unbekannt, könnte aber mit einer Glättung der Daten zu tun haben. Auch bei der kleineren Nachmittagsspitze um 16:30 ist ein ähnlicher Effekt zu beobachten.

Außerdem ist zu beobachten, dass nur in verhältnismäßig wenigen Zeitintervallen FCD-Befahrungen vorliegen. Die Ursache dafür ist einerseits, dass für eine vollständige Fahrzeitmessung eine vollständige FCD-Befahrung von Salzburg Süd bis über die Grenze am Walserberg vorliegen muss. Da sich der Sensor am Walserberg schon deutlich nach der Grenze in Deutschland befindet (660 Meter) und einige FCD-Befahrungen an der Grenze enden, liegen weniger FC-Daten für die gesamte Strecke vor. Außerdem verlassen viele Fahrzeuge die A10 zur A1 in Richtung Wien, wie aus den Zeit-Weg-Diagrammen (Abbildung 51) ersichtlich wird. Diese Fahrzeuge können für die Fahrzeitmessung der gesamten Strecke bis zum Grenzübergang Walserberg nicht herangezogen werden. Gleichzeitig kommen auch einige Fahrzeuge von der A1, die erst vom Sensor 2 erfasst werden und daher auch nicht für die gesamte Strecke herangezogen werden können.

Abbildung 51 zeigt Zeit-Weg-Diagramme für den 1.11.2017 und den 7.11.2017 zwischen der A10 von der AST Salzburg Süd bis zur A1 Grenze Walserberg. In den Zeit-Weg-Diagrammen

werden die Bluetooth-Messungen und die FCD-Messungen gemeinsam dargestellt. Eine allgemeine Beschreibung der Weg-Zeit-Diagramme gibt es in Abbildung 25.

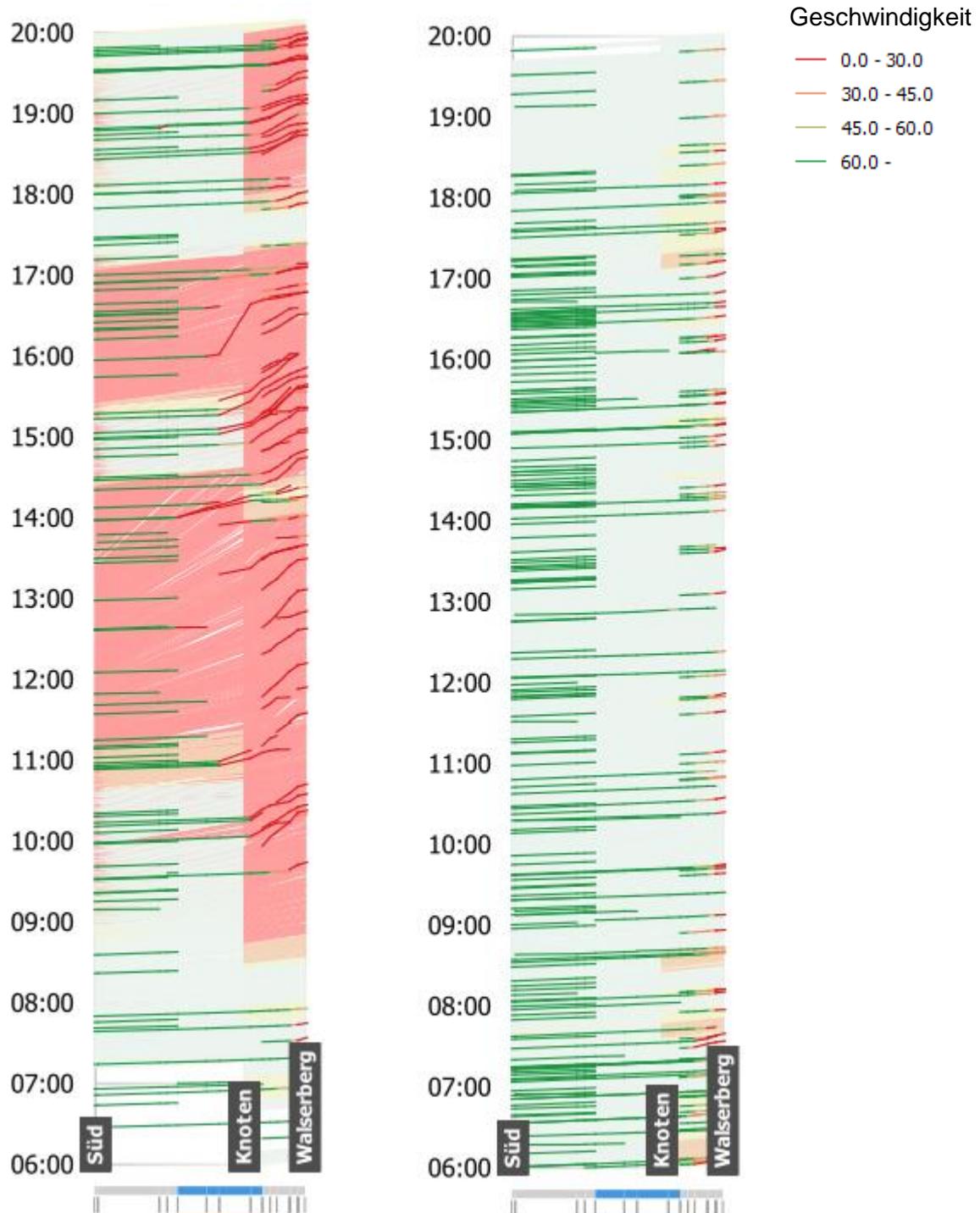


Abbildung 51: Zeit-Weg-Diagramm für den 01.11.2017 (links) und den 07.11.2017 (rechts); die helleren Linien im Hintergrund zeigen die Bluetooth-Messungen, die dunkleren Linien im Vordergrund zeigen die FCD-Messungen; die dicke graue Linie ganz unten zeigt die

Straßensegmente der GIP, der blaue Abschnitt den Knoten Salzburg

3.4.2 Berechnung der FCD-Durchdringungsgrade

Für den aufbauenden Stau zwischen Knoten und Walsertberg am 01.11.2017 zwischen 09:30 und 11:00 (siehe rot strichlierte Linie in Abbildung 52) können der tatsächliche und benötigte Durchdringungsgrad berechnet werden. Der tatsächlich erreichte FCD-Durchdringungsgrad wird anhand der Anzahl der FCD-Befahrungen sowie der Verkehrsstärke bestimmt. Dazu werden FCD-Befahrungen mit einer verifizierten Verzögerung am Stauende (<30 km/h) am 01.11.2017 zwischen 09:30 und 11:00 Uhr herangezogen.

Zuerst wird die Staubildungsdynamik sowie der tatsächliche FCD-Durchdringungsgrad berechnet. Die Kilometer-Werte bei der Staubildungsdynamik beziehen sich auf die Bluetooth-Abschnitte und nicht auf die Autobahn-Kilometrierung.

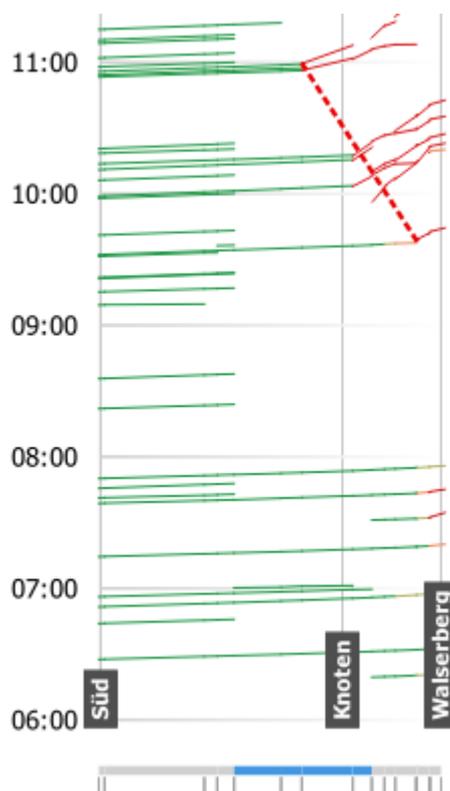


Abbildung 52: Ausschnitt des Zeit-Weg-Diagramms für den 01.11.2017; nur FCD; rot strichlierte Linie zeigt das Ende des aufbauenden Staus

Methode 1a: Berechnung der Staubildungsdynamik anhand von FCD-Detektionen	
Geschwindigkeit des Stauendes in Kilometrierungsrichtung [km/h]	$v = \frac{6,85 \text{ km} - 8,56 \text{ km}}{10:17 \text{ h} - 9:38 \text{ h}}$ $= \frac{-1,71 \text{ km}}{0:39 \text{ h}}$ $= -2,63$
FCD-Durchdringungsgrad der Testdaten	
FCD-Verkehrsstärke [Kfz/h]	$q_{FCD} = 4$
Verkehrsstärke bei KM 299,8 [Kfz/h]	$q_b = 691$
Durchdringungsgrad [%]	$p = \frac{q_{FCD}}{q_b} = \frac{4}{691} = 0,58 \%$

Anhand der berechneten Stauausbreitungsgeschwindigkeit von -2,63 km/h sowie der Anzahl der FCD-Befahrungen ergibt sich nach dem stochastischen Modell folgende zeitliche und räumliche Genauigkeit (95% Wahrscheinlichkeit) der Stauende-Detektion.

Zeitliche und räumliche Genauigkeit der Stauende-Detektion	
Zeitliche Genauigkeit bei 4 Kfz/h [s]	$T = -\ln(1 - 0,95) * \frac{3600}{4} = 2696 \text{ s}$
Räumliche Genauigkeit bei einer Geschwindigkeit des Stauendes von -2,63 km/h [m]	$s = T * \frac{ v }{3,6} = 2696 * \frac{ -2,63 }{3,6} = 1970 \text{ m}$

Um eine räumliche Genauigkeit des Stauendes von max. 500 Metern zu detektieren, wird folgender FCD-Durchdringungsgrad benötigt.

Berechneter FCD-Durchdringungsgrad bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit	
Verkehrsstärke am Stauende (KM 299,8) [Kfz/h]	$v_c = 691$
Minuten, die das Stauende für 500 Meter benötigt [min]	$t = \left \frac{s}{v_w} * 0,06 \right = \left \frac{500}{-2,63} * 0,06 \right = 11,40$ $= 11:24 \text{ min}$
FCD-Stärke nach dem stochastischen Modell [Kfz/h]	$q_{FCD} = -\ln(1 - 0,95) * 60 * \frac{1}{11,40} = 16$
FCD-Durchdringungsgrad [%]	$D_{FCD} = \frac{q_{FCD}}{q} = \frac{16}{691} = 0,023 = 2,3 \%$

3.4.3 Interpretation und Schlussfolgerungen

Aus den Analysen wird ersichtlich, dass sich sowohl die Bluetooth-Messungen als auch die FCD-Messungen für die Berechnung von Grenzwarezeiten eignen. Die Fahrzeiten passen, sofern FCD-Befahrungen vorliegen, in den meisten Fällen gut zusammen. Zu hinterfragen ist die relativ hohe Latenz der Bluetooth-Messungen nach Staubbildung. Hier zeigen die FCD-Fahrzeiten eine deutlich schnellere Anpassung gegenüber den Bluetooth-Reisezeiten. Bei den Bluetooth-Messungen gibt es insofern Verbesserungspotential, indem noch zusätzliche Messpunkte installiert werden sollten. Aufgrund von nur 3 Bluetooth-Messstationen werden jene Fahrzeuge, die die A10 zur A1 in Richtung Wien verlassen nur in Salzburg Süd und danach nicht mehr erfasst. Daher wird die gesamte Verzögerung von Salzburg Süd bis zur Messstation 2 auf der A1 auf den gesamten Abschnitt der A10 aufgeteilt. Bei Staubbildung zurück vom Grenzübergang Walsenberg entsteht in der Verkehrslageabbildung dadurch der Eindruck, dass der gesamte Abschnitt bis zurück nach Salzburg Süd gestaut ist. Um realistischere Ergebnisse zu erzielen, wäre eine weitere Bluetooth-Messstelle auf der A10 vor dem Knoten Salzburg hilfreich (bevor sich die Fahrbahnen teilen). So könnten Fahrzeuge, die von dort zur A1 Richtung Wien fahren berücksichtigt werden und der Rückstau am Knoten Salzburg könnte besser eingegrenzt werden (die Verzögerung teilt sich dann nur auf diesen Abschnitt auf und nicht zurück bis Salzburg Süd). Außerdem wird die Installation eines weiteren Sensors auf der A1 Westautobahn vor dem Knoten Salzburg (vor Teilung der Fahrbahnen) empfohlen. Beide Sensorstandorte sind in der Abbildung 54 eingezeichnet.



Abbildung 53: Handlungsempfehlung zur Installation von zwei weiteren Bluetooth-Sensoren (blau) als Ergänzung der bestehenden Sensorik (braun) am Knoten Salzburg

Hinsichtlich der FCD-Fahrzeitmessungen kann festgehalten werden, dass diese akkurat erfolgen, sofern die Fahrzeuge den gesamten Abschnitt durchfahren. Allerdings ist aus den

Weg-Zeit-Diagrammen ersichtlich, dass viele FCD-Fahrzeuge die A10 zur A1 in Richtung Wien verlassen bzw. von der A1 aus Wien kommen und daher nur den Staubereich auf der A1 detektieren. Daher gibt es für die gesamte Strecke von Salzburg Süd bis zum Grenzübergang Walserberg nur wenige FCD-Befahrungen. Im Weg-Zeit-Diagramm wird auch ersichtlich, dass die FCD-Fahrzeuge vor allem bei größerer Staubildung die A10 zur A1 in Richtung Wien verlassen. Hier ist unklar, was mit diesen Fahrzeugen passiert, ob sie entweder über die B1 zum Bundesstraßengrenzübergang Walserberg ausweichen oder die Route über die A1 und B155 Richtung Freilassing nehmen. Jedenfalls zeigen die Weg-Zeit-Diagrammen auch klar die Vorteile der FCD-basierten Verkehrsinformation. Aufgrund der Tatsache, dass bei FCD die Messung kontinuierlich und nicht nur an Messquerschnitten erfolgt, kann das Stauende jeweils mit der durch den Durchdringungsgrad möglichen räumlichen Genauigkeit detektiert werden. Dadurch kann auch der Staubereich klar abgegrenzt werden. Bei der Bluetooth-basiertem Fahrzeitmessung erfolgt die Messung immer zwischen den Messquerschnitten, wodurch bei Staubildung dazwischen immer der gesamte Messabschnitt als „gestaut“ dargestellt wird. Die Verlustzeit teilt sich ebenfalls immer auf den gesamten Messabschnitt auf und nicht nur auf den gestauten Bereich. Daher ist zu empfehlen, die Bluetooth Messstationen in kürzeren räumlichen Entfernungen zu platzieren, da dadurch die räumliche Genauigkeit der Messungen erhöht werden kann. Vor allem sollten auch Messungen vor und nach Autobahnknoten erfolgen, um die ab- bzw. zufließenden Fahrzeuge zu detektieren.

3.5 Analyse „FCD-Latenzzeiten“

Im Arbeitspaket 2 „Theorie und Modellbildung“ wurde der zeitliche Qualitätsparameter QP1 „Aktualität“ festgelegt. Der Qualitätsparameter „Aktualität“ beschreibt, wieviel Zeit von der Erfassung eines Ereignisses (z.B. Stillstands-Detektion bzw. Stau-Detektion) minimal bzw. maximal vergeht, bis die entsprechende Verkehrsinformation aus den FC-Daten generiert werden kann. Um diesen Parameter bestimmen zu können, spielen unterschiedliche Latenzzeiten eine Rolle.

- **Detektionslatenz (L_d):** Als Detektionslatenz wird jene Latenzzeit bezeichnet, die in der Realität benötigt wird, um ein Ereignis detektieren zu können. Möchte man beispielsweise ein Stauereignis (Definition der ASFINAG: Geschwindigkeit für mind. 200 Meter \leq 30 km/h) detektieren, bei dem sich die Fahrzeuge mit einer Staugeschwindigkeit von 10 km/h bewegen, dann benötigt ein Fahrzeug für 200 Meter mind. 72 Sekunden. Berücksichtigt man keine anderen Latenzzeiten, dann ergibt sich eine minimale Detektionslatenz von 72 Sekunden. In der Datenverarbeitung wird dieser

Wert allerdings nicht erreicht werden, da verschiedene andere Latenzzeiten zu berücksichtigen sind, die die Latenzzeit erhöhen und damit die Aktualität senken. Es sind dies die Erfassungs-, Übertragungs- und Verarbeitungslatenz.

- **Erfassungslatenz (L_a):** Als Erfassungslatenz wird jene Latenzzeit bezeichnet, die durch das Erfassungsintervall entsteht. Wird beispielsweise nur alle 30 Sekunden ein GPS-Datenpunkt erfasst, dann beträgt die Erfassungslatenz zumindest 30 Sekunden. Möchte man das oben erwähnte Stauereignis detektieren, dann sind bei einem Erfassungsintervall von 30 Sekunden zumindest 3 Datenpunkte notwendig, wodurch sich eine minimale Erfassungslatenz von 90 Sekunden ergibt. Werden die GPS-Daten beispielsweise im Sekundenintervall erfasst, dann ist die Erfassungslatenz maximal 1 Sekunde.
- **Übertragungslatenz (L_t):** Als Übertragungslatenz wird jene Latenzzeit bezeichnet, die durch das Übertragungsintervall entsteht. Werden die erfassten Daten beispielsweise nur alle 30 Sekunden übertragen, so beträgt das Alter eines GPS-Datenpunkts bei Übertragung zwischen 30 und 0 Sekunden. Anzumerken ist, dass sich die Erfassungs- und die Übertragungslatenz nicht addieren. Generell gilt, dass das Übertragungsintervall immer höher als das Erfassungsintervall sein muss, denn sonst ergibt eine Übertragung keinen Sinn. Daher ist die Übertragungslatenz der bestimmende Faktor und die Erfassungslatenz zu vernachlässigen. Gleichzeitig macht es auch Sinn, das Übertragungsintervall an die Detektionslatenz anzupassen, da eine zu häufige Übertragung sinnlos ist (die 72 Sekunden im obigen Beispiel können ohnehin nicht unterschritten werden) und noch dazu wird das FCD-System bei häufiger Übertragung stärker belastet. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass für die Detektion des obigen Stauereignisses in der Regel mehrere Pakete übertragen werden müssen (z.B. 3 Pakete bei einem Übertragungsintervall von 30 Sekunden) und bei manchen Paketen eine zeitliche Verzögerung in der Erkennung des Stauereignisses auftreten kann (beispielsweise wenn das Ereignis bereits nach 72 Sekunden detektiert werden könnte, die Detektion aufgrund des Übertragungsintervalls von 30 Sekunden aber 90 Sekunden dauert (wodurch im besten Fall eine Verzögerung von 18 Sekunden, im schlechtesten von 30 Sekunden entsteht). Bei einem Übertragungsintervall von 15 Sekunden wäre die Verzögerung im besten Fall nur 3 Sekunden, im schlechtesten 15 Sekunden.
- **Verarbeitungslatenz (L_p):** Als Verarbeitungslatenz wird jene Latenzzeit bezeichnet, die bei der Verarbeitung der Daten im FCD-System entsteht. Die Verarbeitungslatenz kann zwar optimiert werden, allerdings wird sie immer auftreten und muss für die Bestimmung der Aktualität zumindest beim letzten Paket auch berücksichtigt werden.

Anzumerken ist, dass die Verarbeitungszeit im FCD-System auch noch je Subsystem analysiert werden könnte, dies ist jedoch im Rahmen dieses Projekts nicht erfolgt.

3.5.1 Beispiel: Bestmögliche Aktualität der Staudetektion

Es wird ein Stauereignis mit mind. 200 Metern Länge und einer Staugeschwindigkeit von 30 oder weniger km/h angenommen (Definitionen der ASFINAG). Aus der obigen Definition geht hervor, dass neben der Detektionszeit vor allem die Übertragungszeit und die Verarbeitungszeit einen Einfluss auf die Aktualität haben. Daher wird die bestmögliche Aktualität (A_b) nachfolgender Methode berechnet:

$$(1) L_t > L_d: TA_b = L_t + L_p$$

$$(2) L_t < L_d: TA_b = \left\lceil \frac{L_d}{L_t} \right\rceil * L_t + L_p$$

Falls die Übertragungszeit größer als die Detektionszeit ist, berechnet sich die Aktualität aus der Übertragungs- und der Verarbeitungszeit. Falls die Übertragungszeit geringer als die Detektionszeit ist, dann müssen so viele Pakete übertragen werden, bis tatsächlich alle Daten ins FCD-System übertragen wurden. In diesem Fall berechnet sich die Übertragungszeit aus der Übertragungszeit pro Paket mal die notwendige Anzahl an Paketen + Verarbeitungszeit (es zählt nur die Verarbeitungszeit des letzten Pakets, da vorher immer auf neue Daten gewartet wird und daher die Verarbeitungszeit keine Rolle spielt).

Abbildung 54 gibt einen Überblick, wie sich die bestmögliche Aktualität für verschiedene Staugeschwindigkeiten (5, 10, 15, 20, 25 und 30 km/h) bzw. unterschiedliche Übertragungsintervalle (15, 30 und 60 Sekunden) für die Detektion eines 200 Meter Staubereichs im besten Fall verhält (die Verarbeitungszeit wird mit 19 Sekunden angenommen, was der derzeitigen durchschnittlichen Verarbeitungszeit des FCD-Systems entspricht). Bester Fall bedeutet, dass die Daten mit einer minimalen Anzahl an Paketen übertragen werden können (die Daten des Stauereignisses füllen die Pakete genau aus bzw. nur in einem Paket sind auch Daten vor oder nach dem Stauereignis). Im ungünstigen Fall beginnt das Stauereignis in der Mitte eines Pakets und endet in der Mitte eines Pakets. In diesem Fall sind sowohl im ersten als auch im letzten Paket Daten des Stauereignisses zu berücksichtigen, wodurch ein Paket mehr als die minimale Anzahl notwendig ist und sich die Aktualität jeweils um das Übertragungsintervall erhöht. Abbildung 55 visualisiert die Berechnung der minimalen bzw. maximalen Übertragungszeit an einem Beispiel.

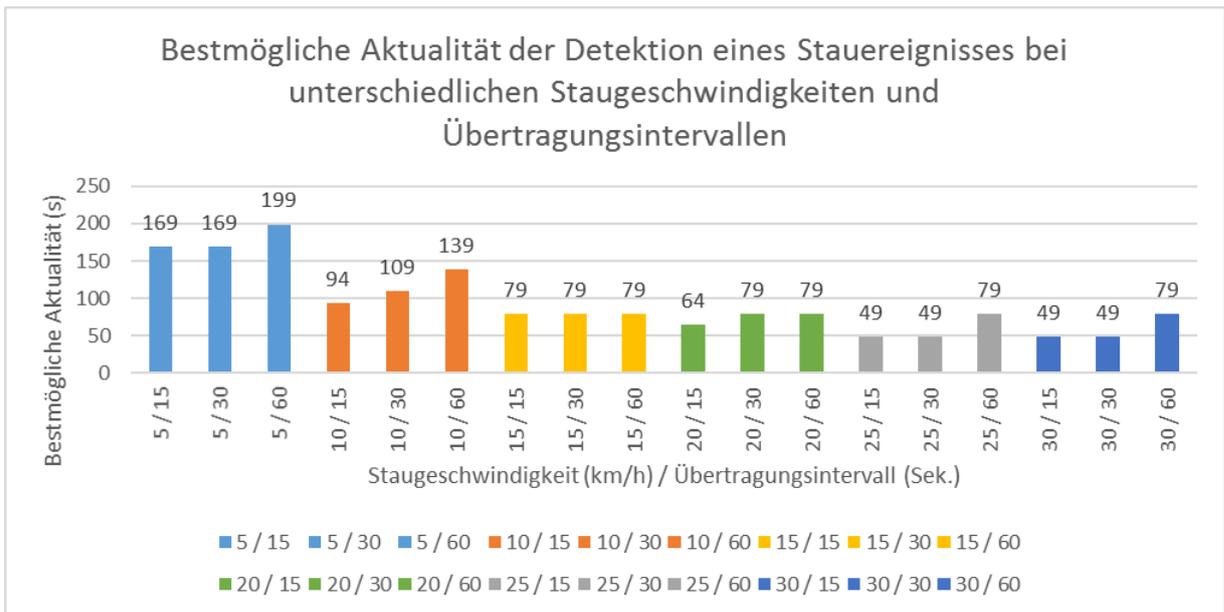


Abbildung 54: Darstellung der bestmöglichen Aktualität der Staudetektion (mind. 200 Meter) für unterschiedliche Staugeschwindigkeiten und Übertragungsintervallen

Stauereignis, 200 Meter, 5 km/h Staugeschw., 144 Sekunden Detektionslatenz

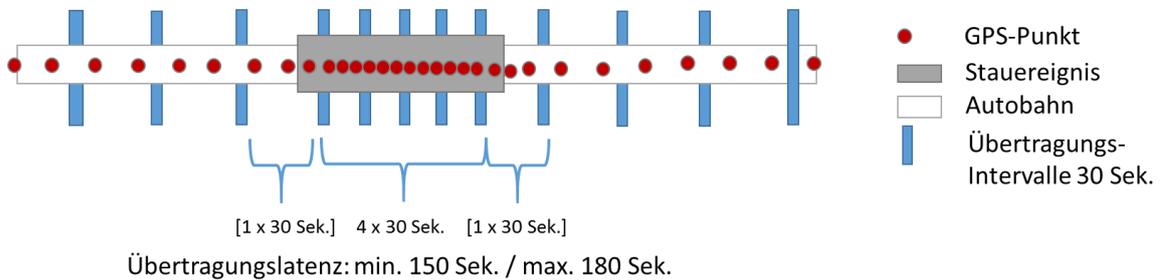


Abbildung 55: Abbildung der Übertragungslatenz für ein Stauereignis bei einem Übertragungsintervall von 30 Sekunden

3.5.2 Messung von Übertragungslatenzzeiten

Als Übertragungslatenzzeit L_t wird jene Latenzzeit definiert, die von der Erfassung eines GPS-Punkts bis zur Ankunft dieses Punktes im FCD-System vergeht. Die Latenzzeit L_t kann anhand der GPS-Zeitstempel in den ankommenden Daten gemessen werden (vgl. Abbildung 56).

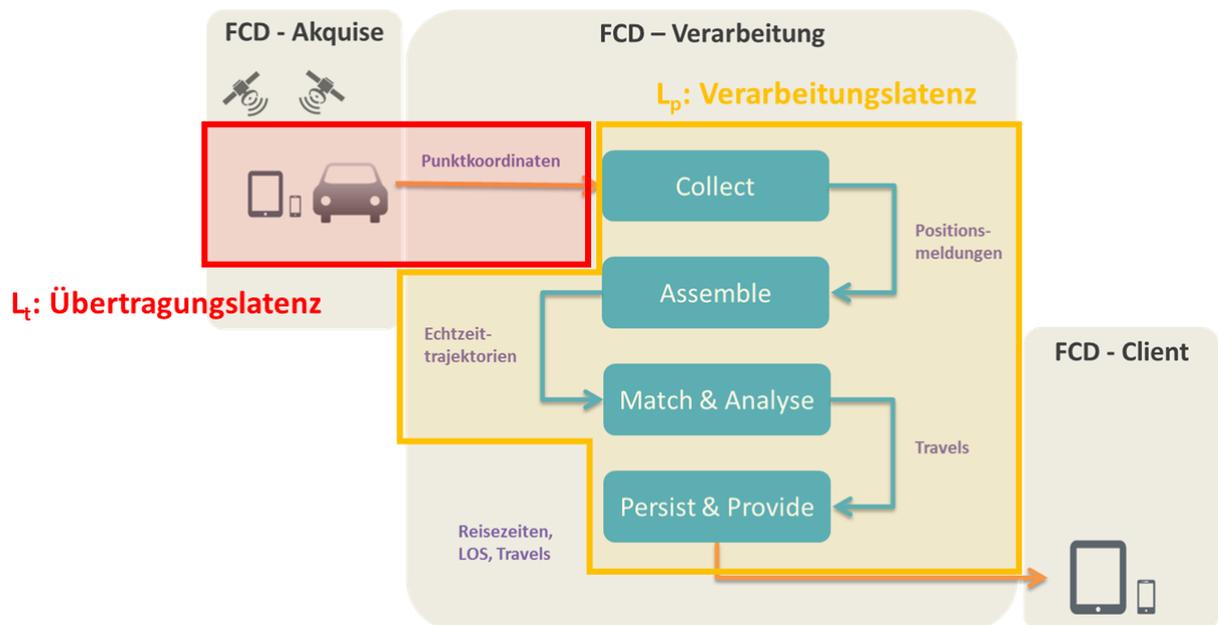


Abbildung 56: Schematische Darstellung der Prozessschritte eines prototypischen FCD-Systems

Für die folgenden Analysen wurden wie für die anderen Analysen Testdaten aus dem FCD-System der FCD Modellregion Salzburg verwendet. Die Messungen der Latenzzeiten erfolgte während einer Testwoche von 19.07. – 25.07.2018. Die GPS-Testdaten werden von einem externen Telematik-System als Pakete minütlich abgeholt. Die Auswertung der Latenzzeiten erfolgte daher minütlich für alle GPS-Teiltrajektorien eines Pakets. Da das Alter der GPS-Punkte innerhalb einer GPS-Trajektorie in einem Paket variiert (es werden die GPS-Daten eines Fahrzeugs kontinuierlich innerhalb einer Minute erfasst und gesammelt) wird sowohl das minimale als auch das maximale Alter der GPS-Daten einer Trajektorie ermittelt. Über diese minimalen bzw. maximalen Latenzzeiten werden Mittelwerte bzw. Standardabweichungen berechnet (Tabelle 24).

Minimale Latenzzeiten (Mittelwert)	119,6 Sek.
Minimale Latenzzeiten (Stabw)	38,1 Sek.
Maximale Latenzzeiten (Mittelwert)	153,4 Sek.
Maximale Latenzzeiten (Stabw)	53,8 Sek.

Tabelle 24: Gemessene Übertragungslatenzzeiten am Beispiel der Testdaten

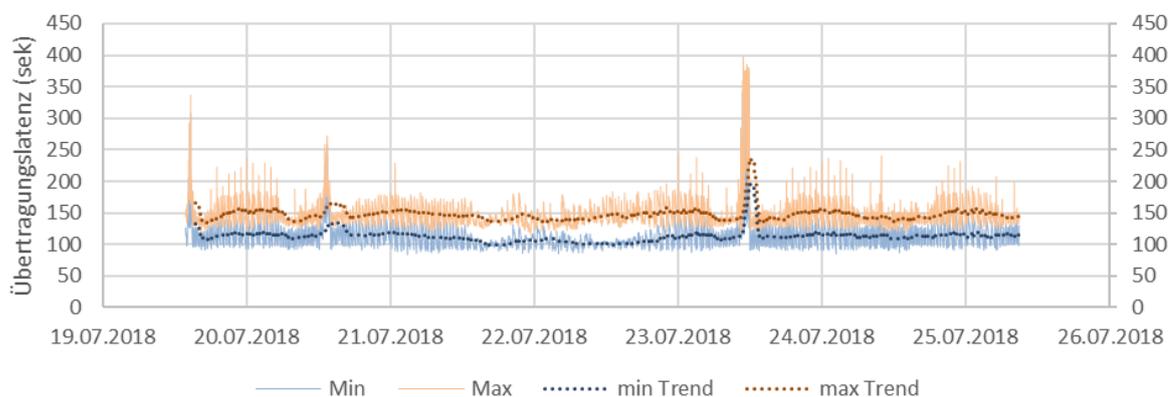


Abbildung 57: Minütliche Übertragungslatenzzeiten der Testdaten für den gesamten Zeitraum von 19.07. bis 25.07.2018

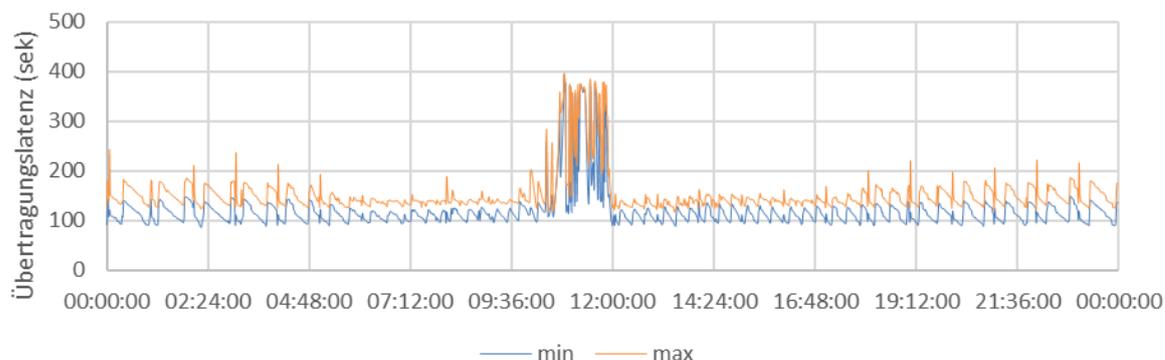


Abbildung 58: Mintütliche Übertragungslatenzzeiten der Testdaten für den 23.07.2018

3.5.3 Messung von Verarbeitungszeitzeiten

Beim Verarbeiten der GPS-Daten werden alle Daten in einem Batch gemeinsam behandelt. Daher wird hier nur ein Wert angegeben. Die Verarbeitung umfasst die Arbeitsschritte (1) Collect, (2) Assemble, (3) Match & Analyze und (4) Persist & Provide.

Die Verarbeitungsdauer liegt im Mittel bei 19 Sekunden (siehe Tabelle 25 und Abbildung 59) bei einer Standardabweichung von 4.5 Sekunden. Die gesamte Dauer vom Erfassen der Position bis zum Speichern der segmentbasierten Befahrungen in der Datenbank beträgt im Mittel 165-173 Sekunden. In Echtzeit-Verkehrsanwendungen muss dieses Alter der Informationen berücksichtigt werden (siehe auch Abschnitt 3.5.5).

Die Detail-Analyse für den 23.07.2018 zeigt auch bei der Verarbeitungszeit einen erhöhten Wert für den späten Vormittag (Abbildung 60). Hier liegen die Gründe für die längere Verarbeitungsdauer im FCD-System. Für eine genauere Aussage müssten die Einzelkomponenten der Verarbeitung analysiert werden.

Verarbeitungslatenzzeit (Mittelwert)	19,1 Sek.
Standardabweichung (Stabw)	4,5 Sek.

Tabelle 25: Gemessene Verarbeitungslatenzzeiten am Beispiel der Testdaten im Zeitraum zwischen 19.7. -26.7.2018

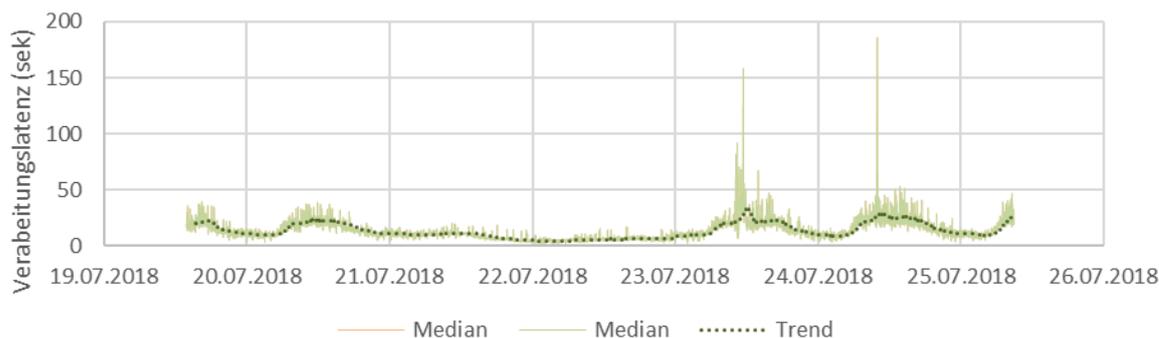


Abbildung 59: Minütliche Verarbeitungslatenzzeiten der Testdaten für den gesamten Zeitraum von 19.07. bis 25.07.2018

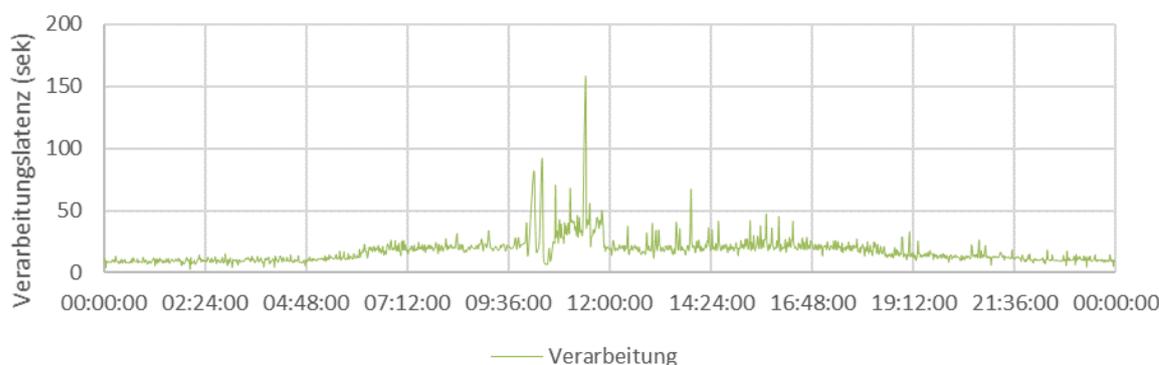


Abbildung 60: Minütliche Verarbeitungslatenzzeiten der Testdaten für den 23.07.2018

3.5.4 Anzahl von Batches

Neben der Übertragungs- und Verarbeitungszeit kann auch die Anzahl der empfangenen bzw. verarbeiteten Batches analysiert werden.

Die Visualisierung der Anzahl der Batches (Abbildung 61) zeigt, dass deutlich mehr Batches ankommen als verarbeitet werden. Dabei muss beachtet werden, dass nur jene Batches zu den Verarbeiteten zählen, die am Ende der Verarbeitungskette ankommen. Das sind jene Daten, die für Verkehrsinformationen und weitere Analysen verwendet werden können. Gründe für diese nichtverarbeiteten Batches sind: (1) der Batch enthält zu wenige Daten oder

nur Stillstände, (2) die Daten führen zu keiner Veränderung der Travels und (3) der Batch enthält ausschließlich Befahrungen auf niederrangigen Straßen (ab Functional Road Class 5). Im Gesamtzeitraum wurden durchschnittlich 587 Batches empfangen und 301 Batches vollständig verarbeitet.

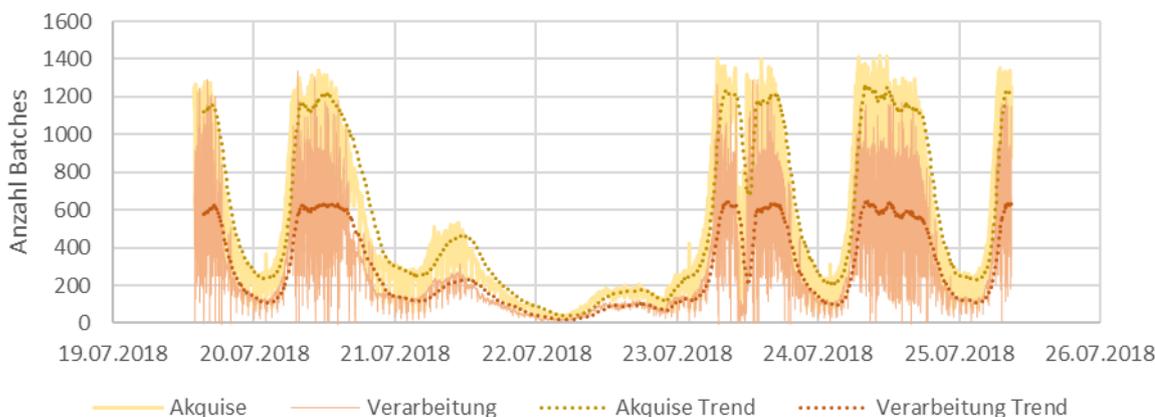


Abbildung 61: Anzahl der empfangenen und verarbeiteten GPS-Pakete der Testdaten für den Zeitraum von 19.07. bis 25.07.2018



Abbildung 62: Anzahl der empfangenen und verarbeiteten GPS-Pakete der Testdaten für den 23.07.2018

3.5.5 Interpretation und Schlussfolgerungen

Das FCD-System der FCD Modellregion Salzburg wurde derart erweitert, dass detaillierte Messungen zu Latenzzeiten durchgeführt werden können. Die gesamte Verarbeitung eines Datenpakets kann dadurch detailliert analysiert werden.

Messungen am Beispiel der Testdaten haben ergeben, dass die Daten im Schnitt minimal 120 und maximal 154 Sekunden alt sind (Standardabweichung 38 bzw. 54 Sekunden), bevor sie in das FCD-System zur weiteren Verarbeitung gelangen. Messungen mit anderen Telematik-

Dienstleistern haben gezeigt, dass der Wert mit 5 bis 60 Sekunden teilweise deutlich niedriger liegt. Diese Unterschiede dürften mit der Verarbeitung der Daten bei den Telematik-Dienstleistern zu tun haben.

Die Verarbeitung im FCD-System der FCD Modellregion Salzburg dauert im Durchschnitt ca. 19 Sekunden (Standardabweichung 4.5 Sek.). Es konnten Ausreißer festgestellt werden, allerdings gibt es dafür derzeit keine Erklärung. Speziell bei der Verarbeitungslatenz im FCD-System gibt es Optimierungspotential, indem die Latenzzeiten der Komponenten im Detail analysiert werden.

4 ARBEITSPAKET 4: SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN

Im Arbeitspaket 4 wurden die Ergebnisse der Arbeitspakete 2 und 3 gemeinsam mit dem Auftraggeber interpretiert und Schlussfolgerungen sowie Empfehlungen abgeleitet. Tabelle 26 stellt die Ziele und Aufgaben des Arbeitspakets dar. Die Schlussfolgerungen und Empfehlungen werden im Anschluss in diesem Ergebnisbericht berichtet.

(AP 4) Interpretation der Ergebnisse und Schlussfolgerungen	
(Z 4)	In diesem Arbeitspaket erfolgt die Interpretation der FCD-Durchdringungsgrade gemeinsam mit dem Auftraggeber. Auf Basis der Ergebnisse werden Schlussfolgerungen für einen sinnvollen Einsatz von FCD im österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz abgeleitet.
(A 4)	(4.1) Interpretation der Ergebnisse
	(4.2) Ableitung von Schlussfolgerungen auf Basis der Ergebnisse
(D 4)	Bericht zu den Interpretationsergebnissen und Schlussfolgerungen

Tabelle 26: Ziel (Z), Aufgaben (A) und Berichte (D) im Arbeitspaket 4

4.1 Schlussfolgerungen zum Szenario „Stillstands-Detektion“

- Stillstände im Autobahnen- und Schnellstraßennetz (vor allem jene, die unmittelbar auf der Fahrbahn auftreten) werden als sicherheitsrelevante Verkehrsinformation betrachtet.
- Ein **Stillstand** wird von der ASFINAG derart definiert, dass sich ein Fahrzeug für mind. 10 Sekunden mit 5 oder weniger km/h bewegt oder vollständig stillsteht.
- Floating Car Data (FCD) stellen prinzipiell eine geeignete Datenquelle dar, um Stillstände von Einzelfahrzeugen detektieren zu können, was ein klarer Vorteil gegenüber von querschnittsbasierten Messungen ist. Vergleichbar ist wahrscheinlich nur eine Video-basierte Detektion, die allerdings eine flächendeckende Ausstattung mit Videosystemen voraussetzt.
- Das evaluierte **raumzeitliche Cluster-Verfahren zur Stillstands-Detektion** (Ye et al. 2009) hat sich als geeignet herausgestellt. Als geeignete Parameter wurden eine minimale Stillstands-Dauer von **2 Minuten** sowie eine maximale Distanz (Radius) von 100 Metern (entspricht max. **200 Metern** Cluster-Distanz) identifiziert.
- Die **gewünschte zeitliche Genauigkeit** (10 Sekunden / 5 oder weniger km/h) kann anhand der evaluierten FC-Testdaten derzeit nicht gewährleistet werden, da das GPS-Abtastintervall bei den meisten Datensätzen über 10 Sekunden liegt. Dafür müssten Datenquellen mit einem Abtastintervall von unter 10 Sekunden genutzt werden.

- Vorausgesetzt, die FC-Daten stehen in einem geeigneten Abtastintervall von unter 10 Sekunden zur Verfügung, dann können auch Stillstände von 10 Sekunden zuverlässig detektiert werden.
- Da es sich bei FC-Daten immer nur um eine **Stichprobe der Grundgesamtheit** handelt, kann die **Vollständigkeit der Detektion** nicht gewährleistet werden. Dennoch kann eine Erstdetektion eines Staubereichs eine wertvolle Information darstellen, um im Verkehrsmanagement darauf zu reagieren. Bei entsprechenden FCD-Durchdringungsgraden erfolgt die Erstdetektion in der Regel innerhalb von wenigen Minuten.
- Die **Aktualität der Stillstands-Detektion** ist vom Übertragungs- bzw. vom Verarbeitungsintervall abhängig. Nimmt man beispielsweise ein Erfassungsintervall von 5 Sekunden, ein Übertragungsintervall von 30 Sekunden sowie eine Verarbeitungslatenz von 20 Sekunden an, dann kann ein Stillstand von 10 Sekunden innerhalb von 50 Sekunden detektiert werden. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Übertragungslatenzzeiten von Telematik-Anbietern teilweise wesentlich höher sind und daher eine Aktualität von einigen Minuten als realistisch angenommen werden kann.
- Die **Detektionswahrscheinlichkeit** wird durch die Parameter minimale Stillstands-Dauer und maximale Distanz bestimmt. Der Algorithmus gewährleistet, dass alle Stillstände, die diese Parameter erfüllen, korrekt detektiert werden.
- Die **Lagegenauigkeit** wird primär durch die Art des Stillstands beeinflusst, wobei die maximale räumliche Abweichung durch die maximale Distanz des Cluster-Parameters bestimmt ist.
- Anhand von Testdaten der FCD Modellregion konnte für zwei Tage (13./14.11.2017) beispielhaft gezeigt werden, dass in 8.568 (13.11.) bzw. 8.552 (14.11.) GPS-Trajektorien, die zur Gänze bzw. teilweise auf Autobahnen- bzw. Schnellstraßen in Österreich aufgezeichnet wurden, **540** (13.11.) bzw. **282** (14.11.) Stillstände von mehr als 2 Minuten Stillstands-Dauer und maximal 200 Metern Distanz detektiert wurden.
- **402** der 540 Stillstände (74 %) bzw. **157** von 282 (56 %) der Stillstände sind **verkehrsbedingt**. Der große Unterschied zwischen den beiden Tagen ist damit begründbar, dass am ersten Tag wesentlich mehr Staus (z.B. durch Grenzkontrollen) aufgetreten sind.
- **138** der 540 Stillstände (26 %) bzw. **125** (44 %) der Stillstände sind **nicht verkehrsbedingt**. Im Vergleich der beiden Tage zeigt sich, dass die Anzahl

vergleichbar ist.

- Eine **automatische Klassifikation** von verkehrsbedingten und nicht verkehrsbedingten Stillständen kann zu über 99% dadurch gelingen, indem man auswertet, ob sich der Stillstand auf der Fahrbahn oder abseits der Fahrbahn befindet. Stillstände auf der Fahrbahn sind (zumindest in den Testdaten) zu über **99% verkehrsbedingt**.
- Problematisch sind nicht verkehrsbedingte Stillstände, die sich unmittelbar neben der Fahrbahn befinden (Pannestreifen, Pannenbucht). Da diese Stillstände allerdings selten auftreten (im Testdatensatz insgesamt nur 5), müssen sie nicht extra behandelt werden.

4.2 Schlussfolgerungen zum Szenario „Stau-Detektion“

- Ähnlich wie bei der Stillstands-Detektion handelt es sich bei der Stau-Detektion ebenfalls um eine sicherheitsrelevante Verkehrsinformation.
- Ein Stau wird von der ASFINAG derart definiert, dass sich Fahrzeuge für zumindest 200 Meter nicht schneller als 30 km/h bewegen. Zwischen zwei Stauabschnitten dürfen sich Fahrzeuge für max. 600 Meter auch mit einer höheren Geschwindigkeit bewegen. Sind beide Bedingungen erfüllt, dann werden die beiden Stauabschnitte zusammengefasst.
- Um ein Stauende bzw. einen Staubereich mit FC-Daten zuverlässig detektieren zu können, ist die regelmäßige Ankunft von FCD-Fahrzeugen notwendig. Den Anteil an FCD-Fahrzeugen an der Verkehrsstärke nennt man **FCD-Durchdringungsgrad**.
- Die Ankunftszeit zwischen zwei FCD-Fahrzeugen kann mit einem **stochastischen Prozess** modelliert werden (Breitenberger et al. 2004). Der stochastische Prozess modelliert mit Hilfe einer Poisson-Verteilung, in welchen Zeitintervallen die Fahrzeuge mit einer definierten Wahrscheinlichkeit an einem Messquerschnitt ankommen.
- Der notwendige FCD-Durchdringungsgrad bei der Stau-Detektion ist wesentlich von der **Lagedynamik des Staus** abhängig, d.h. wie weit verändert sich das Stauende bis zum Eintreffen des nächsten FCD-Fahrzeugs bzw. welche maximale Änderung möchte man bis zum Eintreffen des nächsten FCD-Fahrzeugs zulassen. Dieser Parameter wird als räumliche Genauigkeit bezeichnet.
- Zur Berechnung der **Lagedynamik des Staus** wurden 3 unterschiedliche Methoden evaluiert, die sich je nach Situation unterschiedlich gut eignen:
 - **Methode 1a:** Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik des Stauendes

- aus den FCD-basierten Erst- und Letztdetektionen des Stauendes
- **Methode 1b:** Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik des Stauendes aus den Sensor-basierten Erst- und Letztdetektionen des Stauendes
 - **Methode 2:** Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik des Stauendes aus FCD- und querschnittsbasierten Messwerten
 - **Methode 3:** Berechnung der Lage- und zeitlichen Dynamik des Stauendes ausschließlich anhand von querschnittsbasierten Messwerten
- Für **9 Stauereignisse** wurde die **Lagedynamik** mit den unterschiedlichen Methoden berechnet. Die **Korrektheit** dieser Berechnungen hängt von der Qualität der Messwerte (Geschwindigkeiten, Verkehrsstärken) bzw. von der Situation vor Ort ab. Fehler entstehen beispielsweise durch unterschiedliche Messwerte von PKWs bzw. LKWs, Messquerschnitten an ungünstigen Positionen, Zu- und Abflüssen und Fahrstreifenänderungen.
 - Für **9 Stauereignisse** wurden anhand der Lagedynamik **reale und notwendige FCD-Durchdringungsgrade** berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass sich für jedes der 9 Stauereignisse andere notwendige FCD-Durchdringungsgrade ergeben, da sich die Parameter (Verkehrsstärke, Spuranzahl, Staugeschwindigkeit) unterscheiden. Die notwendigen Durchdringungsgrade bei 500 Metern räumlicher Genauigkeit liegen zwischen **0,21 %** (Verkehrsüberlastung A23) und **4,9 %** (Totalsperre auf der A10). Allgemein lässt sich für die betrachteten Stauereignisse festhalten, dass mit einem **Durchdringungsgrad von 2,5%** bei einer **Detektionswahrscheinlichkeit von 95%** alle Stauereignisse (bis auf die Totalsperre auf der A10) mit **500 Metern räumlicher Genauigkeit** detektiert werden können.
 - Der notwendige FCD-Durchdringungsgrad verhält sich **umgekehrt proportional** zur räumlichen Genauigkeit, d.h. eine räumliche Genauigkeit der Staudetektion von 250 Metern erfordert den doppelten FCD-Durchdringungsgrad im Vergleich zu einer räumlichen Genauigkeit von 500 Metern (sofern alle anderen Parameter gleichbleiben).
 - Die **Vorteile** der FCD-basierten Detektion sind, dass die Stauende-Detektion zum Messzeitpunkt lagegetreu erfolgt, während bei der Detektion durch Messquerschnitte das Stauende erst detektiert werden kann, wenn das Stauende den nächsten Messquerschnitt erreicht. Bei Autobahnabschnitten mit einem dichten Netz an Messquerschnitten (z.B. ein Messquerschnitt pro Kilometer) führen beide Detektionsmethoden zu ähnlichen Ergebnissen. Bei Autobahnabschnitten mit einem dünnen Netz an Messquerschnitten können die FC-Daten eine wertvolle Datenquelle für die Stau-Detektion darstellen.

- Allgemein kann festgehalten werden, dass FC-Daten mit einem geeigneten Durchdringungsgrad vor allem für die Erstdetektion eines Stauereignisses eine wertvolle Datenquelle darstellen.
- Die Berechnung der **zeitlichen Dynamik bzw. Lagedynamik des Stauendes** setzt zuverlässige Messwerte (Verkehrsstärke des nachkommenden Verkehrs, Staugeschwindigkeit, LKW/PKW-Anteile, Fahrspuren) voraus. Sind diese Parameter zuverlässig gegeben, dann kann die Berechnung der Lage des Stauendes mit guter räumlicher Genauigkeit erfolgen. Diesbezüglich bietet sich an, die vorgeschlagenen Berechnungsmethoden direkt in das Verkehrsmanagementsystem der ASFINAG zu integrieren und die berechneten Werte über einen längeren Zeitraum für viele unterschiedliche Stauszenarien zu beobachten und mit den tatsächlichen Messwerten zu vergleichen.
- Speziell auf besonders stauanfälligen Strecken mit hoher Verkehrsbelastung und hoher Komplexität (A23, A7) hat sich gezeigt, dass die Berechnung der Staudynamik durchaus herausfordernd sein kann, da viele, teilweise unbekannte Faktoren, die Staubildung beeinflussen. In diesem Fall muss jedenfalls auf das in der Regel dichte Netz an Messquerschnitten bzw. auf FC-Daten zur Stau-Detektion zurückgegriffen werden.
- Probleme in der Berechnung haben sich auch gezeigt, wenn wenige Messquerschnitte vorhanden sind. In diesem Fall kann oft der nachkommende Verkehr nicht zuverlässig bestimmt werden, was die Berechnung der Staudynamik verhindert bzw. erschwert.
- Für die **Messung der Staugeschwindigkeit** haben sich FC-Daten als vorteilhaft herausgestellt, da eine streckenbezogene Messung in der Regel repräsentativere Daten im Vergleich zu den querschnittsbezogenen Messungen liefert. Vor allem wenn sich die Messquerschnitte vor oder nach Anschlussstellen befinden, kann durch den zu- bzw. abfließenden Verkehr eine höhere Dynamik entstehen, die sich auch in den Geschwindigkeitsmessungen niederschlägt. FCD-Messungen haben wiederum das Problem von verschiedenen Geschwindigkeiten auf unterschiedlichen Fahrspuren, die beispielsweise durch höhere LKW-Anteile auf einer Fahrspur ausgelöst werden. Diesbezüglich bietet sich an die Werte mehrerer FCD-Fahrzeuge zu mitteln.
- Um zukünftig eine **einfache Berechnung von FCD-Durchdringungsgraden** zu ermöglichen, wurde eine **Excel-Datei** erstellt. Mit Hilfe dieser Excel-Datei lassen sich anhand von Parametern beliebige FCD-Durchdringungsgrade berechnen. Gleichzeitig erhält man auch Kennwerte wie die Stauausbreitungsgeschwindigkeit.

- Um einen schnellen Überblick über FCD-Durchdringungsgrade an unterschiedlichen Messquerschnitten im Autobahn- und Schnellstraßennetz zu erhalten wurden in der Excel-Datei auch **253 Messquerschnitte** mit den durchschnittlichen Verkehrsstärken, LKW-Anteilen und Fahrspuren eingepflegt. Als Parameter definiert man die Freiflussgeschwindigkeit vor dem Stau, die Staugeschwindigkeit, die gewünschte räumliche Genauigkeit sowie die Detektionswahrscheinlichkeit. Als Ergebnis erhält man die Verkehrsdichte im Stau und vor dem Stau, die Verkehrsstärke im Stau, die Geschwindigkeit des Stauendes, die Zeit, die das Stauende benötigt, um sich so weit zu bewegen, dass die räumliche Genauigkeit überschritten wird, die FCD-Stärke sowie die FCD-Durchdringungsgrade. Die Ergebnisse können auch mit Hilfe des Open-Source-GIS Programms **QGIS** auf einer Karte visualisiert werden.
- Die Ergebnisse zeigen, dass die berechneten FCD-Durchdringungsgrade bei einer angenommenen Staugeschwindigkeit von 10 km/h sowie einer räumlichen Genauigkeit von 500 Metern für die durchschnittlichen Verkehrsstärken der 253 Messquerschnitte zwischen **0,1 und 7%** liegen. Die hohe Differenz kommt daher, dass die Berechnung der Staudynamik aufgrund der unterschiedlichen Verkehrsstärken und Fahrstreifenanzahl sehr unterschiedliche Ergebnisse liefert. Der durchschnittliche FCD-Durchdringungsgrad über alle 253 Messquerschnitte liegt bei ca. **1,4%**.

4.3 Schlussfolgerungen zum Szenario „Fahrzeitmessung“

- Der Vergleich von Bluetooth-basierten Fahrzeitmessungen und FCD-basierten Fahrzeitmessungen hat gezeigt, dass beide Methoden zu ähnlichen Ergebnissen der Fahrzeitmessung führen.
- Die **Vorteile der Bluetooth-basierten Fahrzeitmessung** bestehen vor allem darin, dass alle Fahrzeuge mit aktivierten Bluetooth-Geräten für die Messung herangezogen werden können. Aufgrund von fehlenden Messdaten von Einzelfahrzeugen konnten für das betrachtete Beispiel keine realen Bluetooth-Durchdringungsgrade ermittelt werden. Erfahrungswerte aus anderen Beispielen von Bluetooth-Messungen zeigen aber, dass die Durchdringungsgrade in der Regel zumindest zwischen 10 und 15 % betragen.
- Die **Nachteile der Bluetooth-basierten Fahrzeitmessung** liegen darin, dass die Fahrzeit nur zwischen den Messstationen detektiert werden kann. Bei Staubildung zwischen den Messstationen wird die Verzögerungszeit auf den gesamten Messabschnitt aufgeteilt. Außerdem kann das Stauende nicht detektiert werden.

- Die **Vorteile der FCD-basierten Fahrzeitmessung** liegen darin, dass die Messung kontinuierlich erfolgt und daher auch ein Staubereich, der zwischen den Messstellen liegt bzw. zwischen diesen beginnt, lagegetreu detektiert werden kann. Die Verlustzeit wird in diesem Fall nur für den tatsächlichen Staubereich bestimmt.
- Die **Nachteile der FCD-basierten Fahrzeitmessung** bestehen vor allem darin, dass die Vollständigkeit bzw. Genauigkeit der Messung vor allem vom FCD-Durchdringungsgrad abhängt. Bei niedrigen FCD-Durchdringungsgraden kann nicht gewährleistet werden, dass der Messabschnitt kontinuierlich befahren wird, wodurch sich Lücken in der Fahrzeitmessung ergeben. Der reale FCD-Durchdringungsgrad für den Testdatensatz am Walserberg liegt im Beobachtungszeitraum bei **0,58 %**. Der benötigte FCD-Durchdringungsgrad liegt für den Zeitraum der Staubildung bei **2,3 %**. Ein Problem der FCD-Messung besteht vor allem auch darin, dass offenbar FCD-Fahrzeuge bei Staubildung vermehrt die Autobahn verlassen (in Zeiten ohne Staubildung konnten vermehrt FCD-Fahrten festgestellt werden). Ob diese Aussage nur für FCD-Fahrzeuge oder allgemein gilt kann derzeit nicht beantwortet werden, könnte aber eine Fragestellung für zukünftige Untersuchungen sein.
- **Auffällig im Vergleich der beiden Messmethoden** ist, dass bei Stauauflösung die Bluetooth-basierten Messungen noch bis zu 30 Minuten länger eine Verzögerung detektieren, während die FCD-Werte viel schneller auf die Veränderung reagieren. Da die exakte Funktionsweise der eingesetzten Bluetooth-Messsystems nicht bekannt ist, kann zur Ursache keine Aussage gemacht werden. Hier sollte allerdings eine Prüfung erfolgen, woher dieses Verhalten kommt und ob es nicht optimiert werden kann. Mittlerweile wurde das ursprünglich eingesetzte Bluetooth-System durch ein neues Erfassungs- als auch Zentral-System abgelöst
- Eine konkrete **Empfehlung zur Bluetooth-Messung** betrifft die Positionierung der Messquerschnitte. Diese sollte einerseits relativ feinmaschig erfolgen, sodass der Staubereich und die daraus resultierende Verlustzeit am Autobahnabschnitt möglichst klar eingegrenzt werden können. Außerdem sollte zumindest auf der A10 vor dem Knoten Salzburg eine weitere Messung erfolgen, sodass auch jene Fahrzeuge, die die A10 in Richtung A1 verlassen, ebenfalls erfasst werden. Gleichzeitig kann dadurch der Staubereich besser eingegrenzt werden. Die gleiche Empfehlung gilt für die A1 vor dem Knoten Salzburg.

4.4 Schlussfolgerungen zur Aktualität von FC-Daten

- Die Aktualität von FC-Daten ist vor allem in der Echtzeit-nahen Verarbeitung von Verkehrsinformationen relevant. Die Aktualität bezeichnet jene Zeitspanne, die es minimal bzw. maximal dauert, bis ein Ereignis (z.B. Stauende) detektiert wurde und dieses Ereignis als Verkehrsinformation vorliegt.
- Bei der Bestimmung der Aktualität von FC-Daten sind unterschiedliche Latenzzeiten zu berücksichtigen. Die **Erfassungslatenzzeit** bezeichnet jenes Zeitintervall, in der GPS-Positionen aufgezeichnet werden. Die **Übertragungslatenzzeit** bezeichnet jene Zeitspanne, in der die GPS-Daten vom Fahrzeug zu einem weiterverarbeitenden System übertragen werden. Mit der **Verarbeitungslatenzzeit** wird jene Zeit gemessen, die benötigt wird, um die Daten zu Verkehrsinformationen zu verarbeiten. Die **Detektionslatenzzeit** schließlich definiert jene Zeit, die es benötigt, um ein Ereignis überhaupt detektieren zu können (z.B. ein Fahrzeug muss sich 200 Meter im Stau bewegt haben).
- Entscheidend für die Aktualität der Daten ist vor allem die **Detektionslatenzzeit**, denn diese ist eine reale für die Messung benötigte Zeit, die nicht unterschritten werden kann. Wenn beispielsweise ein Fahrzeug 144 Sekunden benötigt, um sich in einem Staubereich mit 5 km/h 200 Meter weit zu bewegen, dann benötigt man zumindest 144 Sekunden, um den Stau zu detektieren (sofern man definiert, dass ein Staubereich zumindest 200 Meter lang sein muss).
- Die weiteren Latenzzeiten können nun den minimal notwendigen Wert der Detektionslatenzzeit weiter verschlechtern. Die **Erfassungslatenzzeit** ist nicht ausschlaggebend, da sie immer geringer als die Übertragungslatenzzeit ist und damit die Übertragungslatenzzeit den größeren Einfluss hat. Die **Übertragungslatenzzeit** kann in der Regel beeinflusst werden. Die Überlegungen im Projekt haben gezeigt, dass ein **Übertragungsintervall von 30 Sekunden** für FC-Daten zu empfehlen ist (sofern das Erfassungsintervall natürlich wesentlich geringer ist). Niedrigere Übertragungsintervalle sind zwar möglich, aber eher nicht zu empfehlen, da der Mehrwert gering ist und das System zusätzlich belastet wird. Höhere Intervalle sind auch nicht zu empfehlen, da dadurch die Verlustzeiten bei der Übertragung der Daten größer werden und damit die Aktualität der Daten sinkt. Die **Verarbeitungslatenzzeit** ist als fixer Wert zu betrachten, der zu den anderen Latenzzeiten addiert werden muss und dadurch die Aktualität negativ beeinflusst. Daher sollte der Wert möglichst niedrig gehalten werden.

- Die **Messungen der Übertragungslatenzen** im FCD-System der Salzburg Research haben ergeben, dass die Übertragungslatenz der ausgewählten Datenquelle zumindest **119 Sekunden** (Standardabweichung: 38 Sekunden) beträgt. Dieser Wert bedeutet, dass die Daten vor der Weiterverarbeitung im FCD-System zumindest 2 Minuten alt sind, was die Aktualität der Daten negativ beeinflusst. Eine stichprobenartige Kontrolle von anderen Datenquellen ergab deutlich niedrigere Übertragungslatenzen zwischen 5 und 60 Sekunden. Bezüglich der Übertragungslatenzzeit ist daher zu empfehlen, diese unbedingt als Kriterium bei der Beschaffung von FC-Daten zu verwenden und während des Bezugs laufend zu überwachen. Eine Übertragungslatenzzeit von 30 Sekunden ist zu empfehlen, jedenfalls sollte sie nicht höher als 60 Sekunden sein.
- Die **Messungen der Verarbeitungslatenzen** im FCD-System der Salzburg Research haben ergeben, dass die Verarbeitungslatenz im Durchschnitt bei **19 Sekunden** (Standardabweichung: 4,5 Sekunden) liegt. Dieser Wert ist zwar im Vergleich zur Übertragungslatenzzeit niedrig, allerdings dennoch aus Systemsicht unerwartet hoch. Da eine detailliertere Systemanalyse nicht Teil des Projekts OptiFCD war, konnten die Ursachen für die Verarbeitungslatenzzeit nicht geklärt werden. Es wird aber erwartet, dass dieser Wert Optimierungspotential aufweist.

5 LITERATUR

- Breitenberger, S. et al., 2004. Traffic information potential and necessary penetration rates. *Traffic engineering & control*, 45(11).
- Brunauer, R. & Rehrl, K., 2014. Deriving Driver-Centric Travel Information by Mining Delay Patterns from Single GPS Trajectories. In *Proceedings of the 7th ACM SIGSPATIAL International Workshop on Computational Transportation Science - IWCTS '14*. New York, New York, USA: ACM Press, pp. 25–30. Available at: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2674918.2674922> [Accessed January 26, 2015].
- ISO 19157, 2013. ISO 19157:2013 Geographic information - Data quality. , p.146.
- Schneider, C. et al., 2017. A Framework for Evaluating Stay Detection Approaches. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(10).
- Sevlian, R. & Rajagopal, R., 2010. Travel Time Estimation Using Floating Car Data. *arXiv preprint arXiv:1012.4249*.
- Ye, Y. et al., 2009. Mining Individual Life Pattern Based on Location History. In *2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware*. IEEE, pp. 1–10.