

Forschungsprojekt WOLKE

Wetterabhängige Kalibrierung von Verkehrsmodellen für eine optimierte Verkehrssteuerung



31.12.2013

Beitrag des Zuwendungsempfängers:
micKS Meß-, Steuer- und Regelsysteme GmbH

Laufzeit: 01.01.2011 – 30.06.2013

Förderkennzeichen: 19P10017D



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

unterstützt und gefördert mit Mitteln des Bundesminis-
teriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)

Dokument-Informationen

Der vorliegende Bericht enthält alle Tätigkeiten und Ergebnisse der Firma micKS Meß-, Steuer- und Regelsysteme GmbH, Fellbach und Oberstdorf innerhalb des Projekts WOLKE.

Zitiervorschlag:

Schedler, K.E., Schröder O. (2014): WOLKE – Wetterabhängige Kalibrierung von Verkehrsmodellen für eine optimierte Verkehrsteuerung, Schlussbericht der Fa. micKS MSR GmbH, Fellbach u. Oberstdorf, Forschungsbericht Förderkennzeichen **19 P 10017D** (BMWf).

Die Arbeiten aller Projektpartner sind in einem gemeinsamen Schlussbericht inhaltlich zusammengefasst aufbereitet. Detaillierte Beschreibungen der Projektbeiträge der einzelnen Partner sind den jeweiligen Einzelberichten zu entnehmen. Alle Berichte können unter folgender Stelle eingesehen werden:

Technische Informationsbibliothek

Deutsche Forschungsberichte, Postfach 6080, 30060 Hannover.

Inhalt

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | Ziele | 5 |
| 1.1 | Gesamtziel des Vorhabens | 5 |
| 1.2 | Bezug des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen | 6 |
| 1.3 | Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens | 7 |
| 2 | AP2 – Spezifikation | 12 |
| 3 | AP3 – Datenerfassung | 18 |
| 4 | AP 4 Datenanalyse | 51 |
| 4.1 | Analyse des lokalen Verkehrsgeschehens | 51 |
| 4.1.1 | Ziele der Datenanalyse zum lokalen Verkehrsgeschehen | 51 |
| 4.1.2 | Beschreibung der Analysemethoden | 51 |
| 4.1.3 | Darstellung der Ergebnisse | 70 |
| 5 | AP 5 Modellentwicklung | 85 |
| 5.1 | Modellentwicklung für das lokale Verkehrsgeschehen | 85 |
| 5.1.1 | Modelle auf der Basis von Fundamentalgleichungen | 86 |
| 5.1.2 | Modell für die Beschreibung der freien Geschwindigkeit | 87 |
| 6 | Modellimplementierung | 95 |
| 6.1 | Ableitung der Prognosen für die Wetterklassen | 97 |
| 6.1.1 | Gebietsbezogene Vorhersage der Wetterklassen für die Verkehrsnachfrage | 98 |
| 6.1.2 | Streckenbezogene Prognose der Straßenwetterklassen für das lokale Verkehrsgeschehen | 101 |
| 6.2 | Implementierung eines vereinfachtes Fundamentalmodells mit Straßenwetterklassen | 102 |
| 6.3 | Verifikation der Implementierung | 103 |
| 6.3.1 | Verifikation der Prognose der Straßenwetterklasse | 103 |
| 6.3.2 | Verifikation des kontinuierlichen Geschwindigkeits-Modells | 105 |
| 6.3.3 | Vergleich der Wirksamkeit der Modellansätze im Testzeitraum | 106 |
| 7 | Zusammenfassung | 111 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 7.1 | Zusammenfassung der fachlichen Ergebnisse | 111 |
| 8 | Veröffentlichungen von Projektergebnissen | 114 |
| 8.1 | Partner übergreifende Veröffentlichungen | 114 |
| 8.2 | mickS MSR GmbH und KS-Consulting | 115 |
| 9 | Glossar | 116 |
| 10 | Literatur | 121 |
| 11 | Abbildungsverzeichnis | 124 |
| 12 | Tabellenverzeichnis | 127 |

1 Ziele

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Wetter beeinflusst den Verkehr. Schlechtes Wetter verändert den Zustand der Fahrbahn und reduziert die Sichtweite, was zum einen die Kapazität der Verkehrswege verringert und zum anderen die Wahrscheinlichkeit von Unfällen erhöht. Auch das Verkehrsaufkommen wird in gewissem Umfang vom Wetter beeinflusst, da die Menschen Freizeitaktivitäten abhängig von der aktuellen Wetterlage wählen. Sind diese aus dem Wetter resultierenden Zustände besser voraussehbar, können Straßenbetreiber bereits im Vorfeld verkehrstelematische Maßnahmen einleiten, um präventiv kritische Verkehrszustände zu vermeiden. Auch den Verkehrsteilnehmern helfen bessere Prognosen, um ihre Fahrten zuverlässiger planen zu können. Das gilt insbesondere für Lkw-Fahrten, bei denen Pünktlichkeit von besonderer Bedeutung ist, die aber gleichzeitig stärker vom Zustand der Fahrbahnoberfläche beeinflusst werden als bei Pkw-Fahrten. Als Grundlage für die Planung von verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen, für den Betrieb von Steuerungseinrichtungen und für die Information der Verkehrsteilnehmer dienen Verkehrsmodelle, die jedoch bisher den Einfluss des Wetters mit der Ausnahme von Streckenbeeinflussungsanlagen nicht berücksichtigen.

Ziel des Projekts WOLKE ist es daher, durch erstmalige Zusammenführung von mikro- und makroskopischen Messdaten aus den Bereichen Wetter und Verkehr eine signifikant verbesserte Verkehrsmodellierung zu erreichen, die dann eine präzisere Erfassung und Prognose der Verkehrslage im Straßenverkehr ermöglicht. Im Projekt WOLKE werden dazu die Wirkungszusammenhänge zwischen Wetter und Verkehr für die Bereiche Fahrweise, Verkehrsfluss, Verkehrssicherheit und Verkehrsnachfrage untersucht und in vorhandene Modelle integriert.

Auf lokaler Ebene (Kreuzung, Straßenabschnitt) wird der Einfluss des Wetters auf die Straßenoberfläche, auf die Fahrweise (Geschwindigkeiten, Fahrzeugfolgeabstände) und damit auf die Kapazität und den Verkehrsfluss untersucht. Unfälle werden dabei unter den Aspekten der Verkehrssicherheit und der Störungswahrscheinlichkeit einbezogen. Die Ergebnisse liefern Parameter für makroskopische Leistungsfähigkeitsanalysen von Verkehrsanlagen und für mikroskopische Verkehrsflussmodelle.

Auf Netzebene werden die Einflüsse der großräumigen Wetterlage (Sonnenscheinstunden, Niederschlagswahrscheinlichkeit) auf die Verkehrsnachfrage analysiert. Hier wird der Einfluss des Wetters auf das Verkehrsaufkommen, die Zielwahl und die Fahrzeit auf ganzen Streckenzügen ausgewertet und für die Nutzung in Verkehrsnachfragemodellen aufbereitet.

Die lokale Betrachtungsweise des Verkehrsflusses und die netzweite Betrachtung der Verkehrsnachfrage soll so zusammengeführt werden, dass die netzweiten Auswirkungen lokal auftretender, wetterbedingter Kapazitätsänderungen in die Makromodellierung der Verkehrslage eingehen. Die bessere, ebenenübergreifende Modellierung von

Wettereinflüssen soll Verkehrsingenieure sowohl bei Planungsaufgaben als auch in der Betriebsdurchführung unterstützen.

Wetter und Verkehrsströme halten nicht an Staatsgrenzen. Da es derzeit für die Stadt Wien mit dem mikroskopischen Verkehrsflussmodell eine gute Datenbasis für städtische Gebiete gibt und gleichzeitig im südbayerischen Raum viele Daten für Autobahnnetze vorliegen, bietet sich die Erforschung des Komplexes Wetter im Rahmen eines transnationalen Projekts an. Für die Wahl des Untersuchungsraumes spricht außerdem, dass hier die Verkehrsverhältnisse mehr als in anderen Räumen vom Wetter geprägt werden. Im Winter kommt es aufgrund von Schnee und Glatteis häufig zu Extremsituationen. Gleichzeitig gibt es einen ausgeprägten Urlaubs- und Freizeitverkehr, der auch vom Wetter beeinflusst wird.

Diese grenzübergreifende Zusammenarbeit dient der Erreichung der folgenden Projektziele:

- ✓ Zugewinn an Kenntnissen über die modelltechnischen Auswirkungen von Wetterereignissen auf mikroskopischer und makroskopischer Ebene sowie deren inhärenter Zusammenhang durch die Verknüpfung der Modellwelten
- ✓ Stark verbesserte Qualität der Lang- und Mittelfristprognose in Verkehrsinformationssystemen durch Einbezug bisher unbekannter Faktoren
- ✓ Verbesserte Verkehrssteuerung durch Einbezug des Wetters auf außerörtlichen Straßen
- ✓ Verständnis der Aufbereitung von Wetterinformationen für die harmonisierte Verwendung in makro- und mikroskopischen Modellwelten
- ✓ Verständnis des Einflusses des Wetters auf Quelle-/Zielverkehre und Nachfrage
- ✓ Stark verbesserte Qualität der innerstädtischen Steuerung und Information
- ✓ Integration der Ergebnisse in AT und D
- ✓ Effiziente Verbreitung der Projektergebnisse durch die Projektpartner aus den Bereichen Lehre, öffentliche Hand und Industrie

1.2 Bezug des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen

Im 21. Jahrhundert“ und „Intelligente Infrastruktur“ des 3. Verkehrsforschungsprogramms der Bundesregierung ein [7]. WOLKE fokussiert insbesondere auf eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit bereits vorhandener Verkehrsinformations- und Verkehrssteuerungssysteme und führt somit auch zu einer Sicherung der bereits getätigten Investitionen.

Das Forschungsprogramm fordert unter anderem die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Verkehrsinformationen und die Verbesserung der subjektiven und objektiven Sicherheit sowie, im Handlungsfeld Klima und Umweltschutz, einen besseren Kenntnisstand über das Zusammenspiel von Verkehr und Umwelt. Hierbei wird traditionell z.B. auf CO₂ und Lärmemissionen angespielt. Das Projekt WOLKE umfasst diesen Bereich aus einem anderen Blickwinkel, nämlich die Aufbereitung und Nutzung von allgemeinen Wetterdaten in Verkehrsmodellen. Diese Modelle ermöglichen den Betreibern eine bessere Verkehrslageberechnung, die sowohl wetterbedingte Kapazitätsreduktionen als auch Nachfrageänderungen berücksichtigt. Den Nutzern des Straßennetzes erlaubt das eine bessere Planbarkeit ihrer Ortsveränderungen, was wiederum zu einer besseren Ausnutzung der Kapazitäten im Gesamtnetz führen kann.

Der im Dezember 2008 von der Europäischen Kommission vorgelegte ITS Action Plan zur Förderung verkehrstelematischer Maßnahmen hebt insbesondere eine europäische Zusammenarbeit und Koordinierung im Bereich intelligenter Verkehrssysteme hervor. Geografische Kontinuität, die Interoperabilität von Diensten sowie Normung stehen im Zentrum der Aufmerksamkeit. Auch das deutsche Forschungsprogramm hebt die Vorteile der Zusammenarbeit auf bi- und multilateraler Ebene beispielsweise in EU- oder Deufrako-Projekten positiv hervor.

Das Projekt WOLKE bildet eine transnationale „Brücke“ zwischen Wissenschaftlern bzw. Anwendern in Deutschland und Österreich. Der Schwerpunkt des Projektes ist die Entwicklung einer harmonisierten Methodik zur wetterabhängigen Kalibrierung von Verkehrsmodellen mit dem Ziel der Optimierung und Weiterentwicklung von Systemen für intelligentes Verkehrsmanagement bzw. Verkehrssteuerung auf Basis der in beiden europäischen Ländern bereits vorhandenen Erfahrungen und Forschungsergebnissen. Darüber hinaus wird auch die Basis für den Vergleich verschiedener Anwendungen geschaffen, die sich zurzeit in den beteiligten Ländern im Einsatz befinden (z.B. die Plattform der Verkehrsinformationsagentur Bayern sowie die Verkehrsinformationsplattform ITS Vienna Region). Langfristig soll damit, gemäß den Vorgaben der Europäischen Kommission, eine bessere Koordinierung im Bereich Intelligente Verkehrssysteme erreicht werden.

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Die Witterung ist eine wichtige Ursache für Veränderungen im Verkehrsablauf. Wetter verändert die physikalischen Randbedingungen der Fahrbahnoberfläche und beeinflusst das Verkehrsverhalten der Verkehrsteilnehmer. Wetter verringert die Kapazität einer Straße bei Schneefall oder Starkregenereignissen, führt zu zusätzlichem Verkehrsaufkommen bei Schönwetter am Wochenende und verursacht ein höheres Unfallrisiko bei Glättebildung. Die Folge ist eine niedrigere Zuverlässigkeit, eine damit ver-

bundene schlechtere Planbarkeit von Fahrten und zusätzlichen Verlustzeiten. Abbildung 1 zeigt diese Wirkungszusammenhänge.

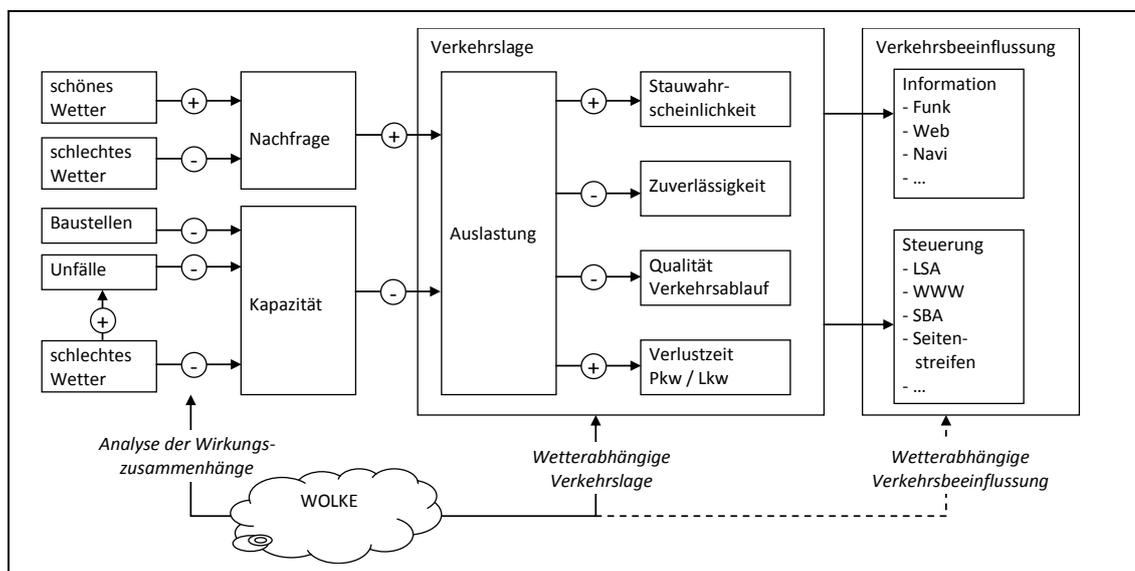


Abbildung 1: Einfluss des Wetters auf den Verkehrszustand und Ziele von Wolke

Ziel des Forschungsvorhabens WOLKE ist die Erfassung, Analyse und Modellierung der Wirkungen des Wetters auf den Verkehrsfluss von Straßenverkehrsanlagen und auf die Verkehrsnachfrage in Straßennetzen. Die Erkenntnisse werden für eine verbesserte Darstellung und Prognose der Verkehrslage genutzt. Die Analyse der Wetterereignisse erfolgt sowohl auf lokaler als auch netzweiter Ebene:

Lokale Betrachtung für Verkehrsanlagen:

Niederschläge und Glättebildung verändern die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche, Nebel und starker Niederschlag beeinträchtigen die Sichtweite. Fahrzeugführer reagieren darauf mit einer angepassten Fahrweise mit größeren Fahrzeugabständen und niedrigeren Geschwindigkeiten. Dadurch reduzieren sich die Kapazitäten der Verkehrsanlagen. Diese Wirkung muss lokal für jede einzelne Verkehrsanlage (Straßenabschnitt, Knotenpunkt) ermittelt werden, da das Ausmaß der Kapazitätsminderungen stark von der lokalen Wettersituation beeinflusst wird. Lokal unterschiedliche Kapazitätsminderungen beeinflussen die Leistungsfähigkeit des gesamten Straßennetzes.

Netzweite Betrachtung für Straßennetze:

Das regionale und überregionale Wetter kann den Verkehr im gesamten Netz beeinflussen. Im Straßenverkehr kann zusätzlicher Freizeitverkehr bei gutem Wetter insbesondere das Verkehrsaufkommen und die Zielwahl beeinflussen und so zu einer wetterabhängigen Verkehrslage führen. Im Gegensatz zur detaillierten Betrachtung steht bei diesen Untersuchungen nicht das Verhalten der Verkehrsteilnehmer in lokalen Verkehrsanlagen, sondern im gesamten Straßennetz und die Abhängigkeit des Verhaltens von verschiedenen Wettersituationen im Vordergrund. Hierbei wird

der Einfluss des Wetters auf das Verkehrsaufkommen, die Zielwahl und die Fahrzeit auf ganzen Streckenzügen untersucht.

Die deutschen Projektpartner führten die Analysen für ein Autobahnnetz in Oberbayern zwischen München, Salzburg und Kufstein (A8, A93) durch. Dieses Teilnetz ist Bestandteil des im Portals BayernInfo (www.bayerninfo.de) abgebildeten Straßennetzes. Für BayernInfo bietet die PTV AG bereits heute eine aktuelle Verkehrslage und eine Verkehrsprognose an, die aus der Kombination aktueller Messdaten und historischer Nachfragematrizen mit einem Verkehrsmodell erstellt werden. Aufbauend auf diesem Zustand soll im Projekt WOLKE eine präzisere, wetterabhängige Darstellung und Prognose der Verkehrslage erreicht werden. Dazu werden für das Untersuchungsgebiet Verkehrs- und Wetterdaten aus vorhandenen Datenquellen zusammengeführt und um zusätzliche Messdaten ergänzt. Ausgehend von der Hypothese, dass das Wetter sowohl die Kapazitäten, die Nachfrage und die Fahrzeiten beeinflusst, werden mit Kamerasystemen über einen Zeitraum von mehreren Monaten Quelle-Ziel-Daten von Fahrzeugen im Autobahnnetz erfasst. Diese Daten liefern Informationen über Fahrzeiten, Fahrtweiten und Quellen und Ziele entlang der Autobahn. Aus den Gebietskennzeichen kann im Pkw-Verkehr abgeleitet werden, ob es sich um Nahverkehr oder Fernverkehr handelt. Die Verknüpfung mit den gleichzeitig erhobenen Wetterdaten bietet die Grundlage für eine verbesserte Modellierung der Verkehrsnachfrage und damit der Verkehrslage.

Die wissenschaftlichen und technischen Ziele des Projekts lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Datenerfassung:

Es wird eine gemeinsame Datenbasis für Wetterdaten und Kenngrößen des Verkehrsflusses sowie der Verkehrsnachfrage geschaffen. Für diese Datenbasis werden Daten aus vorhandenen Messstellen aufbereitet und zusammengeführt. Außerdem werden umfangreiche Messungen zur Identifizierung der Wirkungszusammenhänge von Wetter, Zielwahl und Fahrzeit durchgeführt.

Wirkungsanalyse Wetter und Verkehrsfluss:

Die Zusammenhänge zwischen lokal gemessenen Wetterdaten und auf der Straße resultierenden Oberflächenzuständen (z.B. Schneelage auf Fahrbahn, Wasserfilmhöhe), sowie der Einfluss der Oberflächenzustände auf die Kapazität einer Verkehrsanlage werden in einer Mikroanalyse untersucht und quantifiziert.

Wirkungsanalyse Wetter und Verkehrssicherheit:

Die Zusammenhänge zwischen Wetter, Straßenzustand und Unfallkostenrate werden mit einer wetterabhängigen Sicherheitsanalyse untersucht.

Wirkungsanalyse Wetter und Verkehrsnachfrage:

Der Einfluss des regionalen Wetters und auf das Verkehrsaufkommen und auf die Zielwahl der Verkehrsteilnehmer wird für das Fernstraßennetz analysiert. Es soll ge-

klärt werden, welcher Teil der Nachfrage eher tagesabhängig (Werktag, Wochenende, Ferienbeginn) und welcher Teil der Nachfrage eher wetterabhängig ist.

Wetterabhängige Modellierung des Verkehrsflusses:

Vorhandene mikroskopische Verkehrsflussmodelle werden so erweitert, dass die Zustandsparameter der Fahrbahnoberfläche und des Fahrverhaltens typisierte Wettersituationen berücksichtigen.

Wetterabhängige Verkehrsprognose:

Es wird eine verbesserte Darstellung und Prognose der Verkehrslage bereit gestellt, die zum einen wetterabhängige Kapazitätsänderungen lokaler Verkehrsanlagen und zum anderen den wetterabhängigen Einfluss der Verkehrsnachfrage berücksichtigt.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen kurzen Überblick der angewendeten Technologien und Methoden zur Unterstützung der Erreichung der oben genannten Projektziele.

| Kernziel | Methodik | Zweck | Arbeitspaket |
|--|--|---|------------------------------------|
| Datenerfassung Wetter- und Verkehrsdaten | Datenerfassung über straßenseitige Sensorik (Verkehrsfluss, Fahrbahnzustand, Sichtweite) und Ablage in dezentraler Datenbank | Verfügbarkeit für weitere Analyseschritte sowie für die österreichischen Projektpartner | AP 3 |
| Erfassung der wetterabhängigen Fahrtweitenverteilung | Erfassung der Fahrtweiten über Kamerasysteme (Image Processing – Kennzeichenerfassung) | Verfügbarkeit für Analyse des Einflusses des regionalen Wetters auf das Verkehrsaufkommen und auf die Zielwahl im Fernstraßennetz | AP 3 |
| Korrelation Wetter und Verkehrsfluss | Analyse der Kenngrößen Verkehrsstärke, Geschwindigkeit und Zeitlücke (DE) sowie Fahrzeugfolgemedell (AT) | Zusammenhang zwischen Wetter und Kapazität zur Modelladaptierung | AP 4 |
| Korrelation Wetter und Verkehrssicherheit | Datenzusammenführung der gemessenen Werte mit vorhandenen Datenbeständen (Unfalldaten) der ZVM und teilmanuelle Analyse | Zusammenhang von Wetter, Straßenzustand und Unfallkostenrate | AP 4 |
| Wetterabhängige Modellierung des Verkehrsflusses | Definition von Datenstruktur und technischen Schnittstellen für Wetterdaten zu makro- und mikroskopischem Modell Definition der Behandlung der Wetterdaten in den beiden Modellwelten | Harmonisierte Berücksichtigung der Wetterdaten in makro- und mikroskopischen Verkehrsmodellen | AP2, AP 5, AP 6 |
| Wetterabhängigkeit der Verkehrsprognose | Dynamische Adaptierung der Nachfragematrizen und Kapazitäten innerhalb des Verkehrsmodells | Verbesserung der Grundlagendaten für makroskopisches Verkehrsmodell | AP 5, technische Umsetzung in AP 6 |

Tabelle 1: Kurzüberblick über angewendete Technologien und Methoden

2 AP2 – Spezifikation

2.1 Problemstellung und Ziel

Als Ziel dieses Arbeitspaketes gilt die Entwicklung und Zusammenfassung wetterabhängiger verkehrstechnischer Parameter. Das Resultat dieses Arbeitspaketes ist die Bestimmung von makroskopischen Parametern, für welche nach bisherigem Stand der Forschung ein Einfluss des Wetters gegeben ist. Daraus werden die für das Projekt WOLKE relevanten Parameter identifiziert. Für mickS relevant waren die folgenden Aufgaben:

- **Task 2.1: Stand der Technik zum Einfluss des Wetters auf das lokale Verkehrsgeschehen**
 - Literaturanalyse zum Stand der Technik bezüglich der Abbildung des Wettereinflusses im Rahmen lokaler (mikroskopischer) Verkehrsmodelle
 - Abstimmung mit den parallel durch österreichische Partner zu erarbeitenden bzw. bereits bestehenden Ergebnisse und Erfahrungen in diesem Bereich
 - Vergleich der Modellierungsansätze bei mikroskopischen Modellen und Identifikation von makroskopischen Größen und deren Zusammenhang mit Wettersituationen nach dem aktuellen Stand der Technik
- **Task 2.3: Vorbereitung des Systemaufbaus**
 - Entwicklung und Abstimmung der Detailplanung des Systemaufbaus auf Basis der Ergebnisse aus den Tasks 2.1 und 2.2 im Projekt und zwischen deutschen und österreichischen Partnern
 - Spezifikation der Erweiterung bestehender Systeme (Bayerninfo) bezüglich der Integration der Wetterinformationen in die Verkehrsmodellierung (bspw. Kurz- und Mittelfristprognose)
 - Spezifikation der relevanten Parameter (Inputgrößen) zur wetterabhängigen Modellierung

2.2 Spezifikation des erweiterten (bsp. automatisiertem) Zugriffs auf Wetterdaten - Kooperation mit der österreichischen Seite

Von zentraler Bedeutung für AP2 sind vor allem die Erkenntnisse auf österreichischer Seite, die aus relevanten Vorgängerprojekten (bspw. VETTER) resultierten und der deutschen Seite, zusammen mit den tiefer gehenden Einblicken der an diesen Projekten beteiligten österreichischen Projektpartner, zur Verfügung gestellt werden. Diese spielen vor allem bei der Literaturanalyse und der Erarbeitung der Grundlagen für die Projektarbeit eine Rolle.

Wie schon im Projektgebiet wider gespiegelt, wurden zwar (auf deutscher Seite) „nur“ die deutschen Autobahnabschnitte der A8 Ost betrachtet, da es sich aber um Einflüsse des Wetters handelt, die im besonderen Interesse des Projektes liegen, reichen in Deutschland erhobene Wetterdaten nicht aus. Dies trifft vor allem auf die Analyse von Veränderungen in den Nachfragedaten zu, die in Verkehrsprognosen berücksichtigt werden müssen.

Es wurde daher mit dem österreichischen Partner UBIMET, der in das österreichische Schwesterprojekt eingebunden ist, vereinbart, dass dem deutschen Projekt (über mickS) synoptische (d. h. großräumige) Wetterdaten aus dem deutsch/österreichischen Grenzgebiet übergeben werden. Hierzu wird gerade eine für alle applikable Definition der Datensätze durchgeführt, im Anschluss werden die Daten an die deutschen Partner übergeben.

Um ein gemeinsam harmonisiertes Verständnis bezüglich der Daten zu erreichen, wurde auch eine gemeinsame Spezifikation der Wetterklassifizierung erarbeitet.

2.3 Wetter und lokales Verkehrsgeschehen

Wichtig war es zunächst, Publikationen zu finden, in denen die Zusammenhänge von Fahrbahnzustand und Wettersituation auf die physikalische Fahrdynamik und auf Fahrverhalten untersucht und beschrieben worden sind. Diese Erkenntnisse können dazu beitragen, in der Analyse leichter Zusammenhänge in stark gestreuten Daten zu untermauern und Lücken in den erfassten Daten zu schließen. Außerdem sind mikroskopische Modellansätze hilfreich für das Verständnis der Vorgänge und sind Bestandteil der mikroskopischen Modellbildung.

Es konnten zu diesem Themenkomplex ca. 60 Publikationen bzw. Literaturstellen gefunden und ausgewertet werden. Grundsätzlich kann man feststellen, dass es bisher so gut wie keine Arbeiten gibt, welche versuchen den Einfluss des Witterungszustandes auf das lokale Verkehrsgeschehen vollständig zu erfassen. Überwiegend werden Teilaspekte wie z. B. Aquaplaning, starke Niederschläge betrachtet. Ansätze für Modellierung von Zusammenhängen sind ebenfalls nur über Teilaspekte und dann aber teilweise in einer Spezialisierung, wie sie für die WOLKE Zielsetzung nicht brauchbar sind. Wie zum Beispiel ein Modellansatz für die Beschreibung der Abhängigkeit des Kraftschlussbeiwertes zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche in Abhängigkeit von Reifenmaterial, Profiltiefe, Rauhtiefe der Fahrbahn, Eisschichtdicke und vieles mehr. Parameter die in einer späteren Anwendung der WOLKE Ergebnisse niemals zur Verfügung stehen können [11].

Eine schon umfassendere Sammlung von Einzelaspekten findet sich im COST Bericht [30] – auch dort kein Ansatz für ein vollständige Modellierung. Das Hinweispapier der BAST über Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA) [29] enthält

keine direkte für die Datenanalyse und Modellbildung brauchbare Angaben, da es keine ursächlichen Zusammenhänge beschreibt. Jedoch finden sich Hinweise zu den erfassten Messgrößen und die vorgenommenen Beeinflussungsregeln können später mit den Ergebnissen der Analyse und der Modellanwendung verglichen werden.

Aus der Literatur und aus bereits schon früher durchgeführten eigenen Arbeiten kristallisieren sich für WOLKE im Hinblick auf eine Modellierung des lokalen Verkehrsflusses (und damit des Fahrverhaltens) in Abhängigkeit vom Wetter folgende Schlüsselparameter heraus:

- Kraftschluss (oder Friktion) zwischen Reifen und Fahrbahn
- Sichtweite

Generell finden sich in der Literatur nur sehr spärlich fundierte Untersuchungen über die Abhängigkeit des Kraftschlussbeiwertes von konkreten Fahrbahnzustandsgrößen. Das Thema Aquaplaning und Nässe wurde vergleichsweise noch am intensivsten untersucht (siehe z.B. [8], [9], [10], [21], [19]). Allerdings sind die Abhängigkeiten nicht in Form des Kraftschlussbeiwertes, sondern als jeweilige Grenz-Geschwindigkeit ausgedrückt. Über die Geschwindigkeiten und den Kraftschlussbeiwert bei Schneematsch, Schneebedeckung und Glatteis sind kaum brauchbare systematische Untersuchungen zu finden. Einige grobe Angaben sind über Versuche in Finnland, Schweden und England zu finden [32]. Diese enthalten aber keine für die Modellbildung brauchbaren Ergebnisse.

Einige Messungen der Friktion in Abhängigkeit des Oberflächenzustandes sind in Canada bei Flugfeldern unternommen worden [24]. Das Messverfahren für den so genannten „Canadian Runway Friction Index“ (DRFI) in Abhängigkeit der „Runway Surface Condition“ (RSC) liefert Ergebnisse, welche mit dem Kraftschlussbeiwert, der für einen Modellansatz benötigt wird, durchaus vergleichbar sind.

Neben dem Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn ist die Sichtweite der entscheidende Faktor, welcher das Fahrverhalten beeinflussen kann. Die Sichtweite spielt auch eine zentrale Rolle bei der Geschwindigkeitswahl. In der Literatur finden sich Arbeiten und auch Modellansätze, teilweise mit empirischen Parametern, welche den Zusammenhang der Sichtweite mit der Niederschlagsart und –intensität beschreiben [25]. Allerdings konnte über den nicht unwesentlichen Einfluss von Sprühhahnen vorausfahrender Fahrzeuge nichts gefunden werden. Grundsätzlich sind bei der Ermittlung der für den Anhalteweg effektiven Sichtweite folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- die straßenbauliche bzw. durch die bauliche Umgebung bedingte Haltesichtweite (siehe hierzu auch [28])
- durch die Beleuchtung bedingte Sichtweite (Nacht/Tag-Unterschiede)
- durch den atmosphärischen Wetterzustand bedingte Sichtweite (Nebel, Niederschlag, Sprühhahnen)

Grundsätzlich gilt für die Sichtweite im Straßenverkehr eine Kontrastschwelle von 5%.

Folgende Wetter- und Fahrbahnzustandsparameter ergeben sich aus den Vorrecherchen, sowie den bereits vorhandenen Erkenntnissen, für einen ersten Ansatz zur Datenerfassung, die Analyse der erfassten Daten, sowie für die Modellbildung:

- Temperatur der Fahrbahnoberfläche
- Fahrbahnzustand (Trocken, Feucht, Nass, Schneebedeckt, Glatteis, Eisglätte, Reifglätte)
- Wasserfilmdicke
- Niederschlagsart und –intensität
- Lufttemperatur
- Taupunkttemperatur
- (ggf.) Windrichtung und –geschwindigkeit
- gemessene Sichtweite

Für das lokale Verkehrsgeschehen bzw. das witterungsabhängige Fahrverhalten sind nur die Glättemeldeanlagen und Umfelddaten-Meßstellen mit Sensoren in der Fahrbahn zu berücksichtigen. Die synoptischen Wetterstationen sind eher für die Untersuchung des netzweiten Verkehrsgeschehens interessant. Die Daten sind mit hoher zeitlicher Auflösung erfasst worden (1 Minute), um auch kurzzeitige Änderungen erfassen zu können.

Für die Verkehrsflussparameter ergibt sich nach den Vorüberlegungen im ersten Ansatz folgender Bedarf an Messwerten:

- mittlere Geschwindigkeit (ggf. nach Fahrzeugklassen)
- Verkehrsstärke (Fahrzeuge pro Zeiteinheit, ggf. nach Fahrzeugklassen)
- mittlere Nettozeitlücke

Die Daten sollten möglichst nach Fahrstreifen und natürlich Fahrtrichtung getrennt erfasst werden und mit einer hohen zeitlichen Auflösung, damit kurzfristige Änderungen erfasst werden können. Ebenso sollte das Spurwechselerhalten beurteilt werden können.

2.4 Systemaufbau

2.4.1 Systemaufbau Straßenwetterplattform

Im VIB System ist die Komponente S3 (Wetterplattform) für alle verkehrsrelevanten Wetter- und Umfelddaten zuständig. Neben Wettermeldungen, die auf Landkreisgebiete bezogen sind, generiert die Wetterplattform dynamisch auf kleinräumige Streckenabschnitte bezogene Wetter- und Straßenzustandsmeldungen und –warnungen. Bisher

fließen weder aktuelle noch prognostizierte, von der Wetterplattform ermittelten Straßenzustände, in die lokale Verkehrslageprognose ein. Ebenso werden die Wetterzustände nicht bei der Routenwahl und der Reisezeitberechnung berücksichtigt. Ziel ist es diese Lücke zu schließen. Die Struktur der Wetterplattform ist in Abbildung 2 dargestellt.

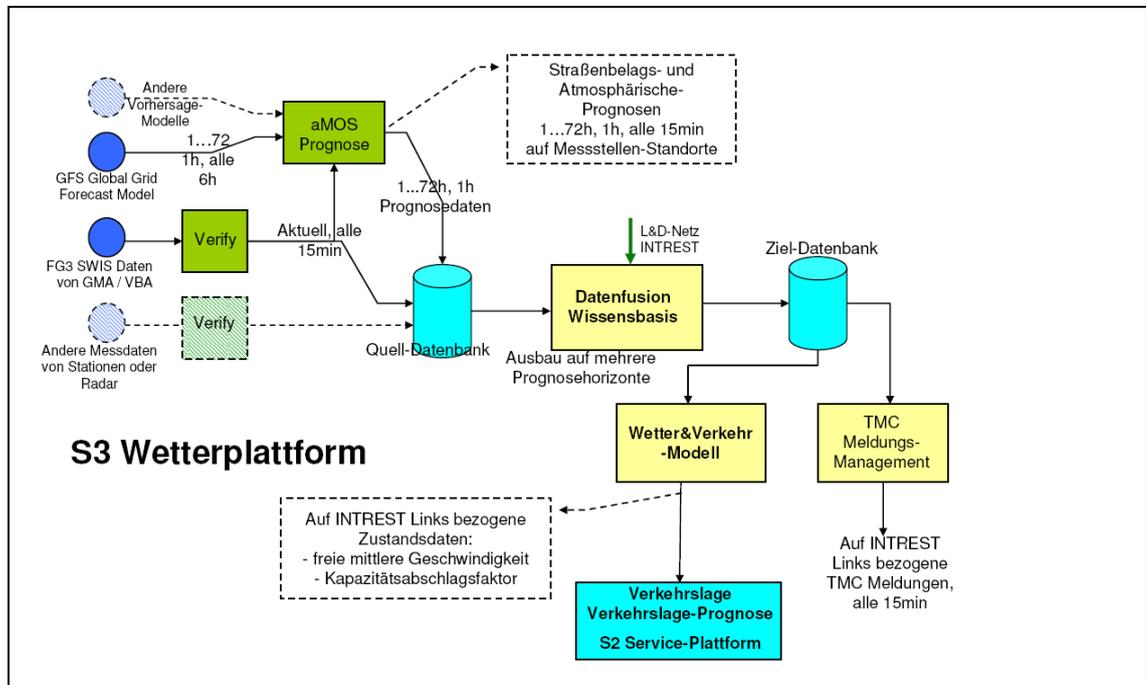


Abbildung 2: Datenfluss auf der VIB S3 Wetterplattform

Dabei gilt es, die Schnittstelle zwischen Wetterplattform und Verkehrsmodellen, sowie Routenplanung so zu wählen, dass einerseits die Komponenten, auf denen die Verkehrsmodelle und Routenplanung laufen, keine einzelnen Wetter- und Umfeld-Daten verarbeiten müssen und umgekehrt die Wetterplattform keine dynamischen Verkehrsdaten verarbeiten muss. Die Wetterplattform muss die Wetter- und Straßenzustände aus allen erfassbaren Rohwetterdaten bestimmen bzw. prognostizieren und den Einfluss der Wetterzustände auf das Fahrverhalten abbilden können, unabhängig von der zum betreffenden Zeitpunkt gerade vorherrschenden Verkehrssituation.

Für die mikroskopischen Modellentwicklung erschienen dazu folgende zwei Attribute, in Abhängigkeit des jeweils ermittelten oder prognostizierten Straßenzustands am besten geeignet:

freie mittlere Geschwindigkeit [km/h]

Kapazitätsabschlagsfaktor (von der jeweiligen verkehrlichen Kapazität) [%]

Die Abbildung des lokalen Wiedereinflusses auf den Verkehrsfluss in der Wetterplattform ist in Abbildung 3 dargestellt.

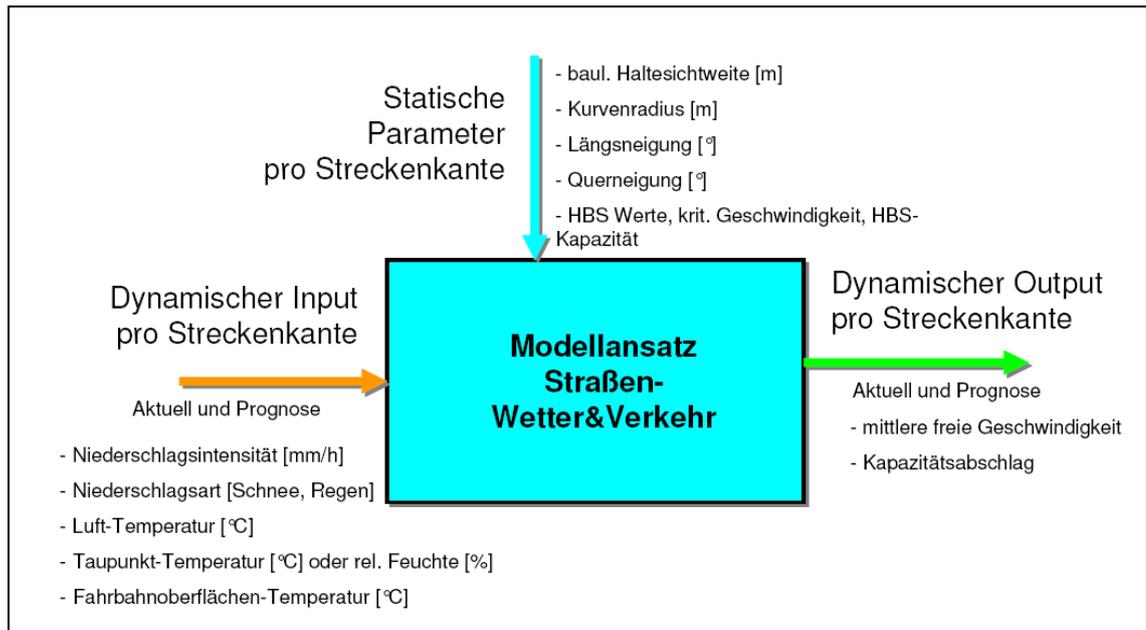


Abbildung 3: Abbildung des Straßenwetterzustands auf den Verkehrsfluss in der Wetterplattform

Grundsätzlich muss die Wetterplattform in der Lage sein, diese Attribute auf kleinräumige Streckenabschnitte bezogen dynamisch (z.B. alle 15 min) abzugeben.

Die Verkehrsmodelle müssen in der Lage sein, mit diesen wetterabhängigen Attributen, die zum betreffenden Zeitpunkt und dem betreffenden Streckenabschnitt herrschende Verkehrslage zu berechnen und bei der Routenplanung eine auf die Wettersituation angepasste Reisezeit zu bestimmen.

3 AP3 – Datenerfassung

3.1 Problemstellung und Ziel

Um Wirkungszusammenhänge zwischen Wetter und Verkehr quantifizieren zu können, sind Daten erforderlich, die Informationen über den Zusammenhang zwischen Wetter und Verkehr enthalten. Dazu müssen bereits erfasste Wetterdaten aus Wetterstationen sowie aus der straßenseitigen Umfelddatenerfassung und Verkehrsdaten aus stationären Detektoren zusammengeführt werden. Außerdem werden mit projektspezifischen Erhebungen zusätzliche Daten gewonnen, die insbesondere Aussagen zu den Wirkungszusammenhängen zwischen Wetter, Verkehrsnachfrage und Fahrzeit ermöglichen.

Im Arbeitspaket Datenerfassung wurden alle projektrelevanten Messdaten erfasst und aufbereitet. Es werden folgende Kategorien von Messdaten unterschieden:

lokale Wetterdaten: Daten der straßenseitigen Straßenwetterstationen

regionale Wetterdaten: Daten der Wetterstationen im Untersuchungsgebiet

Straßenoberflächendaten: Straßenzustandsdaten aus BAYSIS

lokale Verkehrsdaten: Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten aus stationären Detektoren

großräumige Verkehrsnachfragedaten: Quelle-Ziel-Daten aus Kennzeichenerfassung

Fahrzeitdaten: Fahrzeitdaten aus Kennzeichenerfassung

Unfalldaten: Unfalldaten aus der Unfalldatenbank

Untersuchungsgebiet ist die A8 zwischen München und Salzburg sowie die A93 zwischen Inntaldreieck und Kufstein.

Für mickS waren folgende Aufgaben relevant:

Task 3.1: Aufbau einer Messdatenbank

Aufbau und Versorgung einer Messdatenbank, in der alle projektrelevanten Messdaten abgelegt werden. In diesem Arbeitsschritt werden auch die Netzmodelle mit den projektrelevanten Streckennetzen definiert und mit den Positionen der Messstationen als statische Daten in die Messdatenbank eingepflegt.

Task 3.2: Versorgung der Messdatenbank mit Wetterdaten

Für einen Analysezeitraum von mindestens einem Jahr werden lokale und regionale Wetterdaten (Temperatur, Niederschlagsmenge, Niederschlagsart, Luftfeuchte etc.) aus dem Straßen-Wetter-Informationssystem (SWIS) und Daten des Deutschen Wetterdienstes für die im Projekt berücksichtigten Bundesautobahnen übernommen.

Desgleichen werden für das Testgebiet im Raum Wien die projektrelevanten Wetterdaten von den österreichischen Partnern übernommen

Task 3.6: Erarbeitung von Verfahren zur Verifikation insbesondere der Straßenwetterdaten und deren Plausibilitätsprüfung sowie Bildung von Ersatzwerten

Hierbei werden Verfahren erarbeitet, die eine Verifikation der Straßenwetterdaten u.a. durch Plausibilitätsprüfungen erlauben. Für nicht verifizierbare bzw. ungültige Werte werden im Rahmen des Verfahrens sinnvolle Ersatzwerte gebildet.

3.2 Kooperation mit der österreichischen Seite

Wie in der Spezifikationsphase avanciert werden unterschiedliche Datentypen beiderseits der Grenze von den jeweiligen Projektpartnern bereitgestellt. Diese umfassen auf österreichischer Seite synoptische Wetterdaten aus dem österreichischen Grenzgebiet.

3.3 Abgrenzung Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet ist geographisch grob durch das BAB Kreuz München Süd (BAB A99/A8 Ost) sowie den Grenzen zu Österreich nahe Kufstein und Salzburg umrissen. Die folgende Abbildung zeigt den Umgriff des Untersuchungsgebiets.



Abbildung 4: Demonstrationsgebiet auf deutscher Seite (Quelle: Google Maps)

Das Demonstrationsgebiet wird begrenzt von den Kamerastandorten, die ebenfalls in der Karte dargestellt sind. Mit einer Gesamtlänge von ca. 140 km stellt das Testgebiet die Hauptroute für den Freizeit und Güter-/Geschäftsverkehr mit Ziel Italien und Ost-/Südosteuropa dar.

Ferien- und Freizeitverkehre mit den Zielen Tegernsee/Chiemsee/Tirol/Salzburg bzw. Italien und Österreich haben besonders am Wochenende und zur Ferienzeit einen hohen Anteil am Gesamtverkehrsaufkommen. Der Freizeitverkehr tritt hierbei sowohl im Winter als auch im Sommer gleichermaßen auf. Diese Verkehre stehen bei Wolke im Fokus der wetterabhängigen Fahrtweitenuntersuchung.

Über die Detektionsdaten in den Bereichen der Verkehrsbeeinflussungsanlagen können die Zusammenhänge zwischen Witterung und Verkehrsverhalten im Modell nachgebildet werden. Da das österreichische Staatsgebiet direkt an den Untersuchungsraum angrenzt, werden auch Daten aus dem grenznahen österreichischen Bereich mit in die Analysen einfließen, der geographische Projektumfang jedoch dadurch nicht tangiert, da sich die Analysen der deutschen Projektpartner (größtenteils - hier wurde auf verschiedenen Ebenen eine Zusammenarbeit mit dem österreichischen Schwesterprojekt definiert) auf den deutschen Raum fokussiert sind.

3.4 Aufbau der Messdatenbank

Um die Anforderungen und Ansprüche der Projektpartner an die Daten zu dokumentieren und den Austausch von Daten zu vereinfachen, wurde in Rahmen vom Projekt WOLKE eine Datenbankspezifikation erstellt. Die Struktur dieser Messdatenbank ist in Abbildung 5 dargestellt. Grundsätzlich orientiert sich der Aufbau am INTREST-Datenmodell. Eine detaillierte Beschreibung einzelner Datenarten erfolgt in den weiteren Kapiteln. Die vollständige Datenbankspezifikation findet sich im Anhang dieses Dokuments.

Grundlegend wird in statische und dynamische Daten unterschieden. Statische Daten sind Daten die nicht erhoben werden oder über den gesamten Untersuchungszeitraum konstant sind bzw. keinen zeitlichen Bezug besitzen. Diese umfassen

Infrastrukturdaten des Straßennetzes, bestehend aus Strecken und Knoten mit entsprechenden Attributen,

Messquerschnitte, bestehend aus Straßenwetter- und Umfelddaten-Messstationen, Dauerzählstellen und Kamerasystemen, die in der Regel aus mehreren Sensoren, Detektoren bzw. Kameras bestehen,

Anzeigequerschnitte,

Synoptische Wetterstationen,

TMC-Netz, bestehend aus TMC-Knoten und Abschnitten

und Kalenderdaten, bestehend aus Angaben zu Feiertagen und Ferientagen der Bundesländer und Nachbarstaaten.

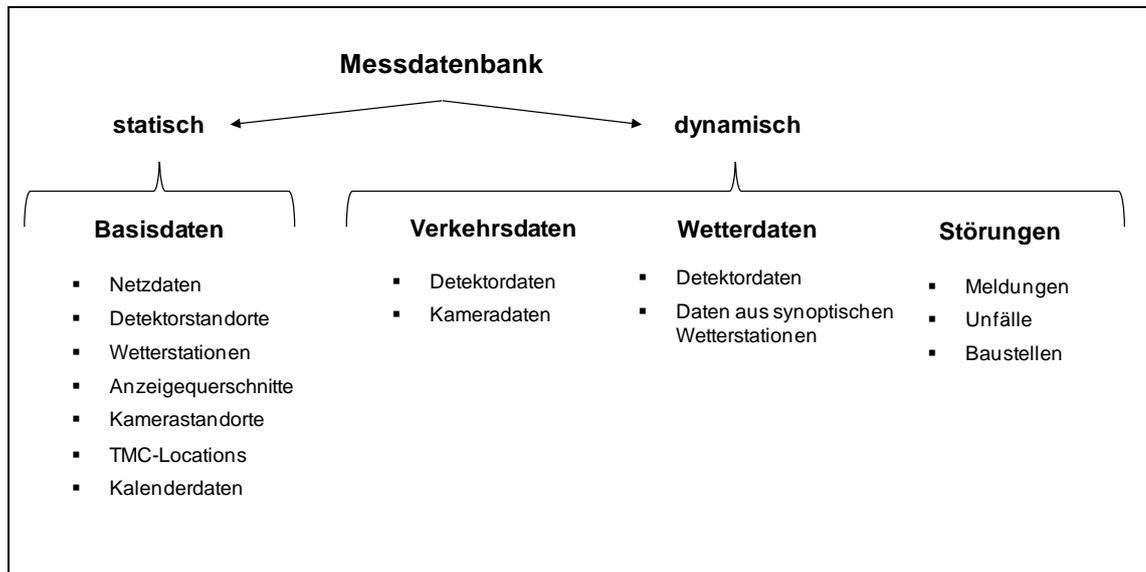


Abbildung 5: Struktur der Messdatenbank

Dynamische Daten sind solche Daten, die einen zeitlichen Bezug besitzen und über den Untersuchungszeitraum veränderlich sind. Dies sind Verkehrsdaten aus Dauerzählstellen und den Kamerasystemen, Wetterdaten aus Straßen-Messstationen, Glättemeldeanlagen und synoptischen Wetterstationen und weitere Daten, hier als Störungen bezeichnet, die den Verkehrszustand direkt beeinflussen, wie Baustellen, Unfälle und die daraus entstehenden TMC-Meldungen. Alle dynamischen Daten sind mit zwei zeitbezogenen Attributen versehen: Zum einen der Gültigkeitsbeginn und zum anderen die Gültigkeitsdauer des Datensatzes. Der räumliche Bezug ist über einen eindeutigen Verweis auf das zugehörige statische Netzelement (z.B. ID des Detektors oder des Anzeigequerschnitts) vorhanden. Für alle dynamischen Daten erfolgte eine Erstellung von Schnittstellen, um die Daten automatisiert in die WOLKE-Datenbank aufnehmen zu können.

Voraussetzung für die Datenanalyse und die Ableitung der Wirkungszusammenhänge in AP4 und AP5 ist eine räumliche und zeitliche Zuordnung der erhobenen und archivierte Daten. Die zeitliche Zuordnung der gegebenen Daten ist über einen einheitlichen Zeitstempel gegeben, mit dem alle dynamischen Daten versehen sind. Die räumliche Zuordnung erfolgt über eine Verortung aller statischen Daten in einem Projektnetz, vgl. Abbildung 6. Das Projektnetz wird auf Grundlage des in der VIB verwendeten INTREST-Netzes erstellt und enthält alle Aktualisierungen der Netzelemente bis 2011. In diesem Streckennetz werden alle Dauerzählstellen, Anzeigequerschnitte der Streckenbeeinflussungsanlagen und Wettermessquerschnitte aufgenommen (vgl. Abbildung 6) und das Kilometrierungssystem der Autobahnen im Streckennetz hinterlegt. Darüber hinaus werden die synoptischen Wetterstationen, die Kameramessquerschnitte und die TMC-Locations in das Projektnetz aufgenommen (vgl. Abbildung 7).

Die Zuordnung der TMC-Locations erfolgte richtungsbezogen zur entsprechenden Strecke im Projektnetz. Insgesamt wurden 67 TMC-Locations in beiden Richtungen entlang der A8 und der A93 in das Projektnetz aufgenommen. Zusätzlich wurden zwischen den TMC-Locations, die den Knoten des TMC-Abschnitts entsprechen, TMC-Abschnitte definiert, die den Strecken des TMC-Netzes entsprechen. Das TMC-Netz innerhalb des Untersuchungsgebiets umfasst demnach 130 gerichtete TMC-Abschnitte. Alle Messquerschnitte (Kameras, Wettermessquerschnitte und lokale Verkehrsdatenerfassung) sind über die Zuordnung vom Projektnetz zum TMC-Netz einer Projektnetzstrecke und einem TMC-Abschnitt zugeordnet. Darüber hinaus ist die Lage durch die Angabe der Autobahn, der Richtung und die Kilometrierung hinterlegt (siehe Datenbankspezifikation im Anhang).

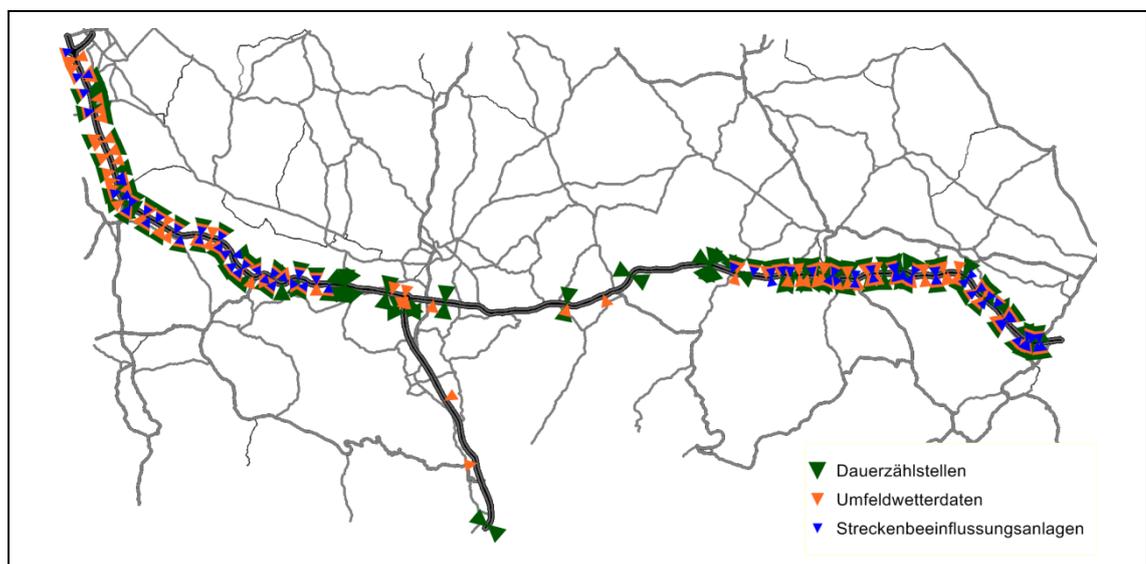


Abbildung 6: Projektnetz des Untersuchungsgebiets mit verorteten Dauerzählstellen, Umfelddatenerfassung und Anzeigequerschnitten der SBA

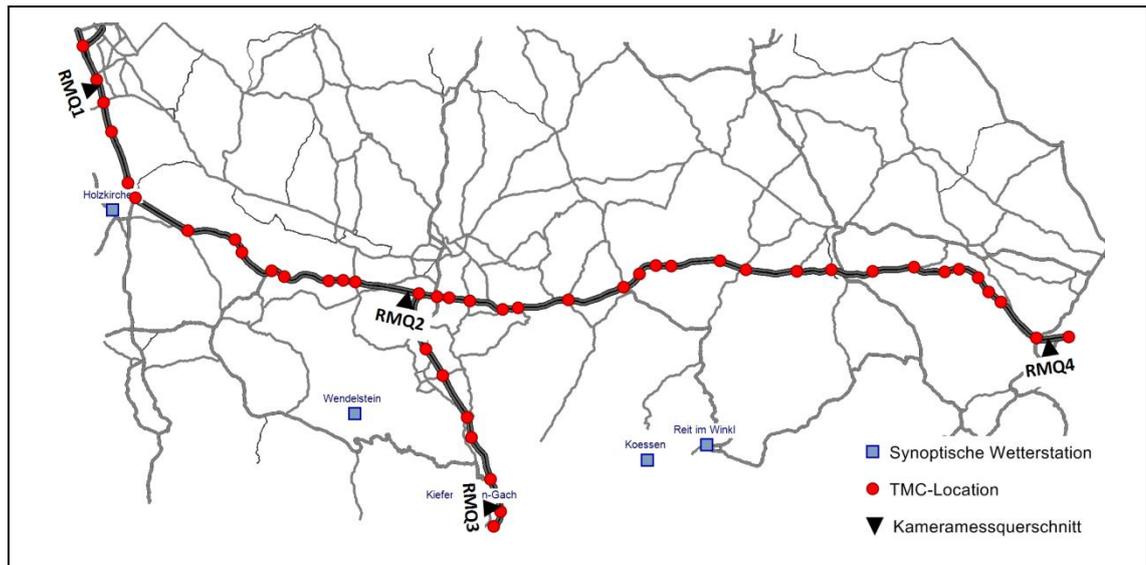


Abbildung 7: Projektnetz des Untersuchungsgebiets mit TMC-Locations, Kamera-messquerschnitten und synoptischen Wetterstationen

3.5 Erhebung der Wetterdaten

3.5.1 Erhebungsmethode

Grundsätzlich sind zwei Quellen für Wetterdaten zu unterscheiden:

Straßenwettermessstellen im SWIS und SBA auf der Autobahn A8 im Bereich der Unterzentralen Holzkirchen und Siegsdorf auf der Strecke München – Salzburg

Synoptische Wetterstationen der Wetterdienste im Zielgebiet München, Kufstein, Salzburg in Bayern und im grenznahen Österreich

Aus dem bei micKS vorhandenen Kenntnissen über die prinzipiell vorhandenen Messmöglichkeiten und den Vorrecherchen über den Bedarf wurde zusammen mit der UniS eine Spezifikation über die Datenbank für die wetterrelevanten dynamischen Daten, sowie die statischen Eigenschaften der Datenquellen erstellt. Die Struktur der Datenbanktabellen ist in Kapitel 3.4 und im Anhang näher beschrieben.

Die Daten der Umfelddatenstationen und Straßenwettermessstellen im SWIS werden in der Verkehrsrechnerzentrale Freimann der ABDS (Autobahndirektion Südbayern) im Rahmen der Verkehrsbeeinflussungsanlage auf der A8 im Bereich der Unterzentrale Holzkirchen und Siegsdorf erfasst und archiviert. Die Daten sind von der ZVM bzw. ABDS aus einem komplizierten Archivsystem über Filter herausgezogen und auf Datenträger gespeichert an micKS übergeben worden. Da das Archiv-Format sich erheblich vom im WOLKE benötigten Datenformat unterscheidet, mussten die Daten von micKS in die in WOLKE zur weiteren Analyse benötigten Form umcodiert werden und

stehen jetzt entweder in CSV (= comma separated values) formatierten Textdatei oder als ACCESS-Datenbank zur Verfügung.

Die Daten der synoptischen Wetterstationen wurden vom DWD gegen eine einmalige Bereitstellungsgebühr in Form einer CSV Textdatei zur Verfügung gestellt. Ebenso wurden vom Verbundpartner UBIMET die Wetterdaten der synoptischen Stationen aus Österreich für uns kostenlos auch in Form einer CSV Textdatei zur Verfügung gestellt.

Alle Wetterdaten wurden von mickS für die anderen Partner über einen FTP Server bereitgestellt.

Die historischen Daten sind zum größten Teil von Januar 2008 bis September 2011 vorhanden. Es ist geplant im März 2012 die restlichen Daten in gleicher Weise noch zu erfassen, damit die aktuelle Winterperiode vollständig abgedeckt ist.

3.5.1.1 Geographische Lage der Datenquellen

Die Kartenübersicht zeigt die ungefähren Standorte der Wetterdatenquellen im Zielgebiet (die österreichischen Wetterstationen sind dort noch nicht enthalten).

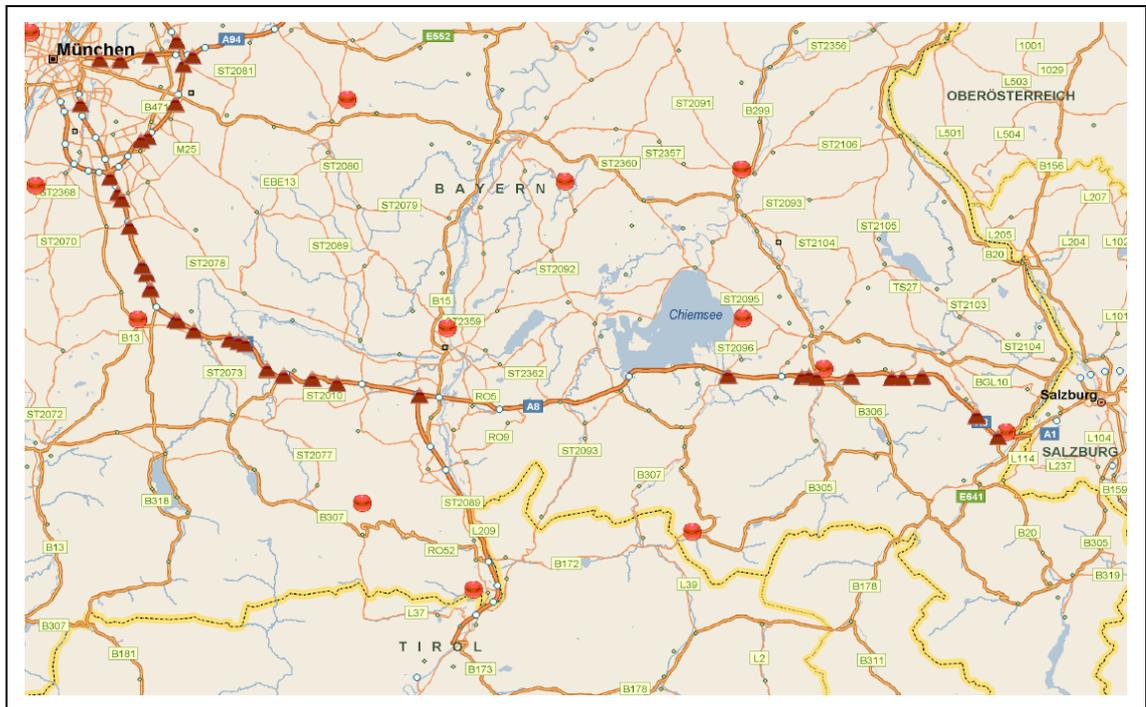


Abbildung 8: Grobe Übersicht über das Zielgebiet in Bayern und die Standorte der Datenquellen (▲ = Straßenwetter; ● = synoptische Wetterstation)

Eine genaue Liste aller Messquerschnitte für Straßenwetter- und Umfelddaten und deren archivierten Datentypen ist in Tabelle 2 wiedergegeben.

| CODE | XCOORD | YCOORD | DIREC | BAB | KM | SUBCENTER | FBT | FBZ | GT | LT | NA | NI | NS | R/LF | R/S | SW | TPT | TT1 | TT3 | WGM | WR |
|-------------|--------|--------|-------|-----|--------|-------------|-----|-----|----|----|----|----|----|------|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|
| BRUN2_Sbg_H | 12,09 | 47,81 | 1 | A8 | 54,36 | Holzkirchen | X | X | X | X | | | | X | | | X | X | | | |
| FORST_Mch_H | 11,7 | 47,92 | 2 | A8 | 21,1 | Holzkirchen | X | X | X | X | | | | X | | | X | X | X | X | X |
| PERL_Mch_H | 11,61 | 48,09 | 2 | A8 | 1,38 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | | | X | | | X | X | | | |
| Q25_Sbg_H | 11,65 | 48,02 | 1 | A8 | 9,99 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | | X | | X | X | X | | | |
| Q29_Mch_H | 11,67 | 48 | 2 | A8 | 11,76 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q29_Sbg_H | 11,66 | 48 | 1 | A8 | 11,76 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q33_Mch_H | 11,68 | 47,97 | 2 | A8 | 15,65 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q33_Sbg_H | 11,68 | 47,97 | 1 | A8 | 15,62 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q37_Mch_H | 11,7 | 47,93 | 2 | A8 | 20,12 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q37_Sbg_H | 11,7 | 47,93 | 1 | A8 | 20,12 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q43_Mch_H | 11,71 | 47,91 | 2 | A8 | 23,3 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q43_Sbg_H | 11,71 | 47,91 | 1 | A8 | 23,3 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q49_Mch_H | 11,75 | 47,88 | 2 | A8 | 27,3 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q49_Sbg_H | 11,75 | 47,88 | 1 | A8 | 27,3 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q55_Mch_H | 11,77 | 47,87 | 2 | A8 | 30,45 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q55_Sbg_H | 11,77 | 47,87 | 1 | A8 | 30,45 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q59_Mch_H | 11,82 | 47,86 | 2 | A8 | 33 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q59_Sbg_H | 11,82 | 47,86 | 1 | A8 | 33 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q62_Mch_H | 11,83 | 47,86 | 2 | A8 | 35,37 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q62_Sbg_H | 11,84 | 47,86 | 1 | A8 | 35,37 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q69_Mch_H | 11,87 | 47,83 | 2 | A8 | 39,05 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q69_Sbg_H | 11,87 | 47,83 | 1 | A8 | 39,05 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q75_Mch_H | 11,9 | 47,82 | 2 | A8 | 41,22 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q75_Sbg_H | 11,9 | 47,82 | 1 | A8 | 41,22 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q83_Mch_H | 11,94 | 47,82 | 2 | A8 | 44,3 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q83_Sbg_H | 11,94 | 47,82 | 1 | A8 | 44,3 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q89_Mch_H | 11,97 | 47,82 | 2 | A8 | 47,02 | Holzkirchen | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q89_Sbg_H | 11,97 | 47,82 | 1 | A8 | 47,02 | Holzkirchen | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q203_Mch | 12,51 | 47,83 | 2 | A8 | 89,65 | Siegsdorf | | | | | | X | X | | | X | | | | | |
| Q205_Mch | 12,52 | 47,83 | 2 | A8 | 90,15 | Siegsdorf | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q205_Sbg | 12,52 | 47,83 | 1 | A8 | 90,15 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q223_Mch | 12,62 | 47,82 | 2 | A8 | 96,95 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q223_Sbg | 12,62 | 47,82 | 1 | A8 | 96,95 | Siegsdorf | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q225_Mch | 12,63 | 47,82 | 2 | A8 | 98,17 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q225_Sbg | 12,63 | 47,82 | 1 | A8 | 98,17 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q231_Mch | 12,64 | 47,82 | 2 | A8 | 99,48 | Siegsdorf | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q231_Sbg | 12,64 | 47,82 | 1 | A8 | 99,48 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q238_Mch | 12,69 | 47,82 | 2 | A8 | 103,26 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q238_Sbg | 12,69 | 47,82 | 1 | A8 | 103,26 | Siegsdorf | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q249_Mch | 12,75 | 47,82 | 2 | A8 | 107,6 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q249_Sbg | 12,75 | 47,82 | 1 | A8 | 107,6 | Siegsdorf | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q251_Mch | 12,76 | 47,82 | 2 | A8 | 108,6 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q251_Sbg | 12,76 | 47,82 | 1 | A8 | 108,6 | Siegsdorf | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q256_Mch | 12,79 | 47,82 | 2 | A8 | 110,97 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q256_Sbg | 12,79 | 47,82 | 1 | A8 | 110,97 | Siegsdorf | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q257_Sbg | 12,81 | 47,82 | 1 | A8 | 112,8 | Siegsdorf | | | | | | X | X | | | X | | | | | |
| Q261_Sbg | 12,84 | 47,81 | 1 | A8 | 117,51 | Siegsdorf | | | | | | X | X | | | X | | | | | |
| Q267_Mch | 12,86 | 47,78 | 2 | A8 | 117,99 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q267_Sbg | 12,86 | 47,78 | 1 | A8 | 117,99 | Siegsdorf | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Q275_Mch | 12,89 | 47,76 | 2 | A8 | 121,25 | Siegsdorf | X | X | X | | | | | X | | | X | | | | |
| Q275_Sbg | 12,89 | 47,76 | 1 | A8 | 121,24 | Siegsdorf | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |

Tabelle 2: Liste der Standorte der archivierten WQ Messstationen und deren Datentypen (nähere Erläuterungen im Text)

Für die Stationen liegt die grobe geogr. Position in Längen- (XCOORD) und Breitengraden (YCOORD) vor. Für die Zuordnung zu den Verkehrsdaten wird jedoch die Zugehörigkeit zu den Knoten bzw. Kanten des digitalen INTREST Kartenmodells des Freistaats Bayern verwendet. Die Zuordnung ist von UniS in der Basisdatenbank vorgenommen worden. Ersatzweise kann auch die Kilometrierung dafür verwendet werden. Verlässliche und vollständige Angaben über die geogr. Höhe über NN liegen von den Straßenwetterstationen der A8 derzeit leider nicht vor.

Ebenso fehlen vollständige Informationen darüber, welche Technologien bei den Messstationen zur Anwendung kommen, um die Messdaten insbesondere der Fahrbahnzustandsgrößen besser interpretieren zu können. Da man aber die in Frage kom-

menden Technologien eingrenzen kann, dürften deshalb keine nennenswerten Probleme bei der Datenauswertung zu erwarten sein.

Für die Datenanalyse zur Mikromodellierung wird es genügen einige geeignet ausgewählte Standorte zu betrachten.

Die folgende Tabelle 3 enthält die Liste aller Standorte der zur Verfügung stehenden synoptischen Wetterstationen und der erfassten Datentypen.

| CODE | NAME | L | B | H | Gebiet | Land | NM | NI | NS | LT | Sos | RLF | WR | WGM |
|-------|--------------------|--------|--------|-------|--------|------|----|----|----|----|-----|-----|----|-----|
| P856 | Holzkirchen | 11,698 | 47,883 | 685 | MB | D | X | X | X | X | X | X | | |
| P532 | Kösching | 11,489 | 48,831 | 417 | EI | D | X | X | X | X | X | X | | |
| 10865 | München-Stadt | 11,544 | 48,164 | 515,2 | M | D | X | X | X | X | X | X | X | X |
| P975 | Kiefersfelden-Gach | 12,168 | 47,619 | 518 | RO | D | X | X | X | X | X | X | | |
| 10980 | Wendelstein | 12,013 | 47,704 | 1832 | MB | D | X | X | X | X | X | X | X | X |
| P982 | Reit im Winkl | 12,471 | 47,676 | 685 | TS | D | X | X | X | X | X | X | | |
| AT001 | Seefeld | 11,175 | 47,333 | 1182 | SF | AT | X | X | | X | X | X | X | X |
| AT002 | Patscherkofel | 11,462 | 47,21 | 2247 | PK | AT | X | X | | X | X | X | X | X |
| AT003 | Kufstein | 12,163 | 47,575 | 493 | KU | AT | X | X | | X | X | X | X | X |
| AT004 | Hahnenkamm | 12,362 | 47,419 | 1790 | HK | AT | X | X | | X | X | X | X | X |
| AT005 | Achenkirch | 11,705 | 47,533 | 906 | AK | AT | X | X | | X | X | X | X | X |
| AT006 | Salzburg | 13,052 | 47,791 | 420 | SB | AT | X | X | | X | X | X | X | X |
| AT007 | Innsbruck | 11,35 | 47,267 | 584 | IB | AT | X | X | | X | X | X | X | X |
| AT008 | Kitzbuehel | 12,393 | 47,448 | 744 | KB | AT | X | X | | X | X | X | X | X |
| AT009 | Koessen | 12,394 | 47,663 | 589 | KS | AT | X | X | | X | X | X | X | X |

Tabelle 3 Liste der für WOLKE ausgewählten synoptischen Wetterstationen und die dazugehörigen Datentypen.

3.5.1.2 Erläuterungen zu den erhobenen Straßenwetterdaten

| Abz. | Datentyp | Einheit | Bemerkung |
|------|----------------------------|---------|---------------------|
| LT | Lufttemperatur | °C | |
| RLF | Relative Luftfeuchte | % | |
| TPT | Taupunkttemperatur | °C | |
| RS | Restsalzgehalt | % | |
| FBT | Fahrbahntemperatur | °C | |
| GT | Gefriertemperatur | °C | |
| WFD | Wasserfilmdicke | mm | nicht archiviert !! |
| TT1 | Tiefentemperatur 5...15 cm | °C | |
| TT3 | Tiefentemperatur ca. 30 cm | °C | |
| FBZ | Fahrbahnzustand | Enum | siehe Tabelle 5 |
| SW | Sichtweite | m | |
| NI | Niederschlagsintensität | mm/h | |
| NA | Niederschlagsart | Enum | siehe Tabelle 7 |

| Abkz. | Datentyp | Einheit | Bemerkung |
|-------|------------------------------|---------|---------------------------|
| NS | Niederschlagsart [WMO] | Enum | siehe Tabelle 6 |
| WGM | Mittlere Windgeschwindigkeit | m/s | |
| WR | Windrichtung | ° | Kompassrichtung 0°...359° |

Tabelle 4 Liste der für WOLKE benötigten Datentypen bzw. Messgrößen von Umfelddatenstationen auf der Autobahn

Die obige Liste gibt die grundsätzlich erfassten und für die Datenauswertung in WOLKE interessanten Datentypen wieder. Im Folgenden werden die einzelnen Messgrößen bzw. Datentypen näher erläutert.

Zeitstempel

In WOLKE werden alle Zeitangaben für die dynamischen Daten einheitlich auf Basis der koordinierten Weltzeit UTC (Universal Time Coordinated) bezogen. Die Umfelddaten aus dem VRZ und die synoptischen Wetterdaten sind auf die lokale Zeit (MEZ = Mitteleuropäische Zeit oder CET = Central European Time) mit Winter-/Sommerzeit bezogen. Die Daten sind für die WOLKE Datenbank entsprechend konvertiert worden.

Grundsätzlich gilt bei den SWIS, Umfelddaten und synoptischen Wetterstationen, dass der Zeitstempel immer den Zeitpunkt markiert, bei dem der Erfassungs- bzw. Messzyklus abgeschlossen ist. D.h. bei Mittelwerten über längeren Zeitraum (z.B. 10 Minuten oder 1 Stunde) beziehen sich die Daten immer auf das dem Zeitstempel vorangegangene Zeitintervall.

Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur (FBT)

Die Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur kann im Prinzip als sehr zuverlässig angesehen werden. In der Regel ist der Temperaturfühler in der Sonde platziert, welche in die Fahrbahndecke eingebaut ist. Durch Unterschiede in der Materialeigenschaft, je nach Sensortyp, muss man natürlich damit rechnen, dass die Temperatur am Sensor von der Oberflächentemperatur des umgebenden Belags etwas abweicht. Die Abweichung ist stark von der gerade stattfindenden Ab- oder Einstrahlung abhängig und kann $\pm 1^\circ \dots 2^\circ\text{C}$ betragen. Trotz allem ist dieser Messwert für die Entscheidung, ob Eisbildung stattfinden kann oder nicht, am zuverlässigsten anzusehen. Der dazu notwendige Vergleichswert, die Gefrieretemperatur, ist demgegenüber erheblich ungenauer.

Messung der Gefrierpunkttemperatur (GT)

Bei den neueren Glättemeldeanlagen auf der A8 München – Salzburg werden so genannte „passive“ Sensoren (VAISALA DM31) eingesetzt. Das bedeutet, dass die Gefrierpunkttemperatur indirekt, ohne Beeinflussung des Oberflächenzustands, gemessen

wird. Die indirekte Messung basiert auf dem Leitwert der dissoziierten Lösung mit Taumittel auf Salzbasis. Das Messverfahren ist beeinflusst durch die Temperatur der Lösung, die Wasserfilmdicke und die chemische Zusammensetzung des Taumittelsalzes. Die chemische Taumittelzusammensetzung ist im Bereich des Winterdienstes auf Autobahnen kein großes Problem, da unter normalen Einsatzbedingungen immer in etwa eine ähnliche Mischung an Tausalzen verwendet wird (z.B. FS30 NaCl mit ca. 1/3 20%ige CaCl₂-Lösung). Selbst unter der Voraussetzung, dass der Leitwert optimal mit der Temperatur und der Wasserfilmdicke kompensiert ist und die richtige Kalibrierkurve für die Gefriertemperatur verwendet wird, ist die Messung dennoch erheblich von äußeren Störeinflüssen und physikalischen Randbedingungen behaftet. Die Randbedingungen betreffen grundsätzlich alle bekannten Messverfahren – auch aktive.

Eine Randbedingung ist die Menge der Lösung auf der Messeinrichtung. Bei zu geringer Wasserfilmdicke (< 0,1 mm bei alten Anlagen) wird die Messung zu ungenau. Im Gegensatz zu aktiven Sensoren stellt bei passiven Messverfahren eine zu große Lösungsmenge kein Problem dar. Ein weiterer Effekt ist bei Übersättigung der Lösung zu berücksichtigen. Verdunstet bei gleicher Salzmenge pro Fläche das Wasser zunehmend, wird die Lösung zunehmend konzentrierter und gerät in die Übersättigung. Bei einer übersättigten Lösung sinkt der Leitwert stark wieder ab. Damit sinkt der Wert für den Restsalzgehalt. Das gleiche passiert umgekehrt bei kondensierender Feuchte auf der Oberfläche bei Vorhandensein von Restsalz. Das führt dazu, dass die Sonden Feuchte bzw. Nässe erkennen, das gemessene Restsalz entspricht aber nicht dem tatsächlich vorhandenen Taumittel, was in Folge von Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zu Glättewarnung führt, obwohl tatsächlich keine Glättebildung zu erwarten ist. Abbildung 9 zeigt den Effekt bei gleicher Taumittelmenge und unterschiedlicher Wassermenge.

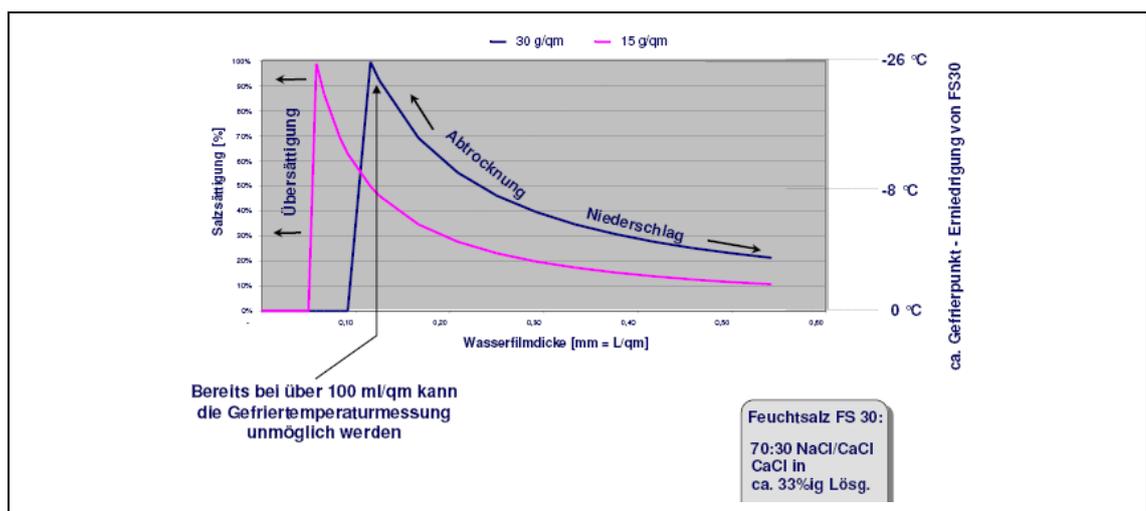


Abbildung 9: Sättigung und Gefriertemperatur bei Taumittelösung

Ein weiterer wesentlicher Effekt für die Beurteilung des Fahrbahnzustandes ist die Inhomogenität der Taumittelverteilung und –wirkung über die Fahrbahnoberfläche. Das folgende Foto soll das eindrucksvoll zeigen. Bei einem Versuch in Österreich wurde

Taumittel mit einer fluoreszierenden Chemikalie angereichert. Nach sorgfältig gleichmäßigem Aufsprühen einer Salzsole auf der Autobahn, wurde nach kurzer Zeit, bei normalem Verkehr, mit einer Filterkamera und UV-Beleuchtung folgendes Bild (Abbildung 10) erzeugt.



Abbildung 10: UV Kamera Bild Verteilung von Taumittel auf der Straße

Das ist wiederum das Problem, der punktförmigen Messung und die Repräsentanz der Messung für die Strecke. Unterschiede in der Gefriertemperatur an verschiedenen Stellen der Fahrbahn auf der Strecke, trotz gleichmäßigem Streueinsatz, von -3° bis -13°C sind absolut normal.

Messung Restsalz (RS)

Da bei allen Sensoren, welche die Gefriertemperatur mit passiver Methode – also über die Leitwertbestimmung – messen, die Gefriertemperatur letztlich unter Berücksichtigung der aktuellen Wasserfilmdicke und der Oberflächentemperatur aus der Salzsättigungskonzentration (proportional dem spezifischen Leitwert) berechnet wird, gilt das unter „Messung der Gefriertemperatur (GS)“ gesagte gleichfalls.

Der Restsalzwert wird gemäß TLS als Sättigungskonzentration zwischen 0 und 100% angegeben. Beispielsweise bedeutet bei Steinsalz (NaCl) 100% Sättigungskonzentration ungefähr ca. 26% absolute Massenkonzentration bei 20°C .

Messung der Wasserfilmdicke (WFD)

Grundsätzlich ist die im Bereich Holzkirchen und Siegsdorf eingesetzte Sensorik (DM31) in der Lage Wasserfilmdicken zu messen. Die Daten werden aber in der VRZ Freimann nicht archiviert oder sind sogar bei der Erfassung deaktiviert. Die Daten stehen daher für WOLKE im ausgesuchten Zielgebiet nicht zur Verfügung. Der Grund könnte darin liegen, dass die Wasserfilmdicken für die SBA nicht zur Schaltung verwendet werden. Wohl aber werden Sie höchstwahrscheinlich im SWIS verwendet. Diese Daten können aber nicht bereitgestellt werden.

Auf der anderen Seite gibt es die Erfahrung, dass die Roh-Werte die von den Sonden kommen, nur sehr bedingt die für Einfluss auf den Verkehrsfluss und die Fahrdynamik repräsentative Wasserfilmdicke wiedergeben. Schon deshalb, weil die Wasserfilmdicke in einem Bereich mit sehr geringer Ausdehnung gemessen werden muss, also der Messwert sich praktisch auf einen Punkt bezieht und bei Verkehrsaufkommen und anderen Einflüssen ständig sehr stark schwankt. Trotz offensichtlich gleichbleibendem Einfluss auf das Fahrverhalten und annähernd gleich bleibendem Verkehrsfluss weisen die Wasserfilmdicken zufällige Schwankungen von mehr als 100% um den Mittelwert auf.

Das Messverfahren über den Leitwertsvergleich ist im Prinzip anfällig gegen unterschiedliche Medien auf der Oberfläche. Schnee und Eisanteile beeinflussen die Messung erheblich. Bei Eis- und Schneebedeckung entspricht der Messwert i.d.R. nicht der tatsächlichen Bedeckung. Insbesondere die Schneehöhe auf der Fahrbahn kann nicht richtig gemessen werden.

Um den Schwankungen etwas entgegen zu wirken und Messwertverfälschungen auszugleichen, sind die Umfelddatenstationen von micKS teilweise mit einem Wasserfilmhöhen-Modell ausgestattet worden. Dabei wird, während Niederschlag stattfindet, die auf der Strecke repräsentative Wasserfilmhöhe aus der Niederschlagsintensität über ein empirisches Modell geschätzt. Dieses Modell kann in WOLKE dazu verwendet werden, bei Stationen mit zuverlässiger Niederschlagsmessung die Wasserfilmdicke zu schätzen (siehe 3.5.3.2) und damit die fehlenden Daten zu ersetzen. Die Brauchbarkeit für die Datenauswertung und Modellbildung dürfte dabei nicht geringer sein - wenn nicht sogar besser.

Gemeldeter Fahrbahnzustand (FBZ)

Der Fahrbahnzustand wird von den SWIS Stationen auf der A8 Holzkirchen und Siegsburg teilweise nach alter bitcodierter TLS Version oder nach neuer TLS mit einer 1 Byte Codierung übertragen. Bei der Konvertierung wurde eine Schnittmenge der beiden Enumerationen verwendet (siehe Tabelle 5).

| FBZ_Enum | Beschreibung |
|----------|---|
| 0 | Fahrbahn ist vollkommen trocken (< 0,03mm WFD) |
| 1 | Fahrbahn ist feucht bzw. nass, oder schnee- oder eisbedeckt (> 0,03 mm WFD), Art nicht bestimmbar |
| 2 | Fahrbahn ist entweder bedeckt mit gefrorenem Wasser oder mit Schnee oder Schneematsch oder mit Eis oder mit Rauheif bzw. Reifglätte |
| 5 | Nässe Stufe 1 (< 0,5 mm WFD) |
| 9 | Nässe Stufe 2 (>= 0,5 und < 1,0 mm WFD) |
| 13 | Nässe Stufe 3 (>= 1,0 mm WFD) |
| 32 | Fahrbahn ist benetzt, mit flüssigem Wasser bzw. wässriger Lösung (> 0,03mm WFD) |
| 64 | Fahrbahn ist benetzt, mit gefrorenem Wasser bzw. wässriger Lösung in festem Zustand |
| 65 | Fahrbahn ist bedeckt mit Schnee und Schneematsch |
| 66 | fahrbahn ist bedeckt mit Eis |
| 67 | Fahrbahn ist bedeckt mit rauheif |
| 255 | Zustand nicht bestimmbar |

Tabelle 5 Codierung der gemeldeten Fahrbahnzustände FBZ

Aus den bisherig gewonnenen Erfahrungen entsprechen die direkt von den Sonden gemeldeten Fahrbahnzustände unter ungünstigen Bedingungen häufig nicht den tatsächlichen Verhältnissen und zudem ist die Klassifizierung für die Zwecke dieses Projektes nicht optimal geeignet. Daher werden die gemeldeten Fahrbahnzustände in WOLKE nur zu Kontrollzwecken verwendet. Die Fahrbahnzustandsklassierung wird bei der Datenauswertung aus den direkt gemessenen Rohdaten abgeleitet. Damit ist auch eine gewisse Verifizierung der Daten verbunden (siehe 3.5.3.1)

Identifikation der Niederschlagsart (NS und NA)

Die Niederschlagssensoren der Glättemeldeanlagen im SWIS Bayern bieten die Unterscheidung zwischen Schnee und Regen an. Das bedeutet im Wesentlichen die Unterscheidung zwischen „gefrorenem Niederschlag“ und „flüssigem Niederschlag“. Mit diesen Sensoren kann bestenfalls eine Genauigkeit von $\pm 30\%$ erreicht werden. Diese Sensoren liefern die Niederschlagsart NA mit nur wenigen Unterscheidungen (siehe Tabelle 7).

In den neueren Umfelddatenstationen der SBA auf der A8 kommen so genannte „Present Weather“-Geräte zum Einsatz (VAISALA PWD11). Diese Geräte funktionieren nach dem optischen Streulichtverfahren und können auch die Sichtweite bei Nebel messen. Durch Auswertung der Streulichtsignale können Niederschlagsklassen identifiziert werden. Die Erkennungsfehler liegen dabei erfahrungsgemäß im Bereich von 10%. Die folgende Tabelle 6 listet die Niederschlagsarten auf, die grundsätzlich unterschieden werden können und die Codierung des Datentyps NS.

| NS_Enum | Beschreibung |
|---------|--|
| 0 | Klares Wetter |
| 4 | Eintrübung oder Rauch, Sichtweite gleich oder mehr als 1 km |
| 5 | Eintrübung oder Rauch, Sichtweite kleiner als 1 km |
| 10 | Feuchter Dunst |
| 20 | Nebel detektiert in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |

| NS_Enum | Beschreibung |
|---------|--|
| 21 | Niederschlag detektiert, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 23 | Regen (nicht gefrierend) nicht schauerartig, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 24 | Schnee, nicht schauerartig, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 30 | Nebel (zum Zeitpunkt der Beobachtung) |
| 31 | Nebel oder Eisnebel, stellenweise |
| 32 | Nebel oder Eisnebel, abnehmende Dichte in der vergangenen Stunde |
| 33 | Nebel oder Eisnebel, ohne wesentliche Veränderung in der vergangenen Stunde |
| 34 | Nebel oder Eisnebel, zunehmende Dichte in der vergangenen Stunde |
| 40 | Niederschlag (zur Zeit der Beobachtung - unbekannter Art) |
| 41 | Niederschlag, leicht bis mäßig |
| 42 | Niederschlag, stark |
| 50 | Sprüh- oder Niesel-Regen (zur Zeit der Beobachtung) |
| 51 | Sprühregen, leicht, nicht gefrierend |
| 52 | Sprühregen, mäßig, nicht gefrierend, |
| 53 | Sprühregen, stark, nicht gefrierend |
| 60 | Regen (zur Zeit der Beobachtung) |
| 61 | Regen, leicht |
| 62 | Regen, mäßig |
| 63 | Regen, stark |
| 67 | Schneeregen, leicht |
| 68 | Schneeregen, mäßig bis stark |
| 70 | Schneefall (zur Zeit der Beobachtung) |
| 71 | Schneefall, leicht |
| 72 | Schneefall, mäßig |
| 73 | Schneefall, stark |
| 80 | Regenschauer (zur Zeit der Beobachtung) |
| 81 | Regenschauer, leicht |
| 82 | Regenschauer, mäßig |
| 83 | Regenschauer, stark |
| 84 | Regenschauer, sehr gewaltig (>32 mm/h) |
| 85 | Schneeschaauer, leicht |
| 86 | Schneeschaauer, mäßig |
| 87 | Schneeschaauer, stark |
| 255 | nicht bestimmbar |

Tabelle 6: Liste der Codierung des Datentyps NS

Die vorerwähnten einfachen Niederschlagsdetektoren liefern Niederschlagsarten, welche nach einer alten Version der TLS (Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen) bitcodiert sind. Dieser wurden bei der Aufbereitung der Daten in den Datentyp NS konvertiert. Die Zuordnung ist in der folgenden Tabelle 7 wiedergegeben.

| NA enum | NA Beschreibung | NS enum | NS Beschreibung |
|---------|---|---------|---------------------------------------|
| 0 | Trocken | 0 | Klares Wetter |
| 2 | Schnee, gefrorener Niederschlag | 70 | Schneefall (zur Zeit der Beobachtung) |
| 5 | Regen, Stufe 1 (< 0,5 mm/h) | 61 | Regen, leicht |
| 9 | Regen, Stufe 2 (<= 0,5 mm/h und < 2,0 mm/h) | 62 | Regen, mäßig |
| 13 | Regen, Stufe 3 (>= 2,0 mm/h) | 63 | Regen, stark |

Tabelle 7 Zuordnungstabelle für die Konvertierung NA zu NS

Messung der Lufttemperatur (LT) und der rel. Feuchte (RLF)

Die Lufttemperatur wird i.d.R. bei Glättemeldeanlagen im SWIS Bayern zusammen mit der relativen Luftfeuchte neben der Autobahn in ca. 4 m Höhe in einem Strahlenschutzgehäuse gemessen. Die Genauigkeit der Sensoren sollte im Bereich $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ liegen. Die Messfühler sind entweder Messwiderstände PT100 oder Thermolinier (PTC/NTC). Sie geben hinreichend genau die Temperatur der über der Fahrbahn herrschenden Luftschicht wieder. Die relative Feuchte wird durchgehend mit elektronischen Messumformern, welche die dielektrischen Eigenschaften (kapazitiv) der feuchten Luft messen, ermittelt. Die Genauigkeit beträgt i.d.R. $\pm 3\%$. Erfahrungsgemäß sind die Genauigkeiten aber gerade bei hohen Luftfeuchten noch schlechter.

Aus beiden Messwerten kann die Taupunkttemperatur ermittelt werden. Diese ist wichtig, um beurteilen zu können, ob Kondensation von Feuchte an der Fahrbahnoberfläche stattfindet (z.B. Bildung von Reifglätte). Prinzipiell ist der Parameter für alle Verdunstungs- und Kondensationsvorgänge entscheidend. Die Genauigkeit der Taupunkttemperatur, insbesondere bezogen auf die unmittelbar über der Fahrbahn befindliche Luftschicht, ist stark von der Genauigkeit der Feuchtemessung abhängig. Bei der üblicherweise eingesetzten Sensorik liegen die zu erwarteten Genauigkeiten im Bereich $\pm 1...2^{\circ}\text{C}$ – gute Kalibrierung vorausgesetzt. Das gleiche gilt für die daraus abgeleitete Feuchttemperatur. Die Feuchttemperatur, oder auch bekannt unter dem Begriff Feuchtkugelttemperatur, gibt diejenige Temperatur an, die ein fallender Niederschlag durch die Atmosphäre mit einer bestimmten Lufttemperatur und relativen Feuchte annimmt. Die Feuchttemperatur kann näherungsweise aus dem Mittelwert zwischen Lufttemperatur und Taupunkt errechnet werden. Die Feuchttemperatur kann zur Beurteilung der Niederschlagsart und der Entstehung von „Blitzeis“ oder Eisregen herangezogen werden.

gen werden. Da der Niederschlag auch von höheren Schichten der Atmosphäre beeinflusst wird, ist die aus den Daten der Straßenwetter-Stationen abgeleitete Feuchttemperatur natürlich nur als grobe Näherung zu betrachten.

Messung der Sichtweite (SW)

Für das Fahrverhalten und den Verkehrsfluss ist die Sichtweite eine sehr entscheidende Größe. In der erfassten Daten sind von einigen Standorten Sichtweitenmessdaten enthalten, die für die Datenanalyse interessant sind könnten.

Die in den Umfelddatenstationen der Verkehrsbeeinflussungsanlagen eingesetzten Sichtweitenmessgeräte arbeiten überwiegend nach dem Lichtstreuprinzip im infraroten Bereich. Auf der A8 Holzkirchen und Siegsdorf werden die Sichtweiten auch durch die sog. „Present Weather Sensoren“ gemessen. Im Verkehrsbereich sind Messbereiche zwischen 10 bis 1000m (teilweise bis 2000m) üblich. Die Messgeräte haben eine Genauigkeit von ca. 20%. Auch diese Messung ist im Vergleich zu den Sichtweiten praktisch punktförmig. Dazu kommt, dass Nebel häufig inhomogen und instabil ist. Durch diese Umstände ergeben sich oft Probleme, sodass die Messungen unter bestimmten Bedingungen manchmal nicht repräsentativ für die Strecke sein können.

Die Intensität und die Art des Niederschlages haben einen erheblichen Einfluss auf die Sichtweite und damit das Fahrverhalten. Sichtweitenmessgeräte sind zwar querempfindlich auf Niederschläge, geben aber die tatsächliche Sichtbehinderung durch Niederschläge nicht richtig wieder. Daher muss die Sichtbehinderung die rein aus dem Niederschlag entsteht, möglichst aus der Niederschlagsmessung abgeleitet werden.

Die Sichtbehinderung durch Nebel oder auch Rauch oder dergleichen kann nur durch die Sichtweitenmessgeräte erfasst werden.

Nebel entsteht bei Erreichen des Taupunktes in der Luft, bei Messwerten für die rel. Feuchte oberhalb 97%. Aus den im SWIS eingesetzten Feuchte-Sensoren kann aber in keinem Fall auf die Sichtweite geschlossen werden. Die Entstehung des Nebels und dessen Dichte und damit die Sichtweite ist ein komplexer Vorgang, der von vielen Einflüssen abhängt.

Messung der mittleren Windgeschwindigkeit (WGM)

Es liegen leider keine Angaben darüber vor, mit welchem Messverfahren die Windgeschwindigkeit gemessen wird. Es dürfte sich aber bei den Umfelddatenstationen auf der A8 überwiegend noch um mechanische Halbschalenanemometer handeln. Wobei die Umdrehungen bzw. die Drehgeschwindigkeit (Generator) des Anemometers elektrisch abgegriffen wird. Ebenso wird die Windrichtung über eine Windfahne entweder durch optische Winkelmessung oder durch mittels Potentiometer in elektrische

Signale gewandelt. Neuere Verfahren arbeiten mit Sonarsensoren (Ultraschall) wobei die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in zwei im 90° Winkel angeordneten Messstrecken bestimmt wird, Daraus kann sehr präzise die Windgeschwindigkeit und – Richtung ermittelt werden. Die Windmessung befindet sich bei SWIS und VBA Umfelddatenstationen üblicherweise auf einer Höhe von ca. 4 m über Grund. Die Genauigkeit der Sensoren (ca. 5%) ist für die Zwecke des Betriebsdienstes und der Verkehrsbeeinflussung hinreichend genau. Da die Standorte aus Betriebsdienstgesichtspunkten ausgewählt sind, werden die Windmessungen häufig durch Bauwerke, Bewuchs und nicht zuletzt durch Verkehr verfälscht. Die mittlere Windgeschwindigkeit gemäß TLS (DE-Typ 57) ist der gleitende Mittelwert über einen Zeitraum von 10 Minuten. Die Werte werden mit einer Auflösung von 0,1 m/s übertragen. Mechanische Anemometer haben wegen der Haftreibung eine untere Ansprechschwelle die bei 1...3 m/s liegt. Es wird auch meist die Spitzenwindgeschwindigkeit (WGS) (TLS FG3 DE-Typ 64) ermittelt. Diese ist aber in den archivierten Daten nicht enthalten.

Messung der Windrichtung (WR)

Es liegen leider keine Angaben darüber vor, mit welchem Messverfahren die Windrichtung gemessen wird. Es dürfte sich aber bei den Umfelddatenstationen auf der A8 überwiegend noch um mechanische Windfahnen handeln. Wobei die Windrichtung über eine Windfahne entweder durch optische Winkelmessung oder mittels Potentiometer in elektrische Signale gewandelt. Die Windrichtung wird in Grad Himmelsrichtung (bzw. Kompassrose) (gemäß TLS DE-Typ 56) zwischen 0°...359° in 1 Grad Schritten übertragen. Die Windrichtung sollte als vektorieller (Richtung und Geschwindigkeit) Mittelwert über 10 Minuten geliefert werden. Die vektorielle Ermittlung wird aber häufig wegen der getrennten Sensoren nicht wirklich gemacht. Es handelt sich meist um den gleitenden Mittelwert der Richtung, ohne Berücksichtigung der Windgeschwindigkeit. Die Aufstellhöhe ist wie bei der Windgeschwindigkeit ca. 4 m.

3.5.1.3 Erläuterungen zu den erhobenen synoptischen Wetterdaten

In der folgenden Liste (Tabelle 8) sind die vordefinierten Datentypen für die synoptischen Wetterstationen aufgeführt. Nicht alle Wetterstationen können alle Datentypen auch liefern. Welche Datentypen von den ausgewählten Standorten unterstützt werden, ist in der Tabelle 3 zu sehen.

| Abkz. | Datentyp | Einheit | Bemerkung |
|-------|-----------------------------|---------|--------------------------|
| NM | Niederschlagsmenge | mm | |
| NI | Niederschlagsintensität | mm/h | |
| NS | Niederschlagsart/-situation | enum | gleichbedeutend mit „ww“ |

| Abkz. | Datentyp | Einheit | Bemerkung |
|-------|----------------------------|------------------|---|
| LT | Lufttemperatur | °C | |
| SoS | Sonnenstunden | min | |
| GS | Globalstrahlung | W/m ² | keine der ausgewählten Standorte kann GS messen |
| RLF | Relative Luftfeuchte | % | |
| WR | Windrichtung | ° | Kompassrichtung |
| WGM | mittl. Windgeschwindigkeit | m/s | |

Tabelle 8 Liste der für WOLKE benötigten Datentypen der synoptischen Wetterstationen

Messung der Niederschlagsmenge (NM)

Die Niederschlagsmenge versteht sich immer als diejenige Menge Wasser (wasseräquivalent) im Niederschlag, welche pro Quadratmeter in einem bestimmten Zeitraum fällt. Die Menge wird in mm angegeben, das entspricht einem Volumen von 1 Liter pro Quadratmeter. In diesem Fall ist die Niederschlagsmenge jeweils auf die vergangene Stunde bezogen, welche dem angegebenen Messzeitpunkt vorausgeht. Bei Wetterstationen wird der Niederschlag überwiegend mit sammelnden Instrumenten gemessen (z.B. Kippwaagenprinzip oder nach dem Waageprinzip arbeitende Pluviometer). Welche Instrumente und Messprinzipien bei den jeweiligen Stationen eingesetzt werden, ist nicht genau bekannt. Man kann aber davon ausgehen, dass die Anforderungen an die Genauigkeit deutlich höher sind als bei den üblicherweise in Straßenwetterstationen eingesetzten Niederschlagssensoren. Der Niederschlag wird bei Wetterstationen in Bodennähe gemessen.

Messung der Niederschlagsintensität (NI)

Niederschlagsintensität ist die zum Messzeitpunkt aktuell anstehende Niederschlagsstärke und wird in mm pro Stunde angegeben. Anders als bei den Straßenwetterstationen, die wesentlich kürzere Erfassungsintervalle haben, wird hier die Intensität meist aus den Stundenwerten des Niederschlags abgeleitet, daher sind die Werte bei den synoptischen Stationen identisch.

Messung der Niederschlagsart (NS)

Die Niederschlagsart wird bei Wetterstationen entweder durch sog. „Present Weather“-Sensoren, die nach optischen Messprinzip arbeiten detektiert oder durch Beobachter gemeldet. Das ist auch der Grund, warum die Verfügbarkeit dieses Datentyps bei den

Wetterstationen relative niedrig ist. Die Codierung von Niederschlagsereignissen wird dabei nach der WMO-Tabelle für den Beobachtungstyp „ww“ vorgenommen. Die folgende Tabelle 9 gibt die Bedeutung aller möglichen Codenummern wieder.

| ww | Beschreibung |
|-----------|--|
| 0 | Wolkenentwicklung nicht festgestellt oder nicht feststellbar |
| 1 | Wolken im allgemeinen in Auflösung oder Rückentwicklung |
| 2 | Himmelsbild im ganzen unverändert |
| 3 | Wolken in Bildung oder Weiterentwicklung |
| 4 | Sichtverminderung durch Rauch (industrierauch, Heide oder Waldbrand) |
| 5 | Trockener Dunst |
| 6 | Lufttrübung durch Staub |
| 7 | Sichttrübung durch Gischt |
| 9 | Staub oder Sandsturm |
| 10 | Feuchter Dunst |
| 11 | flacher Nebel/Eisnebel, einzelne Schwaden oder Bänke |
| 12 | flacher Nebel/Eisnebel, zusammenhängend |
| 13 | Wetterleuchten |
| 14 | Niederschlag im Gesichtskreis, der nicht Boden erreicht |
| 15 | Niederschlag im Gesichtskreis, der Boden erreicht, mehr als 3 sm entfernt |
| 16 | Niederschlag im Gesichtskreis, der Boden erreicht, weniger als 3 sm entfernt |
| 17 | Gewitter, ohne Niederschlag |
| 18 | markante Böen |
| 19 | Großtromben |
| 20 | Sprühregen, Schneegriesel, nicht schauerartig, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 21 | Regen, nicht schauerartig, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 22 | Schnee, nicht schauerartig, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 23 | Regen und Schnee oder Eiskörner, nicht schauerartig, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 24 | Sprühregen oder regen, gefrierend, nicht schauerartig, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 25 | Regenschauer, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 26 | Schneeschauber oder Schneeregenschauer, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 27 | Hagel- oder Graupelschauber, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 28 | Nebel oder Eisnebel, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 29 | Gewitter, in der letzten Stunde, aber nicht zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 30 | leichter bis mäßiger Staubsturm, in letzter Stunde nachgelassen |
| 31 | leichter bis mäßiger Staubsturm, keine Änderungen zur letzten Stunde |
| 32 | leichter bis mäßiger Staubsturm, in letzter Stunde begonnen oder zugenommen |
| 33 | starker Staubsturm, in letzter Stunde nachgelassen |
| 34 | starker Staubsturm, keine Änderungen zur letzten Stunde |
| 35 | starker Staubsturm, in letzter Stunde begonnen oder zugenommen |
| 40 | Nebel oder Eisnebel, nicht in der letzten Stunde, aber zum Zeitpunkt der Beobachtung |
| 41 | Nebel oder Eisnebel, Schwaden |
| 42 | Nebel oder Eisnebel, in der letzten Stunde dünner geworden, Himmel erkennbar |
| 43 | Nebel oder Eisnebel, in der letzten Stunde dünner geworden, Himmel nicht erkennbar |

| ww | Beschreibung |
|-----------|---|
| 44 | Nebel oder Eisnebel, keine Änderungen zur letzten Stunde, Himmel erkennbar |
| 45 | Nebel oder Eisnebel, keine Änderungen zur letzten Stunde, Himmel nicht erkennbar |
| 46 | Nebel oder Eisnebel, in letzter Stunde eingesetzt bzw. dichter geworden, Himmel erkennbar |
| 47 | Nebel oder Eisnebel, in letzter Stunde eingesetzt bzw. dichter geworden, Himmel nicht erkennbar |
| 48 | Nebel oder Eisnebel, schlägt sich als Rau- oder Klareis nieder, Himmel erkennbar |
| 49 | Nebel oder Eisnebel, schlägt sich als Rau- oder Klareis nieder, Himmel nicht erkennbar |
| 50 | Spühregen zur Zeit der Beobachtung, leicht, mit Unterbrechung |
| 51 | Spühregen zur Zeit der Beobachtung, leicht, ohne Unterbrechung |
| 52 | Spühregen zur Zeit der Beobachtung, mäßig, mit Unterbrechung |
| 53 | Spühregen zur Zeit der Beobachtung, mäßig, ohne Unterbrechung |
| 54 | Spühregen zur Zeit der Beobachtung, stark, mit Unterbrechung |
| 55 | Spühregen zur Zeit der Beobachtung, stark, ohne Unterbrechung |
| 56 | Spühregen zur Zeit der Beobachtung, leicht, gefrierend |
| 57 | Spühregen zur Zeit der Beobachtung, mäßig oder stark, gefrierend |
| 58 | Spühregen zur Zeit der Beobachtung, leicht, mit Regen |
| 59 | Spühregen zur Zeit der Beobachtung, mäßig oder stark, mit Regen |
| 60 | Regen zur Zeit der Beobachtung, leicht, mit Unterbrechung |
| 61 | Regen zur Zeit der Beobachtung, leicht, ohne Unterbrechung |
| 62 | Regen zur Zeit der Beobachtung, mäßig, mit Unterbrechung |
| 63 | Regen zur Zeit der Beobachtung, mäßig, ohne Unterbrechung |
| 64 | Regen zur Zeit der Beobachtung, stark, mit Unterbrechung |
| 65 | Regen zur Zeit der Beobachtung, stark, ohne Unterbrechung |
| 66 | Regen zur Zeit der Beobachtung, leicht, gefrierend |
| 67 | Regen zur Zeit der Beobachtung, mäßig oder stark, gefrierend |
| 68 | Regen oder Sprühregen zur Zeit der Beobachtung, leicht, mit Schnee |
| 69 | Regen oder Spühregen zur Zeit der Beobachtung, mäßig oder stark, mit Schnee |
| 70 | Schneefall zur Zeit der Beobachtung, leicht, mit Unterbrechung |
| 71 | Schneefall zur Zeit der Beobachtung, leicht, ohne Unterbrechung |
| 72 | Schneefall zur Zeit der Beobachtung, mäßig, mit Unterbrechung |
| 73 | Schneefall zur Zeit der Beobachtung, mäßig, ohne Unterbrechung |
| 74 | Schneefall zur Zeit der Beobachtung, stark, mit Unterbrechung |
| 75 | Schneefall zur Zeit der Beobachtung, stark, ohne Unterbrechung |
| 76 | Eisnadeln zur Zeit der Beobachtung |
| 77 | Schneegriesel zur Zeit der Beobachtung |
| 78 | Vereinzelte Schneesterne zur Zeit der Beobachtung |
| 79 | Eiskörner zur Zeit der Beobachtung |
| 80 | Regenschauer zur Zeit der Beobachtung, leicht |
| 81 | Regenschauer zur Zeit der Beobachtung, mäßig oder stark |
| 82 | Regenschauer zur Zeit der Beobachtung, sehr stark |
| 83 | Schneeregenschauer zur Zeit der Beobachtung, leicht |
| 84 | Schneeregenschauer zur Zeit der Beobachtung, mäßig oder stark |
| 85 | Schneeschauder zur Zeit der Beobachtung, leicht |
| 86 | Schneeschauder zur Zeit der Beobachtung, mäßig oder stark |
| 87 | Graupelschauder zur Zeit der Beobachtung, leicht |
| 88 | Graupelschauder zur Zeit der Beobachtung, mäßig oder stark |
| 89 | Hagelschauder zur Zeit der Beobachtung, leicht |

| ww | Beschreibung |
|----|---|
| 90 | Hagelschauer zur Zeit der Beobachtung, mäßig oder stark |
| 91 | Gewitter, während der letzten Stunde, nicht zur Beobachtungszeit, Regen zur Beobachtungszeit, leicht |
| 92 | Gewitter, während der letzten Stunde, nicht zur Beobachtungszeit, Regen zur Beobachtungszeit, mäßig oder stark |
| 93 | Gewitter während der letzten Stunde, nicht zur Beobachtungszeit, Schnee- oder Schneeregen, Graupeln oder Hagel zur Beobachtungszeit, leicht |
| 94 | Gewitter während der letzten Stunde, nicht zur Beobachtungszeit, Schnee- oder Schneeregen, Graupeln oder Hagel zur Beobachtungszeit, mäßig oder stark |
| 95 | Gewitter zur Beobachtungszeit, leicht oder mäßig, mit Regen oder Schnee oder Schneeregen ohne Hagel/Graupen |
| 96 | Gewitter zur Beobachtungszeit, leicht oder mäßig, mit Hagel/Graupen |
| 97 | Gewitter zur Beobachtungszeit, stark, mit Regen oder Schnee oder Schneeregen ohne Hagel/Graupen |
| 98 | Gewitter zur Beobachtungszeit, mit Staub- oder Sandsturm |
| 99 | Gewitter zur Beobachtungszeit, stark, mit Hagel/Graupen |

Tabelle 9 Liste der Codenummern (enum) für Niederschlags- und Wettersituationen (nach „ww“ gem. WMO)

Messung der Lufttemperatur (LT)

Die Lufttemperatur wird bei synoptischen Wetterstationen in einer Höhe von 2 m über dem Grund gemessen. Die Temperatur wird in °C angegeben und die Genauigkeit ist meist im Bereich von $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Die Sensoren sind in Strahlenschutzgehäusen untergebracht.

Messung der Sonnenstunden (SoS)

Unter Sonnenstunden wird diejenige Zeit verstanden, bei der am Standort der Wetterstation die Sonneneinstrahlung über einem bestimmten Grenzwert war. Diese gesamte Sonneneinstrahlungszeit, die innerhalb eines Erfassungsintervalls, aufgelaufen ist, wird in Minuten angegeben. Die SoS bezieht sich auf die dem angegebenen Messzeitpunkt vorangegangene Stunde.

Messung der Globalstrahlung (GS)

Globalstrahlung ist diejenige Strahlungsenergie, die im oberen Halbraum, im Spektralbereich von ca. 400 bis 1000 nm, die am Standort der Wetterstation zum Messzeitpunkt herrscht. Die Globalstrahlung wird in W/m^2 angegeben und mit sog. Pyranometer gemessen. Die Erfassung dieses Wertes war ursprünglich geplant, da er im Prinzip aussagekräftiger ist, als die Angabe der Sonnenstunden weil die Bewölkung quantitativ

beurteilt werden kann. Die für das WOLKE Zielgebiet relevanten Standorte der Wetterstationen sind aber nicht mit Globalstrahlungsmessung ausgerüstet.

Messung der Relativen Luftfeuchte (RLF)

Die relative Luftfeuchte wird üblicherweise am selben Ort gemessen, wie die Lufttemperatur und im Strahlenschutzgehäuse. Bei synoptischen Wetterstationen kommen noch überwiegend mechanische arbeitende Haarhygrometer mit elektrischem Abgriff zum Einsatz. Bei neueren Wetterstationen werden ähnliche Technologien (kapazitive Sensoren) verwendet, wie sie auch bei Straßenwetterstationen zum Einsatz kommen. Bei den Wetterstationen werden Genauigkeiten im Bereich von $\pm 1\%$ erreicht. Aus der relativen Feuchte und der Lufttemperatur kann die Taupunkttemperatur (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) und auch näherungsweise die Feucht(kugel)temperatur berechnet werden.

Messung der Windrichtung (WR) und der mittleren Geschwindigkeit (WGM)

Bei neueren Wetterstationen werden die Wind-Richtung und die -Geschwindigkeit mittels Messung der Schallausbreitung in zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen in der Horizontalebene bestimmt. Die Messung ist sehr genau (unter 1,5% vom Messwert). Ältere Wetterstationen werden noch mechanisch arbeitende sog. Halbschalen-Anemometer und Windfahnen verwendet. Die Messung wird meist in ca. 6 m Höhe über dem Grund vorgenommen.

Die Winddaten wie sie für WOLKE verwendet werden, sind Mittelwerte über einen Zeitraum von jeweils 10min.

3.5.2 Erhebungsstatistik

3.5.2.1 Erhebungsstatistik für die lokalen Straßenwetterdaten

Die Daten aus dem Archiv der VBZ Freimann mussten erst aus einem komplizierten Archivformat in das für WOLKE definierte Datenmodell konvertiert werden. Dabei wurden insgesamt ca. 750.000 XML Dateien umgewandelt. Im Folgenden ist eine grobe Übersicht über die Statistik aller erfassten Daten gegeben:

| Attribut | Ausprägung |
|--------------------------|---------------------------|
| Zeitraum UZ Holzkirschen | 01.01.2008 bis 26.07.2011 |

| Attribut | Ausprägung |
|-------------------------------|---------------------------------|
| Zeitraum UZ Siegsdorf | 01.01.2008 bis 27.09.2011 |
| Erfassungsintervall | 1 Minute |
| Anzahl Datensätze insgesamt | 97.705.084 (Soll) |
| Fehlende Datensätze insgesamt | 1,659.412 (entspricht ca. 1,7%) |

Tabelle 10: Statistik der Wetterdaten

Die insgesamt fehlenden Datensätze sind gezählt, wenn zu einem Erfassungsintervall von einer Station (Querschnitt pro Fahrtrichtung) überhaupt keine Messdaten vorliegen. Eine vollständige Liste der Ausfälle pro Standort (Querschnitt pro Fahrtrichtung) ist in Tabelle 11 wiedergegeben. Im Durchschnitt weisen die Stationen eine Ausfallrate von 1,7% auf, was einer mittleren Ausfallzeit von insgesamt ca. 150 h pro Jahr entspricht. Vereinzelt weisen Stationen sogar Ausfallraten von über 10% auf. Die Ursachen dafür müssen aber nicht immer an der Messstation selbst liegen. Ursachen können an der gesamten Erfassungskette von der Station, über die Übertragungsmedien (in diesem Fall Fernmeldekabel / TLS-Inselbus) bis hin zur Unterzentrale und der Archivierung, verborgen sein.

| Querschnitt | UTC von | UTC bis | Gesamtzeit Soll d | Ausfallrate | Gesamt Ausfall h |
|---------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------|------------------|
| Q37_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,47% | 147,90 |
| Q43_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,22% | 68,75 |
| Q43_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,22% | 68,70 |
| Q49_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 2,42% | 757,50 |
| Q49_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,28% | 86,23 |
| Q55_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,28% | 87,27 |
| Q55_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,28% | 86,98 |
| Q59_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,28% | 86,35 |
| Q59_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,27% | 85,77 |
| Q62_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 1,40% | 436,23 |
| Q62_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 1,07% | 333,42 |
| Q69_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,23% | 70,73 |
| Q69_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,22% | 69,63 |
| Q75_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,31% | 96,52 |
| Q75_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,31% | 96,55 |
| Q83_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,26% | 80,97 |
| Q83_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,25% | 77,00 |
| Q89_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 7,52% | 2348,32 |
| Q89_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,29% | 91,67 |
| BRUN2_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 2,58% | 807,30 |
| FORST_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 5,18% | 1617,70 |
| PERL_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 4,29% | 1341,63 |
| Q25_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,42% | 132,20 |
| Q29_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,23% | 71,10 |
| Q29_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,22% | 69,80 |
| Q33_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,38% | 118,22 |
| Q33_Sbg | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,38% | 117,92 |
| Q37_Mch | 01.01.2008 | 25.07.2011 21:59 | 1301,96 | 0,53% | 165,13 |
| Q223_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 10,79% | 3534,00 |
| Q223_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 1,17% | 383,97 |
| Q225_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 3,43% | 1124,40 |
| Q225_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 3,52% | 1152,48 |
| Q231_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,51% | 165,77 |
| Q231_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,51% | 166,58 |
| Q238_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,36% | 118,10 |
| Q238_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,36% | 118,07 |
| Q249_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,21% | 67,40 |
| Q249_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,14% | 45,52 |
| Q251_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,45% | 147,35 |
| Q251_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,44% | 142,97 |
| Q256_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 10,88% | 3564,42 |
| Q256_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,37% | 121,13 |
| Q257_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,81% | 263,75 |
| Q261_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 8,55% | 2801,67 |
| Q267_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,84% | 275,82 |
| Q267_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 0,82% | 270,25 |
| Q275_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 2,96% | 971,10 |
| Q275_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 2,78% | 910,17 |
| Q203_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 1,22% | 399,07 |
| Q205_Mch | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 1,98% | 647,70 |
| Q205_Sbg | 31.12.2007 23:00 | 26.09.2011 23:59 | 1365,04 | 1,98% | 647,72 |
| Durchschnitt | | | | 1,68% | 542,29 |

Tabelle 11 Liste der Ausfälle einer Station in Stunden und Prozent von der Sollzeit

Ausfälle einzelner Sensorwerte, die in der oberen Statistik nicht enthalten sind, sind ebenfalls bestimmt worden, aber im Bericht nicht im Einzelnen dargestellt.

Statistik der gemeldeten Wetterzustände

Im Rahmen der Erfassungsstatistik war noch eine grobe Übersichtsauswertung der Wetterzustände, wie sie direkt von der Sensorik gemeldet werden, von Interesse. In der Tabelle 12 ist die Statistik der von den Stationen direkt gemeldeten Fahrbahnzustände aufgeführt.

| Station | Fahrbahnzustand | | | |
|--------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|
| | Gesamt | Trocken | Feucht/Nass | Glaette |
| Q37_Sbg | 1857327 | 69,7% | 29,8% | 0,5% |
| Q43_Mch | 1868158 | 66,4% | 33,4% | 0,2% |
| Q43_Sbg | 1795648 | 71,8% | 28,1% | 0,1% |
| Q49_Mch | 1827763 | 72,2% | 27,5% | 0,3% |
| Q49_Sbg | 1866874 | 68,6% | 31,0% | 0,4% |
| Q55_Mch | 1869495 | 60,9% | 38,8% | 0,3% |
| Q55_Sbg | 1869591 | 56,1% | 43,7% | 0,2% |
| Q59_Mch | 1869580 | 70,4% | 29,3% | 0,3% |
| Q59_Sbg | 1868325 | 68,7% | 30,9% | 0,4% |
| Q62_Mch | 1844015 | 71,3% | 28,4% | 0,3% |
| Q62_Sbg | 1844015 | 69,6% | 30,1% | 0,3% |
| Q69_Mch | 1870549 | 70,9% | 28,5% | 0,6% |
| Q69_Sbg | 1868334 | 71,4% | 28,1% | 0,6% |
| Q75_Mch | 1868197 | 76,6% | 23,1% | 0,3% |
| Q75_Sbg | 1866972 | 61,5% | 38,1% | 0,4% |
| Q83_Mch | 1869949 | 69,0% | 28,8% | 2,3% |
| Q83_Sbg | 1869928 | 65,8% | 33,4% | 0,8% |
| Q89_Mch | 1731929 | 69,0% | 30,3% | 0,7% |
| Q89_Sbg | 1717038 | 63,0% | 36,3% | 0,7% |
| BRUN2_Sbg | 1824234 | 65,7% | 34,1% | 0,2% |
| FORST_Mch | 1735845 | 75,6% | 24,3% | 0,1% |
| PERL_Mch | 1792724 | 67,8% | 32,1% | 0,1% |
| Q25_Sbg | 1864646 | 59,9% | 40,0% | 0,1% |
| Q29_Mch | 1870057 | 60,3% | 39,4% | 0,3% |
| Q29_Sbg | 1864460 | 65,2% | 34,5% | 0,3% |
| Q33_Mch | 1867717 | 62,6% | 36,9% | 0,5% |
| Q33_Sbg | 1867717 | 68,7% | 31,1% | 0,2% |
| Q37_Mch | 1862462 | 60,6% | 39,0% | 0,4% |
| Q223_Mch | 1753542 | 68,1% | 31,8% | 0,0% |
| Q223_Sbg | 1942031 | 71,3% | 28,7% | 0,0% |
| Q225_Mch | 1895476 | 58,6% | 40,7% | 0,7% |
| Q225_Sbg | 1895476 | 58,3% | 40,8% | 0,9% |
| Q231_Mch | 1954260 | 60,7% | 38,3% | 1,1% |
| Q231_Sbg | 1873244 | 59,4% | 39,7% | 0,8% |
| Q238_Mch | 1958507 | 58,7% | 41,0% | 0,3% |
| Q238_Sbg | 1955461 | 61,0% | 38,6% | 0,4% |
| Q249_Mch | 1922164 | 57,6% | 42,2% | 0,2% |
| Q249_Sbg | 1884227 | 54,6% | 45,2% | 0,2% |
| Q251_Mch | 1956772 | 56,4% | 43,5% | 0,1% |
| Q251_Sbg | 1897625 | 57,0% | 42,8% | 0,2% |
| Q256_Mch | 1747385 | 65,4% | 34,4% | 0,2% |
| Q256_Sbg | 1892272 | 66,0% | 33,2% | 0,8% |
| Q257_Sbg | | | | |
| Q261_Sbg | | | | |
| Q267_Mch | 1939877 | 70,3% | 29,6% | 0,1% |
| Q267_Sbg | 1702200 | 65,1% | 34,9% | 0,1% |
| Q275_Mch | 1907381 | 62,8% | 36,9% | 0,3% |
| Q275_Sbg | 1907381 | 63,4% | 35,9% | 0,6% |
| Q203_Mch | | | | |
| Q205_Mch | 1882233 | 65,7% | 34,1% | 0,2% |
| Q205_Sbg | 1926788 | 69,1% | 30,7% | 0,2% |
| Durchschnitt | 1862247 | 65,2% | 34,4% | 0,4% |

Tabelle 12 Gemeldete Fahrbahnzustände pro Station

Im Durchschnitt melden die Sensoren in 65% der Zeit trockene Fahrbahn. Die Nässezustände schlagen mit ca. 34% zu buche. Die Glättezustände nehmen dagegen nur

0,4% der gesamten Datensätze ein. Da es sich nur um eine grobe Auswertung der Roh Werte handelt, sind diese Daten nicht weiter verifiziert worden, da ohnehin im Rahmen der Modellierung genauere Analysen vorgenommen wurden. Generell kann man aber sagen, dass die Fälle mit tatsächlich vorhandenem Glatteis in Folge funktionierendem Winterdienst sehr selten waren.

| Station | Nebel | |
|--------------|----------------|---------------|
| | Gesamt | Sicht < 100m |
| Q37_Sbg | 1848909 | 0,001% |
| Q49_Sbg | 1851649 | 0,112% |
| Q59_Sbg | 1767567 | 0,010% |
| Q62_Sbg | 1772693 | 0,037% |
| Q69_Sbg | 1848915 | 0,014% |
| Q83_Sbg | 1840840 | 0,003% |
| Q25_Sbg | 1809790 | 0,006% |
| Q29_Sbg | 1862002 | 0,003% |
| Q33_Sbg | 1867673 | 0,000% |
| Q225_Mch | 1893142 | 0,056% |
| Q231_Mch | 1895005 | 0,001% |
| Q249_Sbg | 1962887 | 0,002% |
| Q257_Sbg | 1946877 | 0,102% |
| Q261_Sbg | 1793402 | 0,007% |
| Q267_Sbg | 1934182 | 0,014% |
| Q203_Mch | 1941716 | 0,002% |
| Durchschnitt | 1864828 | 0,023% |

Tabelle 13 Nebelereignisse mit Sichtweiten unter 100m

Aus den Stationen, die mit Sichtweitenmessgeräten ausgestattet sind, wurden die Erfassungsintervalle gezählt, bei denen die Sichtweite kleiner als 100 m gemeldet worden ist. Im Durchschnitt sind das gerade mal 0,2 Promille der gesamten Datensätze. Das sind im Erfassungszeitraum durchschnittlich 433 Minuten pro Station. Auf ein Jahr bezogen ergeben sich ca. 120 Minuten in denen die Sichtweite unter 100 m sinkt. Auch hier gilt, dass dies Rohmesswerte aus den Umfelddatenstationen sind und entsprechend mit Fehler behaftet sein können. Auch hier weichen einzelne Stationen zum Teil stark vom Durchschnitt ab.

3.5.2.2 Erhebungsstatistik für synoptische Wetterdaten

Die synoptischen Wetterdaten wurden auf Ihre Vollständigkeit analysiert. Stationsausfälle werden gezählt, wenn innerhalb einem Erfassungsintervall (in diesem Fall 1 Stunde) von einer Wetterstation alle Daten fehlen. Ausfälle einzelner Datentypen sind dann noch einmal separat erfasst.

| ID | | | Gesamt- | Ausfallzeiten |
|---------------------|------------------|------------------|--------------|---------------|
| Wetterstation | Datum von | Datum bis | Stundenwerte | Station |
| AT001 | 01.01.2008 | 31.10.2011 23:00 | 33238 | 1,1% |
| AT002 | 01.01.2008 | 31.10.2011 23:00 | 32860 | 2,3% |
| AT003 | 01.01.2008 | 31.10.2011 23:00 | 33224 | 1,1% |
| AT004 | 01.01.2008 | 31.10.2011 23:00 | 33096 | 1,5% |
| AT005 | 01.01.2008 | 31.10.2011 23:00 | 33071 | 1,6% |
| AT006 | 01.01.2008 | 31.10.2011 23:00 | 33175 | 1,3% |
| AT007 | 01.01.2008 | 31.10.2011 23:00 | 33120 | 1,4% |
| AT008 | 01.01.2008 | 31.10.2011 23:00 | 33205 | 1,2% |
| AT009 | 23.02.2009 11:00 | 31.10.2011 23:00 | 22782 | 3,3% |
| '10865' | 01.01.2008 | 31.08.2011 23:00 | 32136 | 0,0% |
| '10980' | 01.01.2008 | 31.08.2011 23:00 | 32098 | 0,1% |
| 'P532' | 01.01.2008 | 31.08.2011 23:00 | 32136 | 0,0% |
| 'P856' | 01.01.2008 | 31.08.2011 23:00 | 32134 | 0,0% |
| 'P975' | 01.01.2008 | 31.08.2011 23:00 | 32133 | 0,0% |
| 'P982' | 01.01.2008 | 31.08.2011 23:00 | 32135 | 0,0% |
| Durchschnitt | | | 32036 | 1,0% |

Tabelle 14 Anzahl der erfassten Datensätze und Ausfallrate der synoptischen Wetterstationen

Die Tabelle 14 zeigt die Auswertung der erfassten Datensätze und die Ausfallrate nach Wetterstation. Bei den einzelnen Messwerten wurde die Ausfallrate ebenfalls bestimmt (siehe Tabelle 15). Ein Ausfall lag vor, wenn entweder eine leeres Datenfeld oder eine Fehlerkennung (z.B. beim DWD „-99“) erfasst worden ist. Hier fällt auf dass die Niederschlagsart bzw. Wettererscheinung (ww) häufig fehlt.

| ID | Ausfallrate für | | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | NM | NI | NA | LT | WR | WG | SS | TPT | RLF |
| AT001 | 0,6% | 0,6% | - | 0,0% | 0,5% | 0,5% | 0,7% | 0,0% | 0,0% |
| AT002 | 2,3% | 2,3% | - | 0,0% | 7,0% | 7,2% | 1,9% | 0,0% | 0,0% |
| AT003 | 2,7% | 2,7% | - | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,9% | 0,0% | 0,0% |
| AT004 | 0,7% | 0,7% | - | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,8% | 0,0% | 0,0% |
| AT005 | 0,9% | 0,9% | - | 0,0% | 0,8% | 0,8% | 2,0% | 0,0% | 0,0% |
| AT006 | 0,6% | 0,6% | 76,3% | 0,0% | 0,1% | 0,1% | 0,8% | 0,0% | 0,0% |
| AT007 | 0,9% | 0,9% | 80,1% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,9% | 0,0% | 0,0% |
| AT008 | 0,9% | 0,9% | - | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,9% | 0,0% | 0,0% |
| AT009 | 0,8% | 0,8% | - | 0,0% | 0,3% | 0,3% | 0,9% | 0,0% | 0,0% |
| '10865' | 0,1% | 0,1% | 77,4% | 0,3% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | - | 0,0% |
| '10980' | - | - | 60,7% | 0,6% | 0,1% | 0,2% | 1,7% | - | 0,1% |
| 'P532' | 0,0% | 0,0% | - | 0,3% | 87,5% | 87,5% | 0,0% | - | 0,1% |
| 'P856' | 0,0% | 0,0% | - | 0,4% | 87,5% | 87,5% | - | - | 0,0% |
| 'P975' | 0,0% | 0,0% | - | 0,3% | 87,5% | 87,5% | - | - | 0,1% |
| 'P982' | 0,0% | 0,0% | - | 0,4% | 87,5% | 87,5% | - | - | 0,0% |
| Durchschnitt | 0,8% | 0,8% | 73,6% | 0,2% | 23,9% | 23,9% | 1,0% | 0,0% | 0,0% |

Tabelle 15 Ergebnis der Auswertung der Verfügbarkeit einzelner Sensorwerte bei synoptischen Wetterstationen

Ein Strich („-“) in der Liste bedeutet, dass der betreffende Datentyp bei dieser Wetterstation überhaupt nicht verfügbar war. Die Globalstrahlung (GS) fehlt in der Liste voll-

ständig, weil für keine der im WOLKE Zielgebiet relevanten Wetterstationen die GS erfasst werden konnte.

Statistik der gemeldeten Wetterzustände

Im Rahmen der Erhebungsstatistik wurde auch eine grobe oberflächliche Auswertung der gemeldeten Wetterzustände vorgenommen, Das Ergebnis ist in der Tabelle 16 zusammengefasst. Die Häufigkeit ist immer in Prozent der für diesen Messwert bzw, Datentyp insgesamt verfügbaren gültigen Stundenwerte.

Zunächst wurde eine grobe Klassierung der gemeldeten Niederschlagsarten bzw. Wettererscheinungen (ww) (vergleiche auch Tabelle 9) nach „kein Niederschlag“, „Niederschlag“ (= alle Arten von Niederschlag, der nicht genau als Regen oder Schnee identifizierbar ist), „Regen“ und „Schnee“. Zunächst erscheint der Wert für „keine Niederschlag“ mir nur 17,2% im Vergleich zu den Auswertungen der Straßenwetter-Stationen niedrig. Dadurch, dass nur in 26,4% des Erfassungszeitraums überhaupt Niederschlagsarten-Daten vorlagen kann dieser Wert aber relativiert werden. Ob jedoch die fehlenden Angaben alle als „kein Niederschlag“ zu werten ist, kann noch nicht gesagt werden, das bleibt einer weiteren genaueren Analyse vorbehalten. Der Zustand „Nebel“ ergibt sich auch aus den Beobachtungen der Niederschlagsart (NA) bzw. Wettererscheinungen (ww). Dieser Anteil ist ebenfalls unter dem Aspekt der geringen Anzahl von Beobachtungsdaten in Vergleich zum Erfassungszeitraum, zu sehen.

| ID | Wetterzustände | | | | | |
|---------------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Kein Niederschlag | Niederschlag | Regen | Schneefall | Frost | Nebel |
| AT001 | - | - | - | - | 28,8% | - |
| AT002 | - | - | - | - | 45,7% | - |
| AT003 | - | - | - | - | 14,8% | - |
| AT004 | - | - | - | - | 32,2% | - |
| AT005 | - | - | - | - | 23,5% | - |
| AT006 | 17,9% | 23,3% | 31,4% | 11,4% | 13,5% | 5,0% |
| AT007 | 12,9% | 24,6% | 28,9% | 10,6% | 15,4% | 1,9% |
| AT008 | - | - | - | - | 20,2% | - |
| AT009 | - | - | - | - | 18,0% | - |
| '10865' | 29,7% | 25,8% | 28,7% | 8,1% | 13,4% | 2,6% |
| '10980' | 8,3% | 10,5% | 12,4% | 21,9% | 35,4% | 44,1% |
| 'P532' | - | - | - | - | 15,6% | - |
| 'P856' | - | - | - | - | 17,9% | - |
| 'P975' | - | - | - | - | 16,1% | - |
| 'P982' | - | - | - | - | 22,2% | - |
| Durchschnitt | 17,2% | 21,0% | 25,4% | 13,0% | 22,2% | 13,4% |

Tabelle 16 Häufigkeit von bestimmten Wetterzuständen der einzelnen Wetterstationen

Der Zustand FROST wurde aus der Lufttemperatur bestimmt. Alle Stundenwerte bei dem die Lufttemperatur unter 0°C lag, wurden als Frostzustand gezählt. Demnach wä-

ren Durchschnittlich im Jahr insgesamt für ca. 650 h (ca. 81 Tage) die Lufttemperaturen im Frostbereich.

3.5.3 Datenaufbereitung

3.5.3.1 Verfahren zur Verifikation und Wetterzustandsklassierung

In Anlehnung an die bei mickS vorhandenen Erfahrungen im Betrieb von Straßenwetter-Informationssystemen und früheren Arbeiten, wurde ein Regelbasiertes Verfahren zur Klassierung von lokalen Fahrbahnbezogenen Wetterzuständen erarbeitet, welches auch gleichzeitig eine Verifikation der Rohdaten darstellt.

Das Verfahren sieht eine Klasseneinteilung vor, die sich aus den Erfahrungen der Winterdienste ableitet. In der Europäischen Norm prEN15518:2006-Teil3, sowie in der deutschen TLS sind Fahrbahnzustände vordefiniert. Diese Zustände sind noch geeignet erweitert und differenziert worden (siehe Tabelle 17).

| Code | Klasse | Bedeutung |
|------|--------------------------------|--|
| 1 | Trocken | Die Fahrbahn ist trocken |
| 2 | Feucht | Die Fahrbahn nicht trocken aber noch nicht nass und die Fahrbahntemperatur ist positiv. |
| 3 | Nass | Die Fahrbahn ist nass (größer als 0,1 mm) und die Fahrbahntemperatur ist positiv. |
| 8 | Feucht/Restsalz | Die Fahrbahn ist unter dem Nullpunkt und feucht aber durch ausreichend Restsalz (noch) keine Glättegefahr. |
| 4 | Nass/Restsalz | Die Fahrbahn ist unter dem Nullpunkt und nass aber durch ausreichend Restsalz (noch) keine Glättegefahr |
| 5 | Reifglätte | Die Fahrbahn ist feucht und die Fahrbahntemperatur ist auf dem Gefrierpunkt oder darunter und es ist nicht ausreichend Taumittel vorhanden und es kondensiert (supplimiert) Feuchte aus der Umgebungsatmosphäre. |
| 6 | Schneeglätte | Die Fahrbahn ist nicht trocken und die Fahrbahntemperatur ist auf dem Gefrierpunkt oder darunter und es ist nicht mehr ausreichend Taumittel vorhanden und es schneit mit signifikanter Intensität. |
| 7 | Eisglätte | Die Fahrbahn ist nicht trocken und die Fahrbahntemperatur ist auf dem Gefrierpunkt oder darunter und es ist nicht ausreichend Taumittel vorhanden und es regnet mit signifikanter Intensität (Eisregen) |
| 9 | Glatteis (überfrierende Nässe) | Die Fahrbahn ist feucht oder nass und die Fahrbahntemperatur ist auf dem Gefrierpunkt oder darunter und es ist nicht mehr ausreichend Taumittel vorhanden. |

Tabelle 17 Liste der lokalen Fahrbahnbezogenen Wetterzustandsklassen

Die Darstellung und Beschreibung der einzelnen Regeln würden den Umfang des Berichtes sprengen. Daher soll lediglich das Verfahren in Form eines Übersichtsmodells

(siehe Abbildung 11) dargestellt werden. Die Klassen können in der späteren Auswertung zur Clusterung der Verkehrsdaten verwendet werden.

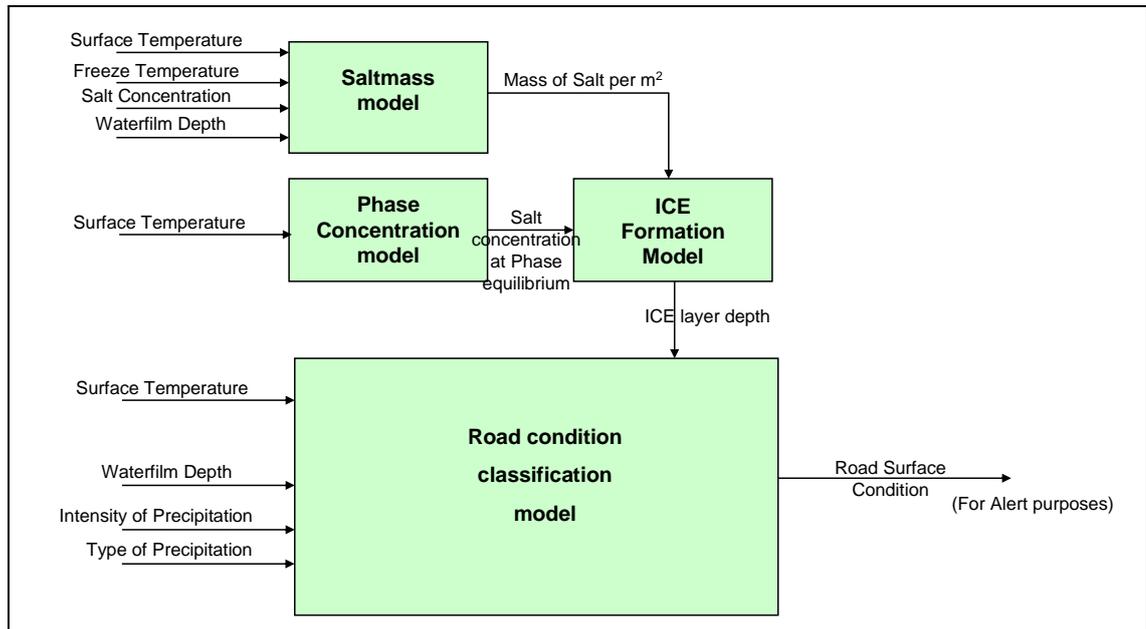


Abbildung 11: Modellstruktur der Fahrbahnzustandsklassierung

Durch die darin enthaltene Glättung der Daten und die Überprüfung der z.B. der Gefrieretemperatur bzw. Restsalzangaben ist auch eine Verifikation und in gewisser Weise auch eine Ersatzwertbildung implizit enthalten. Sind wichtige Daten über längeren Zeitraum nicht vorhanden bzw. gestört, wird auch die Klassierung abgebrochen und eine Fehlerklasse generiert. Diese Daten werden dann aus der Analyse ausgeschlossen.

Der Ersatz bzw. Schätzung der in der Erfassung fehlenden Wasserfilmdicke bzw. Bedeckung der Fahrbahnoberfläche, die für die Auswertung als wichtiger Parameter angesehen wird, ist im Folgenden beschrieben.

3.5.3.2 Verfahren zur Schätzung der Wasserfilmdicke (WFD)

Unter der von Fahrbahnsonden in Umfelddatenstationen messtechnisch ermittelten Wasserfilmhöhe in [mm] wird üblicherweise 1 Liter/m² flüssige Benetzung verstanden. Dieser Wert ist unabhängig von der Textur des Fahrbahnbelags der Strecke, da die Messtechnik von eingebauten Sonden diesen nicht berücksichtigen kann. Streng genommen müsste die Textur der Fahrbahnoberfläche in der weiteren Datenverarbeitung berücksichtigt werden, was aber in der Praxis kaum gemacht wird.

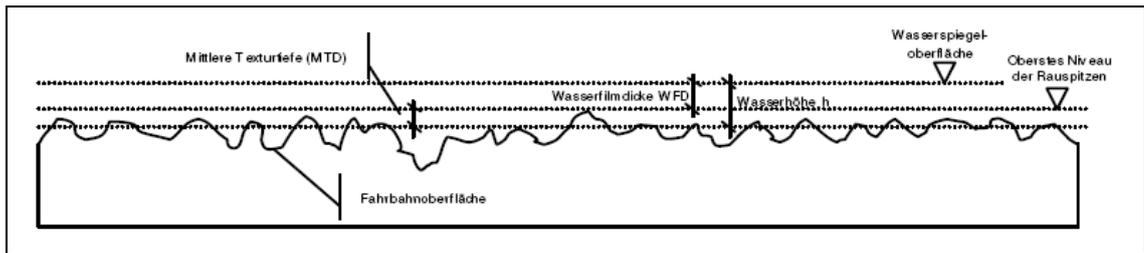


Abbildung 12: Darstellung Wasserfilmdicke und der mittleren Textur-Rautiefe

Beispielsweise ist die, für den Aquaplaning Effekt, relevante Wasserfilmdicke diejenige welche über die volumetrisch ermittelte mittlere Textur-Rautiefe MTD in [mm] hinausgeht. Die MTD bezeichnet dasjenige Volumen, welches auf einen Quadratmeter von der Textur aufgenommen werden kann (siehe Abbildung 12).

Für die Auswertung in WOLKE wird die bereits durch die mittlere Textur-Rautiefe bereinigte Wasserfilmdicke verstanden. Von den analysierten Querschnitten sind leider keine Textur-Rautiefen bekannt. Bei mickKS ist für die Anwendung in Verkehrsbeeinflussungsanlagen bereits ein Wasserfilmhöhenmodell erarbeitet und auch in vielen Jahren praktischen Einsatzes erprobt worden. Dadurch wurde auch eine durchschnittliche Texturtiefe berücksichtigt. Das Wasserfilmhöhen-Modell ist in Abbildung 13 dargestellt.

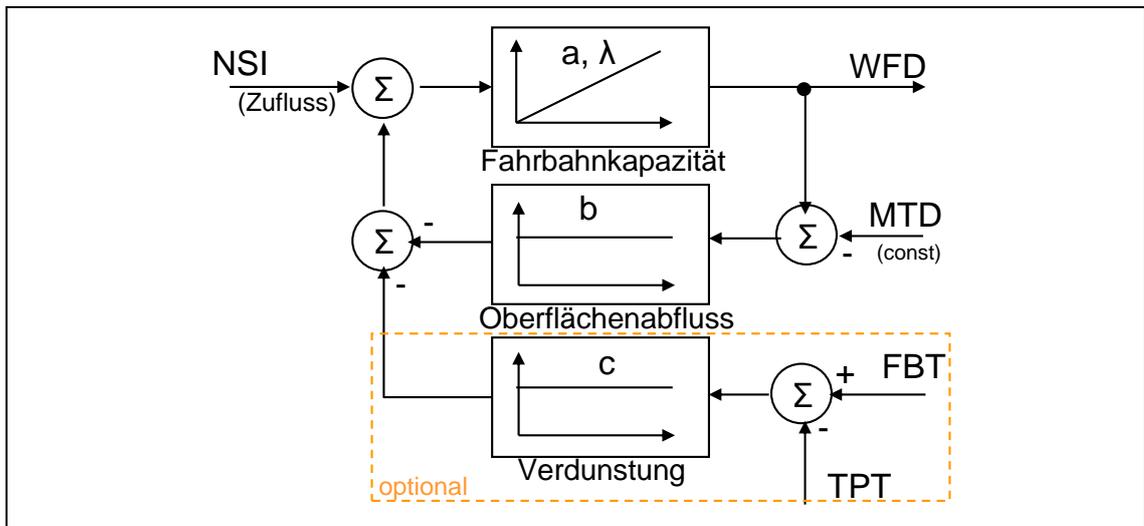


Abbildung 13: Modellstruktur für die Schätzung der Wasserfilmdicke

Das Modell [31] (siehe Abbildung 13) berücksichtigt die ansteigende Wasserfilmdicke WFD [mm] je nach Niederschlagsintensität NSI [mm/h] (Integrationsglied mit Integrationszeitkonstante λ und Koeffizient a), sowie den Abfluss über die mittlere Textur-Rautiefe [mm] hinaus mit dem Parameter b (Abhängig auch von Längs- und Querneigung der Fahrbahn) und auch die Verdunstung in Abhängigkeit von der Differenz der Fahrbahntemperatur FBT [°C] zur Taupunkttemperatur TPT [°C] der umgebenden Atmosphäre mit dem Koeffizienten c . Das Verhalten entspricht auch ziemlich genau dem in [13] beschriebenen Verlauf der Wasserfilmhöhe (Abbildung 14).

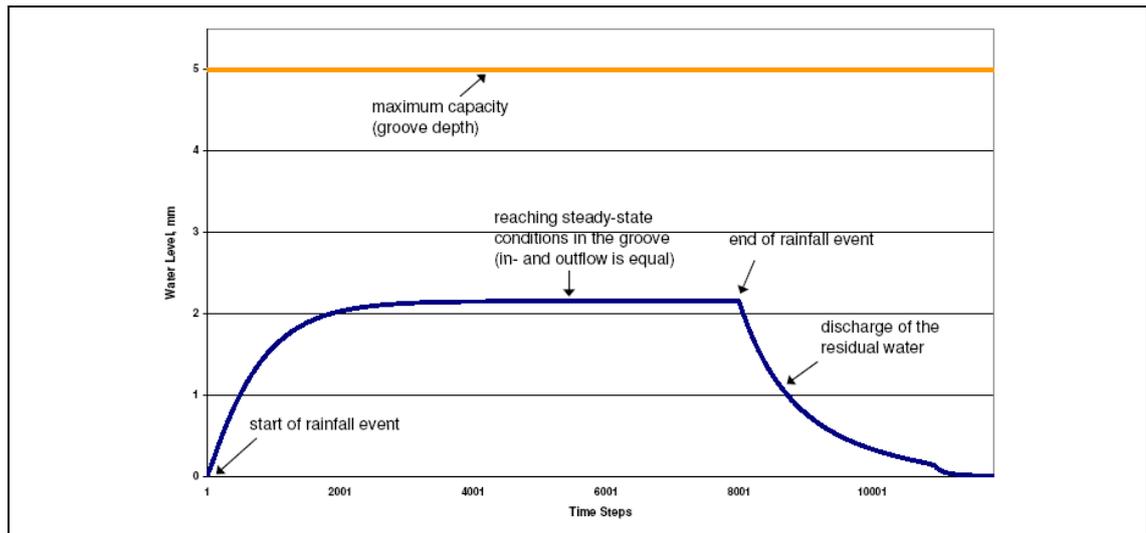


Abbildung 14: Phasen des Oberflächenabflusses. Quelle: [13]

Da bei den Umfelddatenstationen die Verkehrsdaten nicht berücksichtigt werden können, fehlt streng genommen auch ein Term für den Abtrag des Wasserfilms durch die Verkehrsstärke. Dieses Verhalten kann im Rahmen der Auswertungen in WOLKE noch ergänzend untersucht werden.

Da der Niederschlag immer als wasseräquivalent angegeben wird, ist das Modell auch prinzipiell auch für Schneefall und damit Schneebedeckung geeignet. Die Wasserfilmdicke ist in diesem Fall auch als Wasseräquivalent (also Wassergehalt des Schnees). Wenn allerdings der Niederschlag in Form von Schnee oder Schneematsch auf der Oberfläche liegen bleibt, dann ist zu erwarten, dass das Abflussverhalten sich von flüssigem Wasser unterscheidet. Darüber gibt es noch keine abschließenden Erkenntnisse.

Die Parameter für die Wasserfilmhöhen-Schätzung müsse in Ermangelung von real gemessenen Vergleichsdaten von der WOLKE Zielstrecke aus anderen verfügbaren Stationsdaten abgeleitet werden bzw. es kann vorerst auf die bisherigen praktisch eingesetzten Parameter zurückgegriffen werden.

4 AP 4 Datenanalyse

4.1 Analyse des lokalen Verkehrsgeschehens

4.1.1 Ziele der Datenanalyse zum lokalen Verkehrsgeschehen

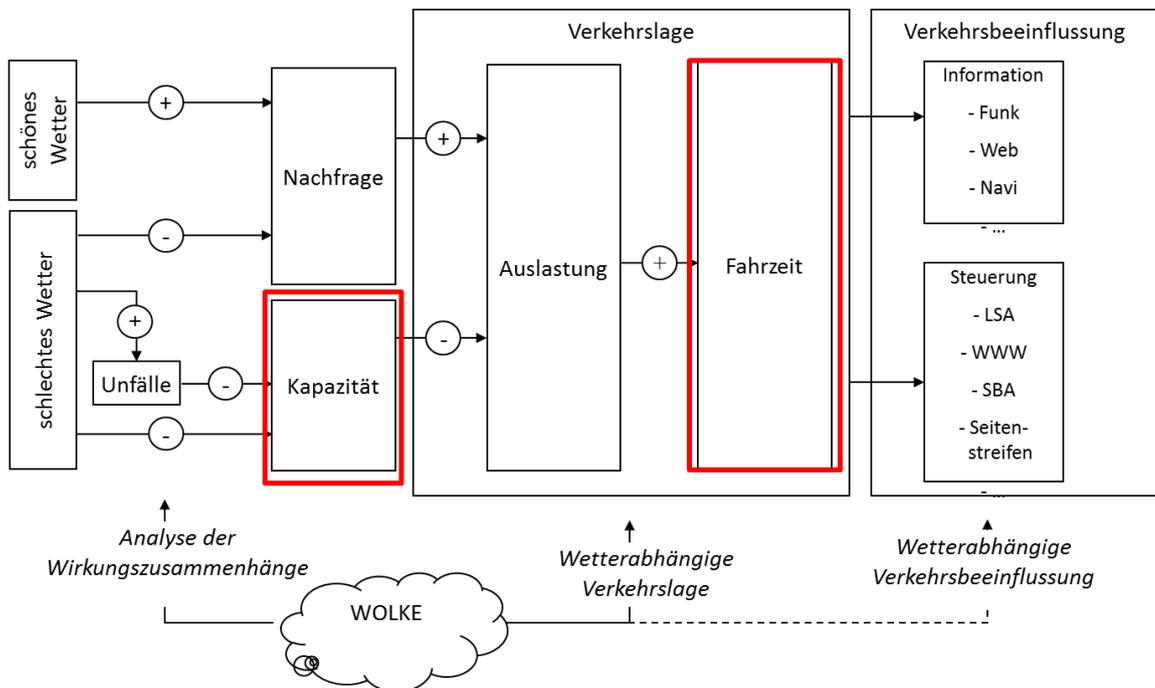


Abbildung 15 Übersicht Komponenten der Modellierung und Kennzeichnung der Ziele der Analyse des lokalen Verkehrsgeschehens

In Abbildung 15 sind die wesentlichen Komponenten hervorgehoben die bei der Analyse im Vordergrund standen.

Ziel war es die Zusammenhänge zwischen konkreten Straßenwetter- und Fahrbahnzuständen und dem Fahrverhalten zu finden und diese qualitativ und quantitativ zu bestimmen.

Die Analysen waren so angelegt, dass aus den gefundenen qualitativen und quantitativen Zusammenhängen geeignete Modelle für die Kalibrierung der Verkehrsmodelle abgeleitet werden können. Im Wesentlichen sollte dabei die Beschreibung der freien Geschwindigkeiten und der Kapazität in Abhängigkeit von konkret mess- und prognostizierbaren Straßenwetterzuständen ermöglicht werden.

4.1.2 Beschreibung der Analysemethoden

Zu Beginn der Untersuchungen stand die Sichtung der Ganglinien. Dabei war wichtig die Identifikation von Verkehrsstörungen, welche eindeutig von Wetterzuständen verur-

sacht worden sind. Dabei stand auch im Vordergrund die Interpretation der Straßenwettermessdaten aus den Umfelddatenstationen der Verkehrsbeeinflussungsanlagen und aus den Glättemeldeanlagen des SWIS (Straßenwetter-Informationssystem) des Freistaates Bayern entlang der Untersuchungsstrecke A8 zwischen Holzkirchen und Salzburg.

Aus den obigen Voruntersuchungen wurde nochmals die Wahl der zu untersuchenden Einflussgrößen überprüft und in Zusammenarbeit mit den anderen Partnern die Wetterklassierung festgelegt. Wobei zu betonen ist, dass für die Untersuchung der Wetterabhängigkeit für das lokale Verkehrsgeschehen nicht nur die Wetterklassen, sondern auch die Einflussgrößen selbst herangezogen wurden. Außerdem wurden für einige Einflussgrößen die bereits dargestellten Ersatzwerte gebildet.

4.1.2.1 Identifikation von witterungsbedingten Verkehrsstörungen anhand von Ganglinien

Zunächst wurden systematisch in den Ganglinien nach Verkehrsstörungen gesucht. Dabei wurden im wesentlichen Einbrüche der mittleren PKW Geschwindigkeit herangezogen und dazu jeweils die Wetterklassen betrachtet. Ein Einbruch der freien Geschwindigkeiten wurde dann als witterungsabhängig eingestuft, wenn die mittlere PKW Geschwindigkeit deutlich unter der durch die Verkehrsdichte bereinigte Geschwindigkeit liegt. Die Bereinigung durch die Verkehrsdichte wurde aus dem Fundamentalmodell nach Ning Wu [26] und den Angaben für die entsprechenden Streckeneigenschaften in der HBS [27] abgeleitet. Es sei denn es waren davon abweichende Verhältnisse erkennbar oder bekannt. Für die Ganglinien wurden zunächst die erfassten Werte im Minutenabstand verwendet. Es stellte sich aber schnell heraus, dass für eine derartige Betrachtung die auf 15 Minuten-Intervalle aggregierten Werte deutlich besser eignen.

Im Folgenden sind beispielhaft einige deutlich identifizierbare Ereignisse dargestellt.

Nebelereignis am 20. bis 21. November 2010 (A8, Q61)

Die Ganglinien (siehe Abbildung 16) der Verkehrsdaten des Querschnitts Q61 auf der A8 (km 33,39, Fahrtrichtung Salzburg) und die Sichtweitendaten des benachbarten Messquerschnitts Q62 (km 35,37, Fahrtrichtung Salzburg) zeigen ein Nebelereignis mit einer Verminderung der gefahrenen freien Geschwindigkeiten. Zunächst beginnt sich ab ca. 14:00 Uhr Nebel zu bilden. Die Verkehrsstärken für PKW liegen zu diesem Zeitpunkt anfänglich im Bereich von ca. 1500 PKW/h. Die Sichtweite liegen am Nachmittag im Bereich von ca. 250 m. In diesem Bereich ist kaum eine Auswirkung auf die gefahrenen Geschwindigkeiten zu spüren. Nachdem aber ab ca. 22:00 Uhr die Sichtweiten noch einmal abfallen und um die 100 m liegen und auch die Verkehrsstärke abnimmt (ca. 300 Kfz/h) bleibt eine deutlich sichtbare Verminderung der gefahrenen Geschwindigkeiten (ca. 90 ...100 km/h) zu verzeichnen. Die durchschnittlich gefahrene freie Geschwindigkeit liegt ansonsten an diesem Querschnitt im Bereich von 125 bis 130 km/h.

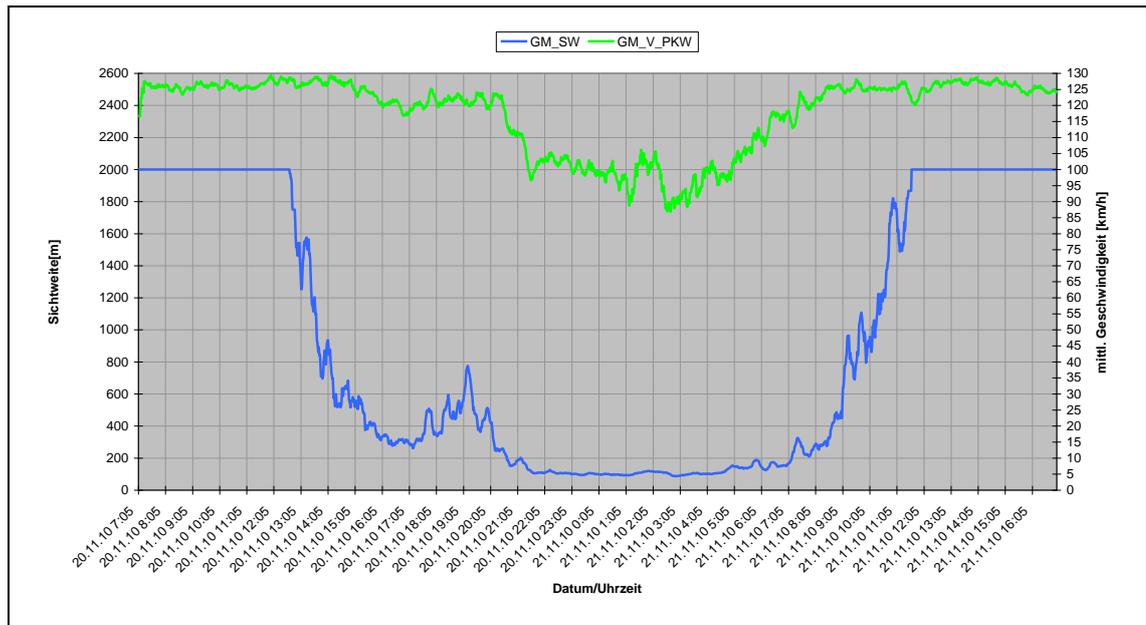


Abbildung 16: Ganglinie mittlere Geschwindigkeiten versus Sichtweite (A8, Q61 20./21.11.2010). Alle Zeitangaben in UTC

Für diese Darstellung wurden die minütlichen Verkehrsdaten für alle Fahrstreifen der Fahrtrichtung zusammengefasst und auf 15 min gleitende Mittelwerte aggregiert. Außerdem wurden nur die Fahrzeugklasse PKW betrachtet. Die minütlichen Sichtweitedaten an dem benachbarten Querschnitt wurden ebenfalls auf 15 min gleitende Mittelwerte aggregiert.

Schneeglätte am 26. November 2010 (A8, Q61)

Ein weiteres Fallbeispiel von massiver Schneeglätte mit erheblicher Verkehrsstörung an denselben Querschnitten konnte wenige Tage später beobachtet werden (siehe Abbildung 17). Am Freitag den 26.11.2010 Nachmittags bei einer Verkehrsstärke von nahezu 3000 Kfz/h setzt um ca. 14:00 Uhr starker Schneefall ein, der gegen 15:00 Uhr so heftig wird, dass Intensitäten von über 10 mm/h wasseräquivalent erreicht werden. Diese Intensität entspricht ungefähr einem Neuschneeanfall von 100 cm pro Stunde. Durch diese Schneefallintensität ergibt sich zunächst eine nicht unerhebliche Sichtbehinderung, die sich auch sofort in einer Verminderung der gefahrenen Geschwindigkeit niederschlägt. Dazu kommt etwas verzögert eine deutlich abnehmender Reifen-Kraftschluss durch zunehmende Schneebedeckung auf der Fahrbahn, was ebenfalls zur Rücknahme der Geschwindigkeit führt. Bei einer hohen Verkehrsstärke und einer so schnell zunehmenden Intensität steigt dadurch auch erheblich das Unfallrisiko. Die gefahrenen Geschwindigkeiten gehen auch in kurzer Zeit von 110 km/h auf unter 10 km/h zurück, obwohl die Verkehrsnachfrage nach wie vor auf hohem Niveau ist. Es ist jetzt ein erheblicher Stau entstanden. Die Verkehrsstärke sinkt auf Werte zwischen 300 und 600 Kfz/h eine erhebliche Kapazitätsminderung des Querschnitts. Obwohl der Schneefall bereits nach 15:30 fast ganz aufhört, dauert diese Stausituation fast 3h un-

vermindert an. Wenn die Ursache dafür alleine auf Schneeglätte auf der Straße zurückzuführen wäre, müsste sich die Situation bei funktionierendem Winterdienst erfahrungsgemäß schneller wieder entspannen. Es kann also noch eine zusätzliche Ursache für die Kapazitätsreduktion vermutet werden. Man wird auch tatsächlich in den ebenfalls vorliegenden Unfalldaten fündig.

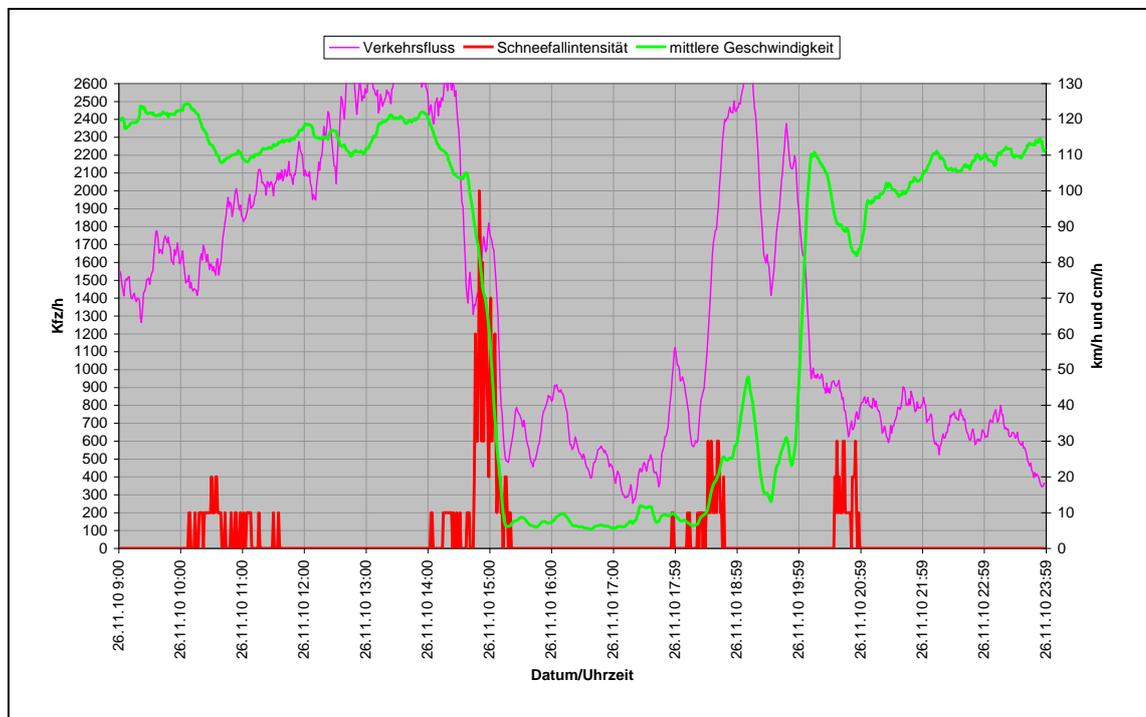


Abbildung 17: Ganglinien Schneefallintensität, Geschwindigkeit und Verkehrsfluss eines Schneeglätteereignisses am 26.11.2010 A8, Q61 km 33,39. Alle Zeitangaben in UTC

In dieser Zeit und auf dieser Strecke, Fahrtrichtung Salzburg, sind zwei Unfälle registriert:

15:30 Uhr (UTC) auf km 31,1

16:30 Uhr (UTC) auf km 34,5

In einem Fall wurde als Ursache Schneeglätte angegeben im anderen Fall wurde keine Ursache, aber dafür der Fahrbahnzustand „Schneeglätte“ vermerkt. Alle Zeitangaben in diesem Fallbeispiel sind auf UTC bezogen. Für die lokale Uhrzeit ist jeweils eine Stunde zu addieren.

Im weiteren Verlauf um ca. 18:30 Uhr scheint sich der Stau aufzulösen wegen Winterdienstmaßnahmen und Räumung der Unfallstelle(n). Es ist deutlich an der Verkehrsstärke der Stauabfluss zu erkennen mit Verkehrsstärken von über 2600 Kfz/h. Die Kapazität der Strecke ist weitgehend wieder hergestellt. Während des Stauabflusses gibt es noch ein Schneefallereignis mit mäßiger Intensität man sieht verzögert einen weiteren Einbruch der Kapazität und der gefahrenen Geschwindigkeiten, was vielleicht auch auf stattfindende Winterdienstmaßnahmen zurückzuführen sein könnte. Später sieht

man bei inzwischen deutlich abgenommener Verkehrsnachfrage noch einmal eine Schneefallphase, die zu einer kurzzeitigen Verminderung der freien Geschwindigkeiten auf ca. 80 km/h wegen Schneeglätte bzw. Schneematsch führt, es ist aber keine Kapazitätsreduktion zu verzeichnen. An den Restsalz-Daten (nicht im Diagramm dargestellt) sieht man auch, dass zwischen 16:30 und 17:00 ein Streu- und Räumeeinsatz stattgefunden haben musste. Und im Verlauf wahrscheinlich noch einmal, der Zeitpunkt ist aber nicht erkennbar, da danach die Restsalzwerte auf Maximum verharren. Die Fahrbahntemperaturen waren im Bereich von $-1,5 \dots -2,5^\circ\text{C}$ (nicht dargestellt). Es lässt sich daraus und aus den Restsalzwerten schließen, dass außer nach den unmittelbaren Neuschneemengen (im Zeitraum 15:00 bis 16:30 Uhr UTC) es sich weniger um eine feste Schneeeauflage, als vielmehr im späteren Verlauf um Schneematsch gehandelt haben muss.

Schneefall mit schneebedeckter Fahrbahn am 20. Januar 2011 (A8, Q62)

Ein weiteres Beispiel für eine witterungsbedingte Verkehrsstörung ist in Abbildung 1 zu sehen. Beim einsetzenden Schneefall und ansteigender Bedeckung auf der Fahrbahn gehen die gefahrenen Geschwindigkeiten teilweise bis 20 km/h herunter. Man sieht, dass durch den anfänglich moderaten Schneefall die Sichtbehinderung keine maßgeb-

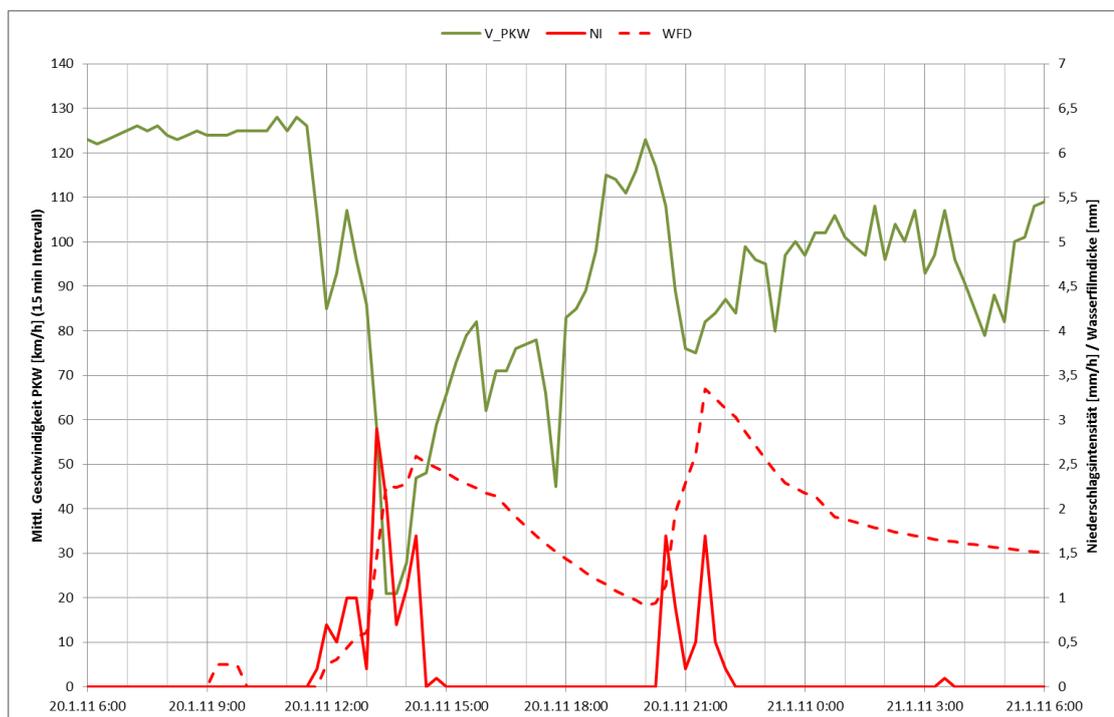


Abbildung 18: Ganglinien für mittl. Geschwindigkeit, Niederschlagsintensität und Schneelayer auf der Fahrbahn. A8, Q62, 20...21.01.2011 06:00...06:00

liche Rolle spielt, weswegen auch die Geschwindigkeiten nicht sofort heruntergehen.

Erst bei zunehmendem Schneelayer auf der Fahrbahn, ergibt sich eine deutliche Reduktion der Geschwindigkeiten. Man sieht wie mit Abnahme des Schneelayers auch die Geschwindigkeit langsam wieder nach oben gehen. Durch den Verkehr wird die Schneebedeckung auch abgetragen. Nach erneutem Einsetzen von Schneefall geht die Schneebedeckung auch wieder nach oben und die Geschwindigkeiten nach unten.

4.1.2.2 Wetterklassen für lokales Verkehrsgeschehen

Im Straßenwetter-Informationssystem der Betriebsdienste gibt es Straßenzustandsklassen, die für Entscheidungshilfen im Winterdienst geeignet sind. In der Europäischen Norm prEN 15518-3 sind (witterungsbedingte) Fahrbahnzustände definiert. Darauf aufbauend werden für den praktischen Einsatz noch weitere Unterteilungen und Verfeinerungen eingeführt.

Diese Fahrbahnzustände für Winterdienst und für die Verifikation der Daten sind in der Tabelle 17 im Abschnitt 3.5.3.1 beschrieben.

Außerdem wurde speziell für das WOLKE Projekt in Zusammenarbeit mit den internationalen Partnern eine weitere WOLKE Straßenwetterklassierung eingeführt.

Diese Definition ist speziell unter folgenden Prämissen gewählt worden:

- Es dürfen nur Meßwerte verwendet werden, die auch durch bei den meisten Straßenwetter-Meßstellen erfasst werden
- Es dürfen nur Daten verwendet werden, welche auch üblicherweise von Wetterdiensten auf die entsprechenden Positionen prognostiziert werden können.
- Möglichst einfache Kriterien

Die verwendeten Messgrößen werden üblicherweise von den meisten Straßenwetter-Messstellen erfasst und können auch von den Wetterdiensten auf die jeweilige geographisch Position kurz- bis mittelfristig vorhergesagt werden. Die Messgrößen sind:

- NSI Niederschlagsintensität in [mm/h]
- FT Feucht(kugel)temperatur
- FBT Fahrbahnoberflächentemperatur

| Wetterklasse | | Klassenkriterien | | | |
|--------------|-----------------|------------------|---------------|------|--------|
| Klasse | Kurzbezeichnung | NSA | NSI | FT | FBT |
| | | | mm/h | °C | °C |
| 1 | Trocken | kein | = 0 | * | * |
| 2 | Nass_mRE | Regen | < 0,5 | >= 0 | > - 2 |
| 3 | Glaette_mRE | Regen | < 0,5 | >= 0 | <= - 2 |
| 4 | Nass_sRE | Regen | >= 0,5 | >= 0 | > - 2 |
| 5 | Matsch_mSCH | Schnee | < 0,5 | < 0 | > - 2 |
| 6 | Schnee_mSCH | Schnee | < 0,5 | < 0 | <= - 2 |
| 7 | Matsch_sSCHm | Schnee | >= 0,5; < 3,5 | < 0 | > - 2 |
| 8 | Schnee_sSCHm | Schnee | >= 0,5; < 3,5 | < 0 | <= - 2 |
| 9 | Matsch_ssSCHm | Schnee | >= 3,5 | < 0 | > - 2 |
| 10 | Schnee_ssSCHm | Schnee | >= 3,5 | < 0 | <= - 2 |

Tabelle 18: WOLKE (lokale) Straßenwetterklassen, Tabelle der Kriterien

NSA Niederschlagsart ist nur informell mit angegeben, diese ergibt sich näherungsweise durch die Feuchttemperatur. Die Feuchttemperatur (oder auch Feuchtkugeltemperatur genannt) errechnet sich näherungsweise aus der Taupunkttemperatur TPT und der Lufttemperatur LT wie folgt:

Formel 1 Berechnung der Feucht(kugel)Temperatur

$$FT = \frac{(TPT + LT)}{2} \quad \text{Alle Werte in } ^\circ\text{C}$$

Die Taupunkttemperatur wird üblicherweise direkt angegeben. Die Berechnung aus relativer Feuchte und Lufttemperatur ist in Abschnitt 3.5.1.2 aufgeführt.

Bei der NSI Niederschlagsintensität ist unbedingt zu beachten, dass zwischen den vorhergesagten Niederschlagsintensitäten und den aktuell gemessenen Intensitäten ein erheblicher Unterschied sein kann. Der Unterschied liegt in den meist erheblich unterschiedlichen Aggregationsintervallen. Bei gemessenen Intensitäten beträgt das Messintervall oft nur 1 Minute. Die während diesem kurzen Intervall gemessenen Intensitäten werden auf 1 Stunde [mm/h] bezogen. Bei Vorhersagewerten wird oft die Niederschlagsmenge über 3 bis 6 Stunden als Basis für die Intensität verwendet, die dann über diese lange Integrationszeit auf 1 Stunde [mm/h] bezogen wird. Die Ergebnisse können erheblich auseinanderliegen. Daher müssen vorhergesagte und gemessene Intensitäten für die Klassierung auf das gleiche Integrationsintervall bezogen werden.

Wetterklassen-Gruppierung

Der Übersichtlichkeit halber wurden für einige Auswertung noch die differenzierten Wetterklassen in drei Gruppen eingeteilt: Trocken, Nässe und Schnee. Die Zuordnung ist in Tabelle 19 wiedergegeben.

| Wetterklasse | | Gruppe |
|--------------|-----------------|-----------------|
| Klasse | Kurzbezeichnung | Kurzbezeichnung |
| 1 | Trocken | Trocken |
| 2 | Nass_mRE | Nässe |
| 3 | Glaette_mRE | |
| 4 | Nass_sRE | |
| 5 | Matsch_mSCH | Schnee |
| 6 | Schnee_mSCH | |
| 7 | Matsch_sSCHm | |
| 8 | Schnee_sSCHm | |
| 9 | Matsch_ssSCHm | |
| 10 | Schnee_ssSCHm | |

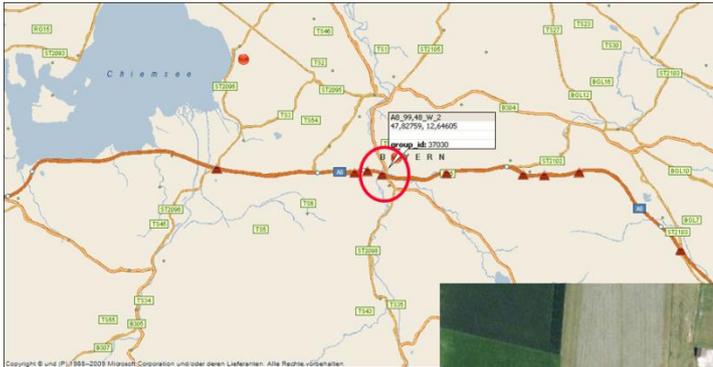
Tabelle 19 Liste der Zuordnung der Wetterklassen zu übergeordneten Gruppen.

4.1.2.3 Selektion geeigneter Untersuchungs-Querschnitte

Zur genaueren Analyse wurden einige repräsentative Querschnitte ausgesucht. Da das Fahrverhalten prinzipiell auch von den konstruktiven Eigenschaften der Strecke abhängt, wurden die Auswahl nach Anzahl der Fahrstreifen, nach den Kurvenradien und der Längsneigung der Strecken ausgewählt. Von der ABDS wurden Profildaten über die Untersuchungsstrecke auf der Bundesautobahn A8 zur Verfügung gestellt. Über die sogenannte konstruktive Haltesichtweite und die Kurvenradien (nach HBS [27]) gab es keine Informationen. Für die Modellbildung wurde diese Kennwerte der Querschnitte aus den Kartendaten grob geschätzt.

Im Folgenden sind die ausgewählten Querschnitte kurz vorgestellt.

Querschnitt: Q231 A8 km 99,500



WQ_DEVICEGROUP_ID: 37040
MQ_DEVICEGROUP_ID: 4875

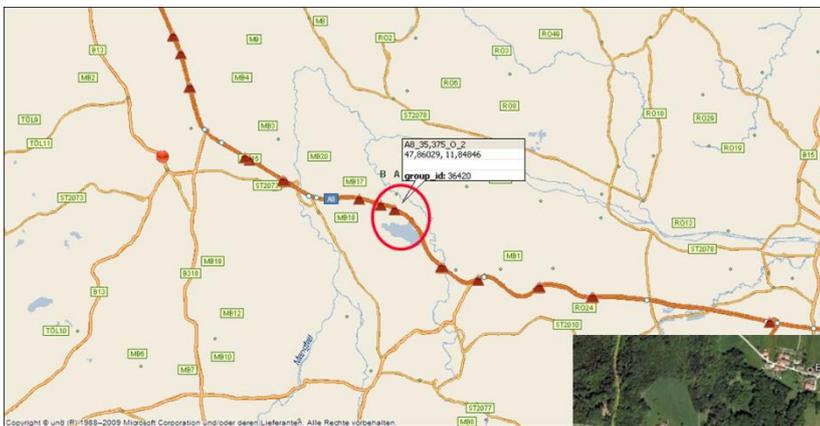
Querschnitt: Q231 A8 km 99,5

Kein wesentlicher Kurvenradius
Keine wesentliche Quer- und Längsneigung
Lt. Profildaten Q229 und Q235 ABD/ZVM
2 Richtungs-Fahrstreifen
Fahrrichtung:
Mchn



Abbildung 19: Kenndaten und Lage des Querschnitts Q231 A8

Querschnitt Q62, A8 km 35,370



WQ_DEVICEGROUP_ID: 36420
MQ_DEVICEGROUP_ID: 4520

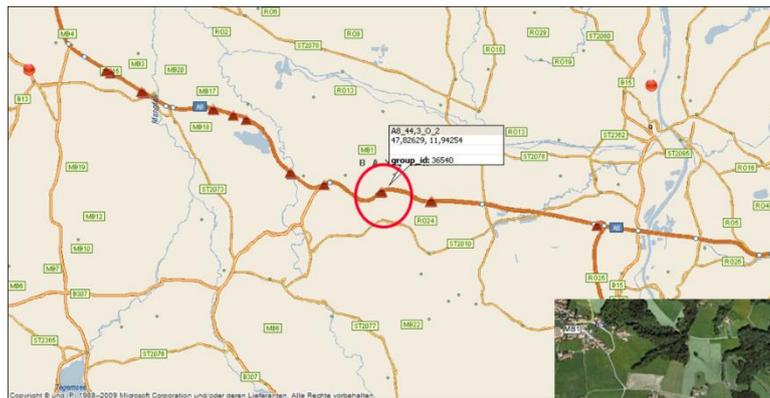
Querschnitt: Q62 A8 km 35,37

Kein wesentlicher Kurvenradius
keine wesentliche Quer- und Längsneigung
Lt. Profildaten Q61 und Q63 ABD/ZVM.
3 Richtungs-Fahrstreifen
Fahrrichtung:
Sbg



Abbildung 20: Kenndaten und Lage des Querschnitts Q62, A8 km 35,37

Querschnitt Q83, A8 km 44,300



WQ_DEVICEGROUP_ID: 36540

MQ_DEVICEGROUP_ID: 4552

Querschnitt: Q83 A8 km 44,300

Kurvenradius ca. 1000 m

Querneigung ca. -2,4% (nicht nennenswert)
 dafür nennenswerte Längsneigung ca. -6,0% (-0,062)

Lt. Profildaten der ABD/ZVM

3 Richtungs-Fahrstreifen

Fahrtrichtung: Sbg

Querschnitt Q81 A8 km
 43,584 hätte noch
 ausgeprägtere
 Neigungsdaten und
 Kurvenradien, jedoch an
 dieser Stelle keine Umfeld-
 daten verfügbar

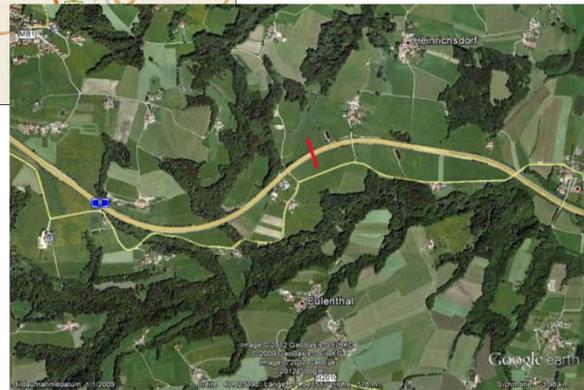


Abbildung 21: Kenndaten und Lage des Querschnittes Q82 A8

4.1.2.4 Aggregation und Aufbereitung der erfassten Daten

Die ersten Analysen haben ergeben, dass die erfassten Minutenwerte direkt nicht gut geeignet sind, um Abhängigkeiten des Verkehrsflusses vom Wetterzustand zu zeigen. Eine Aggregation der Minutenwerte auf eine Periode von 15 min zeigte die geringsten Streuungen (obgleich die Streuungen grundsätzlich hoch sind). Höhere Aggregationszeiten von 1 Stunde oder mehr zeigen bereits wieder zunehmende Streuungen in den Korrelationen. Dies erscheint auch plausibel. Die Reaktion des Fahrverhaltens auf Änderungen des Wetter- und Fahrbahnzustandes ist im Minutenbereich zu kurzfristig. Dazu kommen systematisch Streuungen und Verzögerungen bei der Messdatenerfassung. Demgegenüber sind Änderungen im Wetterzustand und im Fahrverhalten im Stundenbereich bereits häufiger, sodass die Korrelationen wieder undeutlicher werden.

Die detaillierten Analysen an den ausgewählten Querschnitten, wurden daher mit auf 15 min aggregierten Werten durchgeführt.

Im Folgenden sind alle bei der Aufbereitung erzeugten und der nachfolgenden Analyse verwendeten Datentypen aufgeführt (siehe Tabelle 20).

| Datentyp | Beschreibung |
|-------------------|--|
| MQ_DEVICEGROUP_ID | ID der Streckenstation Verkehrsdaten |
| WQ_DEVICEGROUP_ID | ID der Streckenstation Wetterdaten |
| Zeitstempel | Unix Zeitstempel UTC |
| DateTime.UTC | Datum und Uhrzeit in Textformat UTC |
| FBZ_EN | Fahrbahnzustand für den Winterdienst erweitert EN 15518 (siehe Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.) [enum] |
| FBZ | Fahrbahnzustand Original vom Sensor [enum] |
| WFD | Wasserfilmdicke [mm] |
| FBT | Fahrbahnoberflächentemperatur [°C] |
| GT | Gefrierpunkttemperatur [°C] |
| LT | Lufttemperatur [°C] |
| TPT | Taupunkttemperatur [°C] |
| SW | Sichtweite [m] |
| NS | Niederschlagsart [enum] |
| NI | Niederschlagsintensität [mm/h] |
| W_WKLASSE | WOLKE Wetterklasse (siehe Tabelle 18) [enum] |
| Q_Q_PKW | Verkehrsstärke PKW am gesamten Querschnitt [PKW/h] |
| Q_V_PKW | Mittlere Geschwindigkeit PKW am Querschnitt [km/h] |
| Q_Q_Kfz | Verkehrsstärke alle Fahrzeuge am Querschnitt [Fz/h] |
| Q_V_Kfz | Mittl. Geschwindigkeit alle Fz am Querschnitt [km/h] |
| Q_k_Kfz | Verkehrsdichte alle Fz am Querschnitt [Fz/km] |
| t_Kfz_Spur1 | Nettozeitlücke alle Fz Fahrspur 1 [sec] |
| t_Kfz_Spur2 | Nettozeitlücke alle Fz Fahrspur 2 [sec] |
| t_Kfz_Spur3 | Nettozeitlücke alle Fz Fahrspur 3 [sec] |
| k_Kfz_Spur1 | Verkehrsdichte alle Fz Fahrspur 1 [Fz/km] |
| k_Kfz_Spur2 | Verkehrsdichte alle Fz Fahrspur 2 [Fz/km] |
| k_Kfz_Spur3 | Verkehrsdichte alle Fz Fahrspur 3 [Fz/km] |
| V_PKW_Spur1 | Mittl. Geschwindigkeit PKW Fahrspur 1 [km/h] |
| V_PKW_Spur2 | Mittl. Geschwindigkeit PKW Fahrspur 2 [km/h] |
| V_PKW_Spur3 | Mittl. Geschwindigkeit PKW Fahrspur 3 [km/h] |

Tabelle 20: Liste der bei der Analyse verwendeten Datentypen

Fahrbahnzustände

Die von der Sensorik direkt stammenden Fahrbahnzustände sollten nach TLS [34] kodiert sein. Verschiedene GMA im SWIS liefern aber teilweise proprietäre Ausprägungen, sodass diese entsprechend konvertiert werden mussten. Verschiedene von Herstellern verwendete Fahrbahnzustände älterer Versionen sind in der TLS gar nicht vertreten, sodass eine Kombination der Fahrbahnzustände gewählt werden musste.

Im Abschnitt 3.5.1.2 in Tabelle 5 sind die Fahrbahnzustände aufgeführt, die direkt von der Sensorik gemeldet werden. Keine Messstelle unterstützt aber alle Zustände gleichermaßen.

Niederschlagsdaten

Die Messstellen der ausgewählten Querschnitte besitzen sogenannte „Present Weather“ Sensoren, die differenzierte Niederschlagsarten melden. Es werden aber nicht alle Ausprägungen, die möglich sind auch unterstützt. Im Abschnitt 3.5.1.2 in Tabelle 6 sind alle möglichen Ausprägungen und deren Kodierung (enum) aufgeführt.

Zur Plausibilisierung der Niederschlagsintensitäten wurden zudem Mindestwerte für die verschiedenen NS Meldungen (leicht, mäßig, stark) definiert. Lag der archivierte Messwert für NI unter dem Mindestwert, wurde der Mindestwert verwendet.

Die folgende Tabelle zeigt die verwendeten Mindestwerte.

| NS [enum] | NI [mm/h] |
|-----------|-----------|
| 40 | 0,5 |
| 41 | 0,5 |
| 42 | 3,0 |
| 43 | 6,0 |
| 50 | 0,5 |
| 51 | 0,5 |
| 52 | 3,0 |
| 53 | 6,0 |
| 60 | 0,5 |
| 61 | 0,5 |
| 62 | 3,0 |
| 63 | 6,0 |
| 70 | 0,5 |
| 71 | 0,5 |
| 72 | 3,0 |
| 73 | 6,0 |

Tabelle 21: Zuordnung der Mindestwerte für Niederschlagsintensität (NI) zu den Niederschlagsarten (NS)

Wasserfilmdicke

Die sogenannte Wasserfilmdicke (oder auch Wasserfilmhöhe) in mm bzw. Liter/m² ist ein wichtiges Maß für Bedeckung der Fahrbahnoberfläche mit flüssigen oder gefrorenem (oder irgendwelchen Zwischenstufen davon) Wasser oder Taumittellösung.

Obwohl einige der in die Fahrbahn eingebauten Sensoren Wasserfilmdicken messen können, wurden diese Werte in der ABDS bzw. VRZ nicht archiviert. Es war daher notwendig die Wasserfilmdicke aus dem Niederschlagsgeschehen zu schätzen. Das gebräuchliche Modell für die Wasserfilmdicke ist genauer im Abschnitt 3.5.3.2 und in [33] beschrieben.

Hier soll nur die verwendete vereinfachte Berechnung der Wasserfilmdicke, wie sie für die Analysen verwendet wurde, wiedergegeben werden:

$$b1 = 1 - 0,00367 * \Delta t / 60$$

$$b2 = 9,818 * \Delta t / (60 * 1000) \quad \text{Formel 2: Berechnung der WFD}$$

$$WFD_{t0} = b1 * WFD_{t-1} + b2 * NI_{t0}$$

Dabei ist:

WFD_{t0} = Wasserfilmdicke in mm zum aktuellen Abtastzeitpunkt t_0

WFD_{t-1} = Wasserfilmdicke in mm zum letzten vorhergehenden Abtastzeitpunkt $t-1$

NI_{t0} = Niederschlagsintensität in mm/h zum aktuellen Abtastzeitpunkt t_0

Zusätzlich wurden Mindestwasserfilme definiert, die vorhanden sein müssen, wenn die eingebauten Fahrbahnsensoren bestimmte Fahrbahnzustände melden. Diese wurden als zusätzliche Plausibilisierung verwendet.

| FBZ [enum] | WFD [mm] |
|------------|----------|
| 1 | 0,05 |
| 2 | 0,05 |
| 5 | 0,25 |
| 9 | 0,75 |
| 13 | 1,50 |
| 32 | 0,05 |
| 64 | 0,05 |
| 65 | 0,05 |
| 66 | 0,05 |

Tabelle 22: Zuordnung der Mindestwerte für WFD in mm zu gemeldeten Fahrbahnzuständen

Aggregation der Verkehrsdaten für den gesamten Querschnitt

Die Integration der Verkehrsstärke erfolgt über alle s Fahrstreifen im Intervall $t_0 \dots t_0 + \text{Agglv}$. W bei Agglv = Aggregationsintervall in min.

Die Verkehrsstärke wird immer bezogen auf Kfz/h. Wobei Q_Q_Kfz = die Verkehrs-

stärke des gesamten Querschnitts aller Fahrzeuge. Q_Q_PKW ist dann die Verkehrsstärke nur der Klasse PKW.

Die mittlere Geschwindigkeit Q_V_xxx ist das gewichtete Mittel über alle s Fahrstreifen der im Minutenintervall gemessenen Geschwindigkeiten eines Querschnitts Q . Die Gewichtung erfolgt anhand der im Erfassungsintervall und von der betreffenden Messstelle gezählten Fahrzeuge.

$$Q_Q_Kfz_{Int} = \sum_{t=Int+0}^{t=Int+AggIv} \left(\sum_{FS=1}^{FS=s} Q_KFZ_{FS,t} \right)$$

$$Q_Q_Kfz_{Int} = Q_Q_Kfz_{Int} \cdot Round \left(3600 / AggIv \right)$$

$$Q_V_Kfz_{Int} = \frac{\sum_{t=Int+0}^{t=Int+AggIv} \left(\sum_{FS=1}^{FS=s} V_KFZ_{FS,t} \right)}{Q_Q_Kfz_{Int}}$$

Formel 3: Berechnung der Querschnittsdaten

Aus den Querschnittsdaten mittl. Geschwindigkeit und Verkehrsstärke kann die für den Querschnitt geltende Verkehrsdichte über den Fundamentalsatz wie folgt ermittelt werden.

$$Q_k_Kfz_{Int} = \frac{Q_Q_Kfz_{Int}}{Q_V_Kfz_{Int}}$$

$$k_Kfz_{FS,Int} = \frac{Q_Kfz_{FS,Int}}{V_Kfz_{FS,Int}}$$

Formel 4: Berechnung der Verkehrsdichte

Dabei sind:

Q_Q_Kfz = Verkehrsstärke in Fz/h für gesamten Querschnitt

Q_KfzFS = Verkehrsstärke in Fz/h pro Fahrstreifen FS

Die Fahrstreifen sind von 1...s durchnummeriert. Der Fahrstreifen (im Datentyp als FSspur bezeichnet) 1 ist der Normalstreifen und 2...s sind die entsprechenden Überholstreifen.

4.1.2.5 Analyse von Zusammenhängen mittels Korrelation und multipler Regressionsverfahren.

Der entscheidende Parameter des Fahrverhaltens, welcher sich direkt aus den Verkehrsdaten ableiten lässt und am deutlichsten auf den Einfluss des Fahrbahn- und Wetterzustandes reagiert, sind die gefahrenen Geschwindigkeiten. Daher wurde zunächst versucht aus den 15 min mittleren Geschwindigkeiten, vorzugsweise der PKW

eine Korrelation mit den vermuteten Einflussgrößen aufzuzeigen. Zusätzlich wurden diese Zusammenhänge mit den WOLKE Straßenwetterklassen Cluster gebildet um Einflüsse durch andere Verkehrsstörungen auszuschließen. Die jeweiligen Werte der mittleren Geschwindigkeiten im 15 min Intervall kann dabei in Abhängigkeit der Einflussgröße als Punktwolke im Diagramm dargestellt werden.

Zur quantitativen Bestimmung der Abhängigkeit wird die einfache lineare Regression verwendet. Um auch nichtlineare Zusammenhänge fassen zu können wird die Einflussgröße entsprechend durch eine Nichtlineare Funktion $NLF(x)$ linearisiert. Allgemein lautet die Bestimmungsgleichung:

$$ZG = c \cdot NLF(EG) + b$$

Formel 5: allgemeine Bestimmungsgleichung für den Zusammenhang zwischen einer Einflussgröße (EG) und einer Zielgröße (ZG)

Die Zielgröße, (im Wesentlichen die mittlere PKW-Geschwindigkeit im 15 min Intervall wird dabei in Abhängigkeit von der, durch die Umformung NLF linearisierten, Einflussgröße EG (ebenfalls im gleichen 15 min Intervall aggregiert) ausgedrückt. Im Grenzfall ist die Umformung 1x linear wenn der Einfluss proportional ist. Eine additive Konstante kann im einfachsten Fall auch zu 0 werden.

Das Bestimmtheitsmaß der Regression wird herangezogen um die Signifikanz des Einflusses abzuschätzen. Die Varianz der Zielgröße gibt auch einen Hinweis auf die Signifikanz des Einflusses.

Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeiten

Eine weitere Auswertemethode besteht darin, die gefahrenen (freien) Geschwindigkeiten in Abhängigkeit des Straßenwetter-Zustandes zu ermitteln. Dabei wurde aus den 15min Werten die Häufigkeitsverteilung der PKW Geschwindigkeiten - nach bestimmten Kriterien gefiltert - bestimmt und daraus die Verteilungsfunktion. Als Maß für die durchschnittliche freie Geschwindigkeit wurde das 85% Perzentil verwendet, oder je nach Fragestellung auch das 50% Perzentil. Das folgende Diagramm veranschaulicht die Methode am Beispiel der Verteilung bei absolut guter Witterung (Abb...).

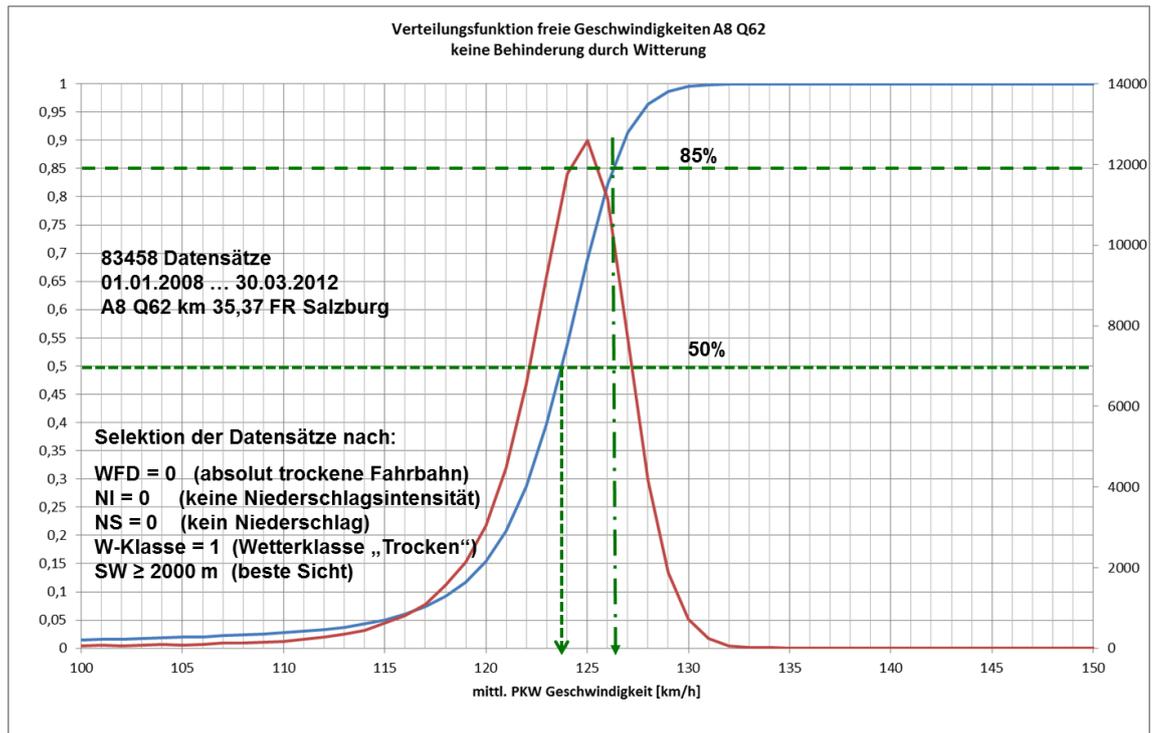


Abbildung 22: Diagramm Häufigkeitsverteilung und Verteilungsfunktion der PKW Geschwindigkeit bei absolut guter Witterung an Q62 A8. Auswertung im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012, 147619 Messintervalle.

Die Verteilung der Nettotozeitlücken ausgewertet. Die Verkehrsdichte pro Fahrspur kann aus den einzelnen Nettotozeitlücken T und der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeiten v_{Fz} wie folgt ermittelt werden:

$$k_{\tau} [Fz / km] = \frac{1}{\frac{v_{Fz} [km / h] \cdot \tau [0,1 sec]}{10 \cdot 3600} + \frac{1}{k_{max}}}$$

Formel 6: Verkehrsdichte pro Fahrspur aus Nettotozeitlücken T .

Außerdem wurde die Verteilung der Nettotozeitlücken in Abhängigkeit vom Straßenwetterzustand ermittelt. Die maximale Verkehrsdichte k_{max} hängt von den durchschnittlichen Fahrzeuglängen ab.

Makroskopische Verkehrsflussmodelle

Für die Darstellung des Einflusses des Straßenwetters auf die makroskopischen Verkehrsfluss eignet sich das k-v Fundamentaldiagramm am besten, weil hier keine Mehrdeutigkeiten auftreten. Um den Einfluss des Wetter- und Fahrbahnzustandes auf den Verkehrsfluss beschreiben zu können muss zunächst geeignete Verkehrsflussmodelle als Basis gefunden werden.

Es wurden dafür zwei geeignete Modelle als Basis für die Analysen herangezogen. Einmal das Verkehrsmodell nach Van Aerde [35] und zum anderen das Verkehrsmodell

dell nach Ning Wu [26]. Ersteres zeichnet sich dadurch aus, dass es eine Gleichung gibt, die den vollständigen Verkehrsfluss im Fundamentaldiagramm beschreibt, aber die Parameter nicht unmittelbar aus dem Fahrverhalten und der Fahrdynamik abzuleiten sind. Das zweite Modell zeichnet sich dadurch aus, dass es zwar keine stetige Funktion bereitstellt, aber das Verkehrsmodell durch einige wenige Kenngrößen, die sich auch aus dem Fahrverhalten und der Fahrdynamik ableiten lassen, beschreibbar ist.

Im Folgenden sind die Verkehrsmodelle und die Methode zur Auswertung des Wittereinflusses kurz skizziert.

Verkehrsmodell nach Van Aerde

Das Verkehrsflussmodell nach van Aerde [35] hat folgende Form:

$$k(v) = \frac{1}{\Delta x} = \frac{1}{c_1 + \frac{c_2}{v_0 - v} + c_3 \cdot v}$$

Formel 7: Verkehrsmodell n. Van Aerde. Zusammenhang Verkehrsdichte $k(v)$ und Geschwindigkeit v

Bei der Analyse sind die Parameter c_1 bis c_3 in Abhängigkeit der Straßenwetterklasse aus den Verkehrsdaten zu schätzen. Die Parameterschätzung wird nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate bzw. multipler Regression durchgeführt.

Die Bestimmungsgleichungen für die Parameterschätzungen müssen aus der obigen Gleichung (Formel 7) erst abgeleitet werden. Es ergeben sich folgende Zusammenhänge::

$$\frac{1}{k} = p_0 + p_1 \cdot \frac{v}{k} + p_2 \cdot v + p_3 \cdot v^2$$

$$p_0 = \frac{c_2}{v_0} + c_1$$

$$p_1 = 1/v_0$$

$$p_2 = c_3 - \frac{c_1}{v_0}$$

$$p_3 = -\frac{c_3}{v_0}$$

Formel 8: Ableitung der Bestimmungsgleichungen für die Parameterschätzung.

Aus der Bestimmungsgleichung (Formel 8) können die Parameter p_0 bis p_3 aus den Verkehrsdaten – gefiltert durch die entsprechenden Klassen bzw. Unterscheidungskriterien – mittels multipler Regression bestimmt werden. Aus den Schätzparametern

können dann die ursprünglichen Parameter v_0 , c_1 , c_2 , c_3 der Van Aerde Modellgleichung wieder errechnet werden, wie folgt:

$$v_0 = 1/p_1$$

$$c_1 = -\frac{p_2}{p_1} - p_3$$

Formel 9: Berechnung der ursprünglichen Van Aerde Parameter

$$c_2 = (p_0 - c_1) \cdot \frac{1}{p_1}$$

$$c_3 = -\frac{p_3}{p_1}$$

Die Parameter des Van Aerde Verkehrsmodells sind anhand der 15 min Verkehrsdaten von verschiedenen Querschnitten (Geschwindigkeit und Verkehrsdichte) für jede vorkommende Straßenwetterklasse über mehr als 4 Jahre (ca. 147619 Datensätze) bestimmt worden.

Verkehrsmodell nach Ning Wu

Das Verkehrsflussmodell nach Ning Wu [26] lässt sich durch einige wenige Parameter beschreiben, die sich noch durch Vereinfachungen weiter reduzieren lassen. Für die Zwecke des WOLKE-Projekts ist der wichtigste Parameter die freie Geschwindigkeit v_0 (mittlerer Geschwindigkeit bei Verkehrsdichte gegen 0). Die Abbildung 23 zeigt das Prinzip des Verkehrsmodells im k-v-Diagramm.

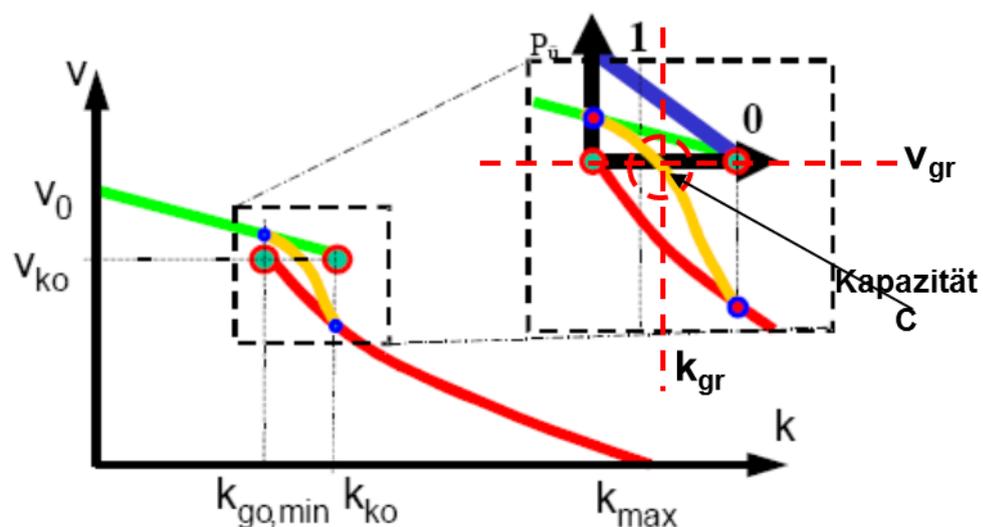


Abbildung 23: Darstellung Verkehrsflussmodell n. Ning Wu im k-v-Diagramm
(Quelle: [26])

Dabei kann näherungsweise für die Kapazität C und die sogenannte Grenzggeschwin-

digkeit v_{gr} und Grenz-Dichte k_{gr} für den entsprechenden Autobahntyp die Angaben der HBS herangezogen werden.

Das Verkehrsmodell beschreibt jeweils die mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte und ist in 3 Phasen aufgegliedert:

Die Phase 1 (=fließender Verkehr) wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$v = v_0 - (v_0 - v_{ko}) \cdot \left(\frac{k}{k_{ko}} \right)^{N-1}$$

Formel 10: Verkehrsflussgleichung n. Ning Wu für die Phase fließender Verkehr

Wobei N die Anzahl der Fahrspuren bedeutet. Für die Übergangsphase (Kolonnenfahrt zu Stop&Go) kann vereinfacht folgende Beziehung angesetzt werden.

$$C = v_{gr} \cdot k_{gr};$$

Formel 11: Beziehung für die Übergangsphase im Bereich der Kapazität

$$v_{gr} = v_{ko} \xrightarrow{\text{wenn}} v_0 \geq v_{ko}$$

$$v_{gr} = v_0 \xrightarrow{\text{wenn}} v_0 < v_{ko}$$

Und schließlich die Phase gestörten Verkehrsflusses (Stop&Go) wird durch eine konstante mittlere Nettozeitlücke τ und die maximale Verkehrsdichte k_{max} beschrieben:

$$v = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{1}{k} - \frac{1}{k_{max}} \right)$$

Formel 12: Verkehrsflussgleichung für die Phase Stop&Go

Die Kenngrößen wurden aus den Verkehrsdaten, sinngemäß wie bei Van Aerde, mittels multipler Regression bestimmt.

Dabei sind folgende Bestimmungsgleichungen zugrunde gelegt worden:

$$v = v_0 - \frac{v_0 - v_{gr}}{k_{gr}^{N-1}} \cdot k^{N-1}$$

$$v = p_0 + p_1 \cdot k^{N-1}$$

Formel 13: Bestimmungsgleichung für Ning Wu und Phase fließender Verkehr zur Parameterschätzung

$$v_0 = p_0$$

$$v_{gr} = p_0 - p_1 \cdot k_{gr}^{N-1}$$

Die Parameter p_0 und p_1 wurden aus den Verkehrsdaten, selektiert nach fließendem Verkehr über den gesamten Erfassungszeitraum bestimmt mittels multipler Regression. Aus den Parameter ergeben sich dann wieder die Kenngrößen mittlere freie Geschwindigkeit v_0 und die Grenzgeschwindigkeit v_{gr}

$$v = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{1}{k} - \frac{1}{\tau \cdot k_{\max}}$$

$$v = m_0 + m_1 \cdot \frac{1}{k}$$

$$\tau = \frac{1}{m_1}$$

$$k_{\max} = -\frac{m_1}{m_0}$$

Formel 14: Bestimmungsgleichung zur Parameterschätzung für Ning Wu Modell und Phase Stop&Go

Die Parameter m_0 und m_1 wurden aus den Verkehrsdaten, selektiert nach zählfließendem Verkehr (bzw. Stop&Go) über den gesamten Erfassungszeitraum bestimmt mittels multipler Regression. Aus den Parameter ergeben sich dann wieder die Kenngrößen mittlere Nettozeitlücke T und die maximale Verkehrsdichte k_{\max} .

Aus dem Schnittpunkt (unter Anwendung der vereinfachten Beziehung) zwischen fließender und zählfließender Phase ergibt sich die Kapazität C .

Die Ermittlung der Verkehrsdichte am Schnittpunkt ist für eine oder zwei Fahrspuren relativ trivial, für 3 Fahrspuren ($N=3$) ist die Gleichung wie folgt:

$$k = \frac{k_{gr}}{2 \cdot (v_0 - v_{gr})} \cdot \left(\frac{1}{\tau} \pm \sqrt{\left(v_0 - \frac{1}{\tau \cdot k_{\max}} \right)^2 + 4 \cdot \frac{(v_0 - v_{gr})}{\tau \cdot k_{gr}}} \right)$$

Formel 15: Bestimmung der Verkehrsdichte am Schnittpunkt (Kapazität)

4.1.3 Darstellung der Ergebnisse

Im Folgenden sind die wesentlichen Einflussgrößen und die gefundenen Auswirkung auf das lokale Verkehrsgeschehen dargestellt. Dabei zeigt sich eindeutig, dass die makroskopische Leitgröße für die Modellierung des Verkehrsflusses die mittlere Geschwindigkeit der PKW darstellt. Die mittlere PKW Geschwindigkeit im 15 min Intervall

eines Querschnitts, bei geringer Verkehrsdichte (freie Geschwindigkeit) zeigt die deutlichste Reaktion auf Veränderung der lokalen Wettersituation am selben Querschnitt. Der Schwerlastverkehr stellt eine im Prinzip – zumindest während der entsprechenden Wochentage – mehr oder weniger gleichmäßige Grundlast dar. Im Untersuchungsgebiet und in den analysierten Zeiträumen war ein durchschnittlicher Schwerlastverkehrsanteil von 10...15% beobachtet worden. Es hat sich auch gezeigt, dass die grundsätzlichen Gesetzmäßigkeiten bezüglich des Geschwindigkeitsverhaltens (der PKW) in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte auch bei schlechter Witterung erhalten bleiben. Die schlechten Wetterverhältnisse und der ungünstige witterungsbedingte Straßenzustand wirken dabei als obere Begrenzung der mittleren freien Geschwindigkeit. Streng genommen gilt diese Aussage mit Ausnahme von extremen Glatteissituationen, die nicht ausreichend untersucht werden konnten, weil diese Fälle im Untersuchungsgebiet so gut wie nie beobachtet werden konnten, dank funktionierendem Winterdienst. Bei der Verkehrsdichte müssen selbstverständlich alle Fahrzeuge berücksichtigt werden.

4.1.3.1 Einfluss der Sichtweite

Es konnten im gesamten Untersuchungszeitraum von immerhin fast 4 Jahren und auf allen ausgewählten Querschnitten kaum Fälle beobachtet werden, an denen Sichtweiten unter 150m geherrscht haben.

Dementsprechend gering sind die Auswirkungen. Das folgende Diagramm (Abbildung 24) zeigt die gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten und gemessenen Sichtweiten (im 15 min Intervall) von Ereignissen mit Sichtweiten unter 1000 m.

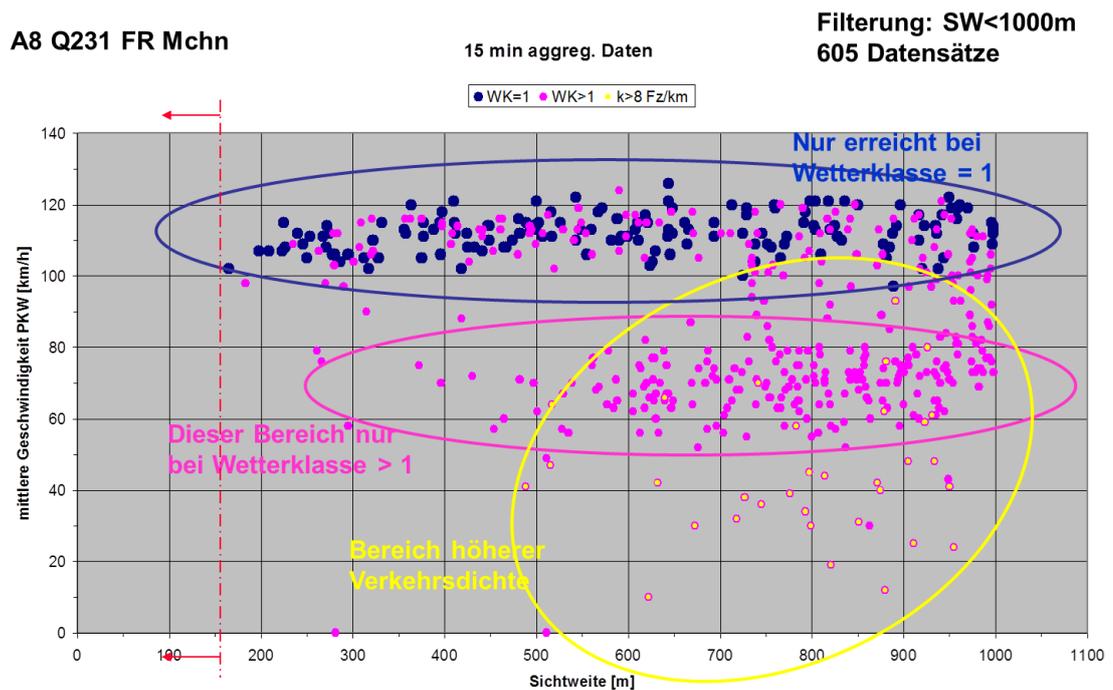


Abbildung 24: Diagramm mittl. PKW Geschwindigkeiten in Abhängigkeit zur Sichtweite mit drei Clustern (Wetterklasse = 1 und >1, sowie bei hoher Verkehrsdichte >8 Fz/km)

Es ist zu erkennen, dass so gut wie kein Einfluss der Sichtweite bei guter Witterung oberhalb 150m zu beobachten ist. Bei Wetterklassen mit schlechter Witterung sieht man zwar in vielen Ereignissen dieses Clusters deutlich geringere gefahrene Geschwindigkeiten, diese sind aber auch nicht signifikant von der gemessenen Sichtweite abhängig. Der Grund für die geringeren Geschwindigkeiten liegt hier nicht im Nebelerignis sondern am witterungsbedingten Straßenzustand und am Niederschlag. Löst man das Cluster weiter auf, findet man auch die niedrigeren Geschwindigkeiten bei den entsprechenden Straßenwetterklassen. Diese Abhängigkeiten sind weiter unten noch ausführlicher dargestellt. Lediglich bei Ereignissen, die gleichzeitig bei hohen Verkehrsdichten (> 8 Fz/km pro Spur) einhergehen, könnte man eine Abhängigkeit von der Sichtweite diskutieren. Die Signifikanz ist aber zu gering. Bezüglich des Sichtweiten Einflusses wurde auch ein Ereignis am Querschnitt Q61 gefunden. Siehe dazu auch Abbildung 16. Wie später bei der Modellierung gezeigt wird, kann die Sichtweite durch Nebel als eine Verminderung der Haltesichtweite betrachtet werden. Die dazu angepassten Geschwindigkeiten sind dann noch zudem vom jeweiligen Straßenzustand abhängig. Das erklärt auch, warum bei schlechter Witterung der Einfluss der verminderten Sichtweite bereits bei höheren Sichtweiten beginnt als bei trockenem Fahrbahnzustand. Der Einfluss der hohen Verkehrsdichte ist dem noch überlagert, gemäß dem für den Straßentyp gültigen Fundamentaldiagramm.

4.1.3.2 Einfluss des Niederschlags

Es wurde an verschiedenen Querschnitten untersucht, wie sich die mittleren PKW Geschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Niederschlag verhalten. Dabei ist sowohl bei Regen, als auch bei Schnee eine deutliche Korrelation zu erkennen. Besonders bei Schnee ist erwartungsgemäß der Einfluss am stärksten. Bei Schneefall kommt als Ursache für die verminderten Geschwindigkeiten auch der wesentlich stärkere Einfluss des Schneefalls auf die Sichtweite dazu. Als weiterer Effekt dürfte auch noch bei anhaltendem Schneefall die gegenüber Regen stärkere Verringerung des Kraftschlusses zwischen Reifen und Fahrbahn bei Schneebedeckung dazu kommen.

Das Diagramm in Abbildung 25 zeigt ein Beispiel an einem Querschnitt. Dort sind die mittleren Geschwindigkeiten der PKW im 15 min Intervall den mittleren Niederschlagsintensitäten im gleichen Intervall aufgetragen.

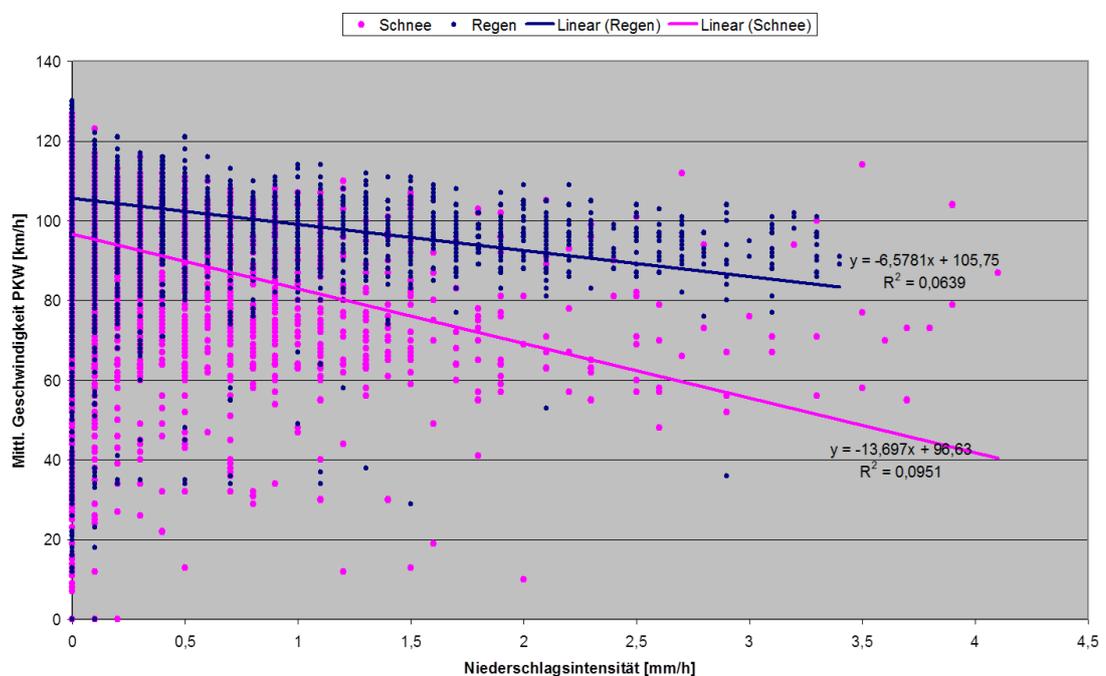


Abbildung 25 Abhängigkeit der mittl. PKW Geschwindigkeiten von der Niederschlagsintensität bei Regen und Schneefall an Q231 A8. Intervalle von 15 min im Zeitraum 01.01.2008 – 14.09.2011.

Es ist jeweils ein deutlicher linearer Trend zu beobachten. Der Einfluss von Schnee ist dabei erwartungsgemäß am deutlichsten, obwohl die Punkte eine erhebliche Streuung aufweisen. Für die hohen Streuungen gibt es mehrere Ursachen. Zum einen ist die automatische Erkennung der Niederschlagsart nicht sehr zuverlässig. Es gibt Niederschlagsereignisse, die sind nicht eindeutig den zwei Klassen Regen und Schnee zuzuordnen. Gerade bei Schneefall ist die Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit auch nicht unerheblich vom Fahrbahnzustand abhängig, der in dieser Betrachtung

nicht einget. Genauso wie der Einfluss der Verkehrsstärke in dieser Betrachtung auch noch nicht berücksichtigt ist.

4.1.3.3 Einfluss des Wasserfilms auf der Fahrbahn

Straßenwetter- u. Umfelddaten-Messstellen können in der Regel die Bedeckung der Fahrbahnoberfläche in Form der Wasserfilmdicke in mm (= 1 Liter pro m²) messen. Dabei wird der Parameter auch im Prinzip bei nicht flüssiger Bedeckung, also Schnee oder Eis verwendet. In diesem Fall entspricht 1 mm dem Wasseranteil in l/m² (wasseräquivalent). Es wurde an verschiedenen Querschnitten untersucht, welchen Einfluss ein erhöhter Wasserfilm auf die gefahrenen Geschwindigkeiten hat.

Bei nicht-trockener Straße wurden alle Mittelwerte der PKW Geschwindigkeiten im 15 min Intervall mit den Mittelwerten der gemessenen Wasserfilmdicken im gleichen Intervall verglichen. Auch hier zeigt sich ein klarer Trend. Am deutlichsten wieder bei Schneebedeckung. Bei Schneebedeckung ist die Signifikanz sogar noch höher, wie bei der Niederschlagsintensität.

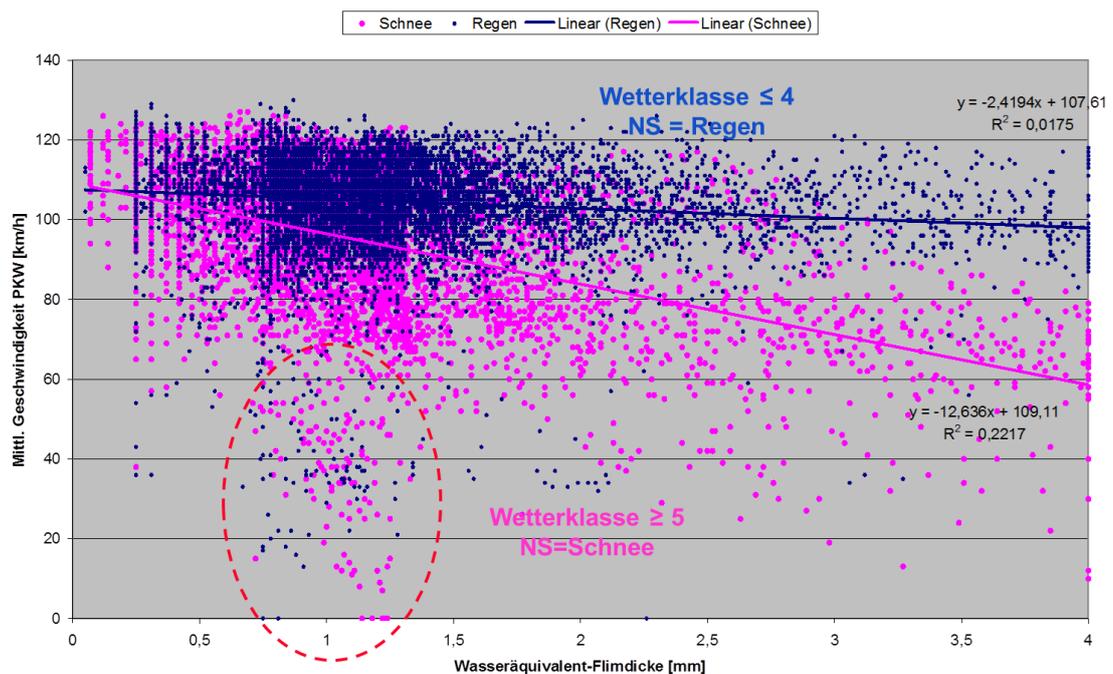


Abbildung 26 Abhängigkeit der mittl. PKW Geschwindigkeiten von den mittl. Wasserfilmdicken im 15 min Intervall, getrennt nach WK ≤ 4 und WK ≥ 5. An Q231 A8 im Zeitraum 01.01.2008 bis 14.09.2011. Gekennzeichneter Bereich FBT ≤ -2°C.

In Abbildung 26 sind die Ereignisse bei nicht-trockener Straße und die linearen Trends, die durch Regression ermittelt wurden dargestellt. Der gelb gekennzeichnet Bereich sind überwiegend Ereignisse bei denen die Fahrbahntemperatur unter -2°C gelegen hat, somit Eis- oder Schnee-Glätte auf der Oberfläche geherrscht hat.

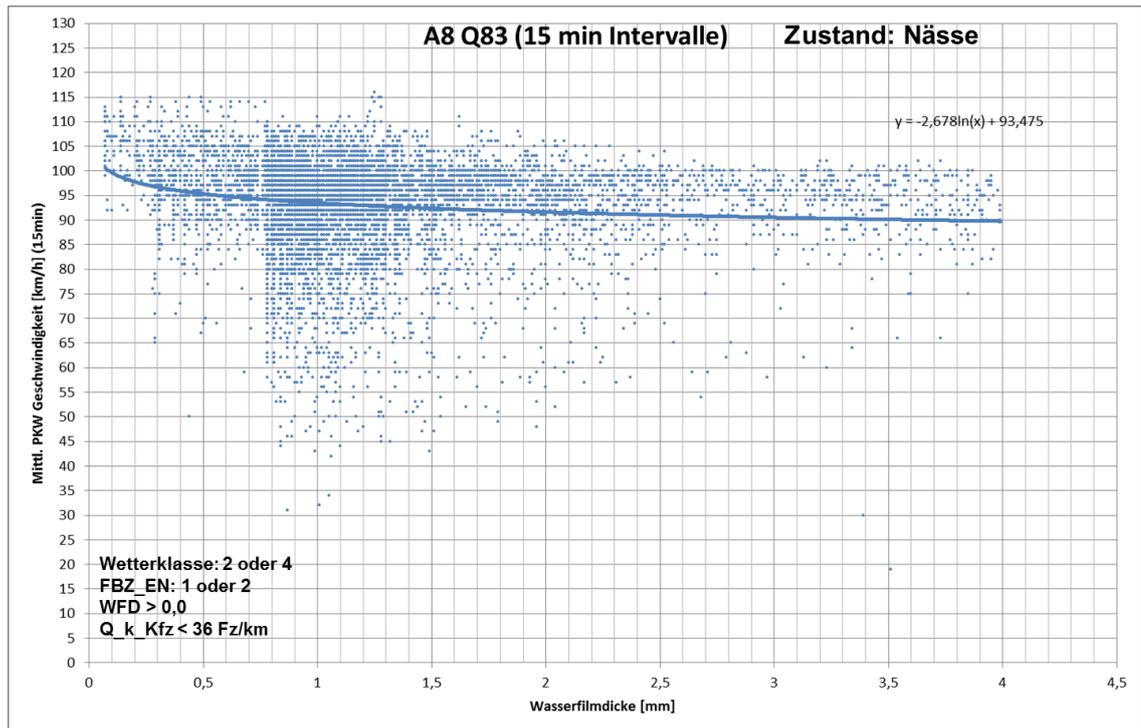


Abbildung 27 Mittlere freie PKW Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke von 15 min Intervallen. Am Querschnitt Q83 A8 bei flüssiger Bedeckung. Beste Trendlinie logarithmisch.

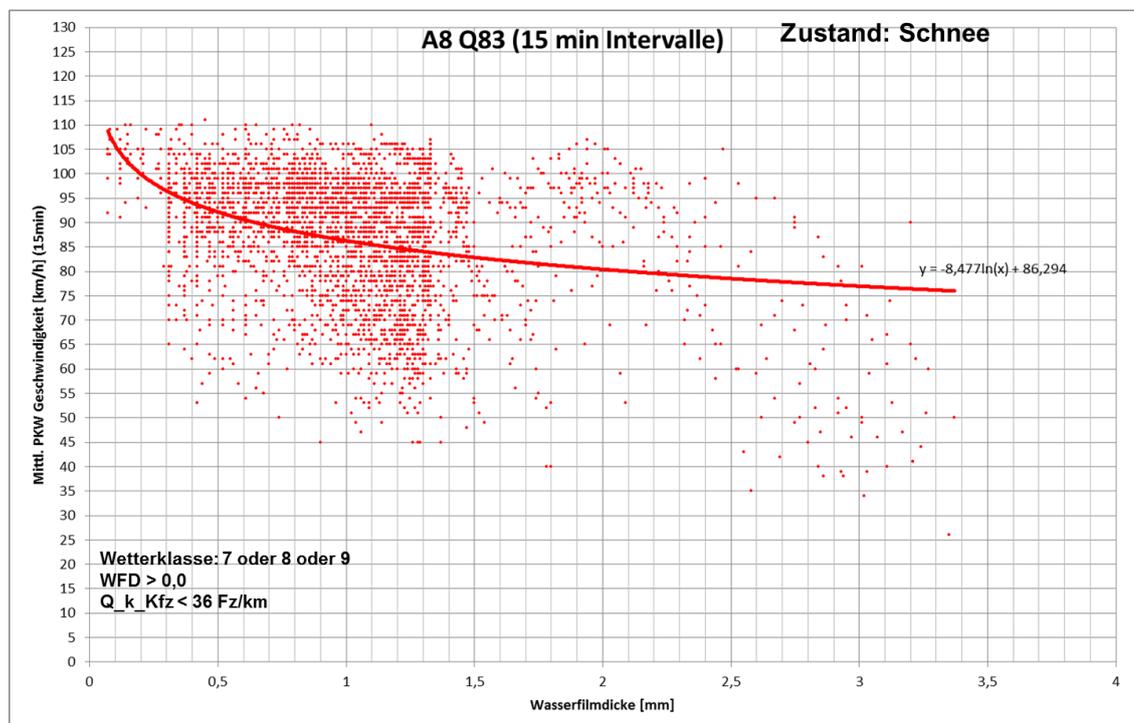


Abbildung 28 wie Abbildung 27 jedoch bei Schneebedeckung.

Wie man in den Diagrammen Abbildung 27 und Abbildung 28 sieht, ist tendenziell eine deutliche Abhängigkeit gegeben. Die Streuungen sind jedoch sehr hoch.

Theoretisch hat die Bedeckung der Fahrbahn über den Kraftschlussbeiwert und die Halte­distanz auf die angepasste Geschwindigkeit eine logarithmische Charakteristik. Und tatsächlich findet man auch, dass eine logarithmische Trendlinie eine leicht bessere Signifikanz ergibt, als eine lineare.

4.1.3.4 Einfluss der Tageshelligkeit

Es wurde auch versucht den Einfluss der Tageshelligkeit auf die gefahrenen Geschwindigkeiten abzuklären. Dabei finden sich keine signifikanten Unterschiede.

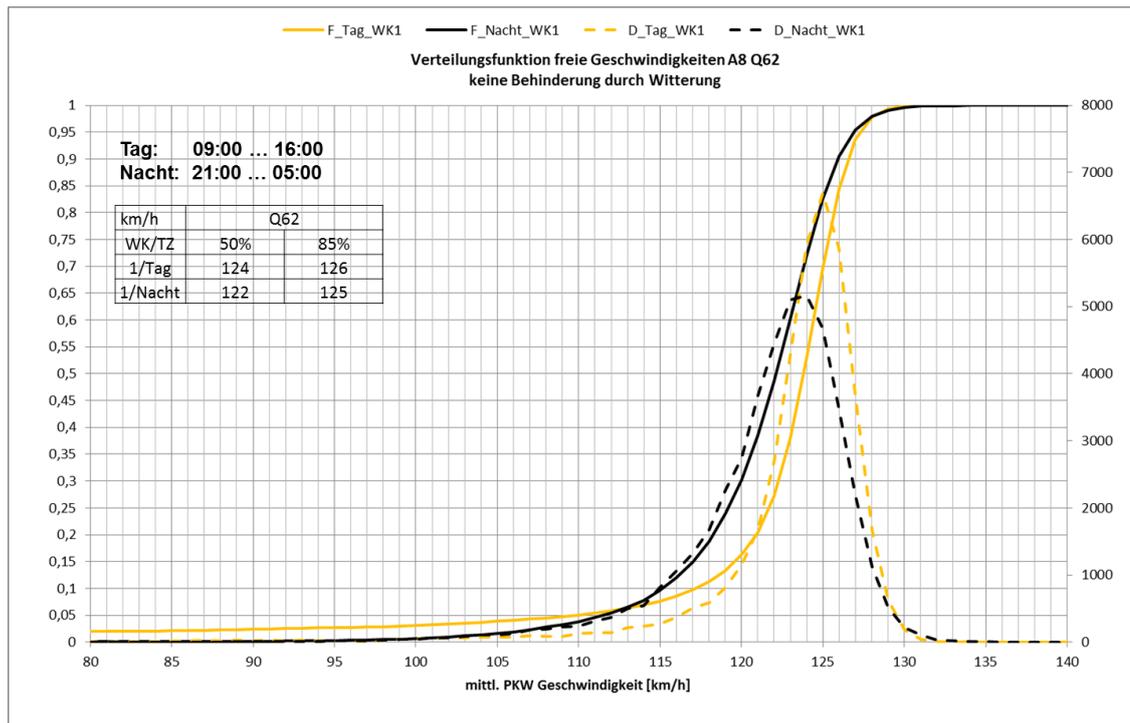


Abbildung 29 Verteilung der mittleren freien Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Tageszeit und bei guter Witterung (WK1) an Q62 A8. Im Zeitraum 01.01.2008 bis 14.09.2011

Als Beispiel dient die Verteilung der PKW Geschwindigkeiten und die Perzentile bei 50% und 85% während der Tageszeit und der Nachtzeit bei Querschnitt Q62 und Q231 auf der A8 (Abbildung 29 und Abbildung 30). Wie man sieht sind die Unterschiede marginal.

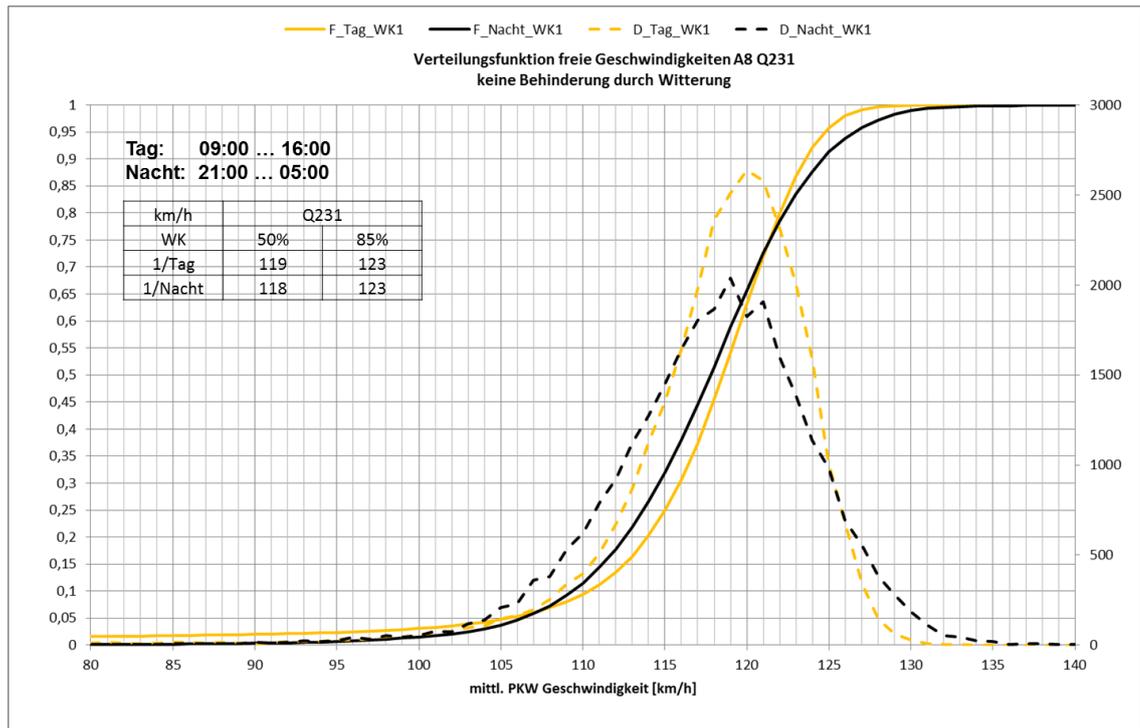


Abbildung 30 wie Abbildung 29 bei Q231 A8 im gleichen Zeitraum.

4.1.3.5 Auswertung der Nettozeitlücken

Um die Fahrverhalten im Hinblick auf Abstände und Spurwechsel etwas genauer zu beleuchten wurden die Nettozeitlücken der einzelnen Spuren in Abhängigkeit der Wetterklassen-Gruppen Trocken, Nässe und Schnee (Gruppierung siehe auch 4.1.2.2) ausgewertet.

Das Ergebnis am Beispiel des Querschnittes Q231 (siehe 4.1.2.3) ist in Abbildung 31 dargestellt. Grundsätzlich scheint sich am Abstandsverhalten zwischen gutem Wetter und nasser Witterung in der Hauptfahrspur (Spur 1) keinerlei Unterschiede zu zeigen. Allerdings bei Schneefall und Schneebedeckung scheinen sich die Abstände etwas zu erhöhen. Auf der Überholspur (Spur 2) zeigen sich bereits Unterschiede in allen drei Wettergruppen. Daraus könnte man schließen dass die Abstände auf der Überholspur durch die Wettersituation leicht beeinflusst werden. Eine genauere Untersuchung konnte, speziell über das Spurwechselverhalten konnte im Rahmen dieses Projekts aber nicht mehr durchgeführt werden.

Dass das Abstandsverhalten bei schlechter Witterung sich nicht so wesentlich verändert, wie man das eigentlich vermuten würde, wird auch durch die Erkenntnisse aus der Analyse im k-v-Diagramm gestützt. Allerdings bei zunehmender Straßenglätte, wie die Ergebnisse bei Schneeglätte zeigen, werden Einflüsse des Abstandsverhaltens sichtbar. Extreme Glättefälle sind aber in dem Untersuchungsgebiet und dem Zeitraum

der Datenerfassung wegen Winterdiensttätigkeit nicht vorgekommen, weswegen hierüber leider keine gesicherten Aussagen möglich sind.

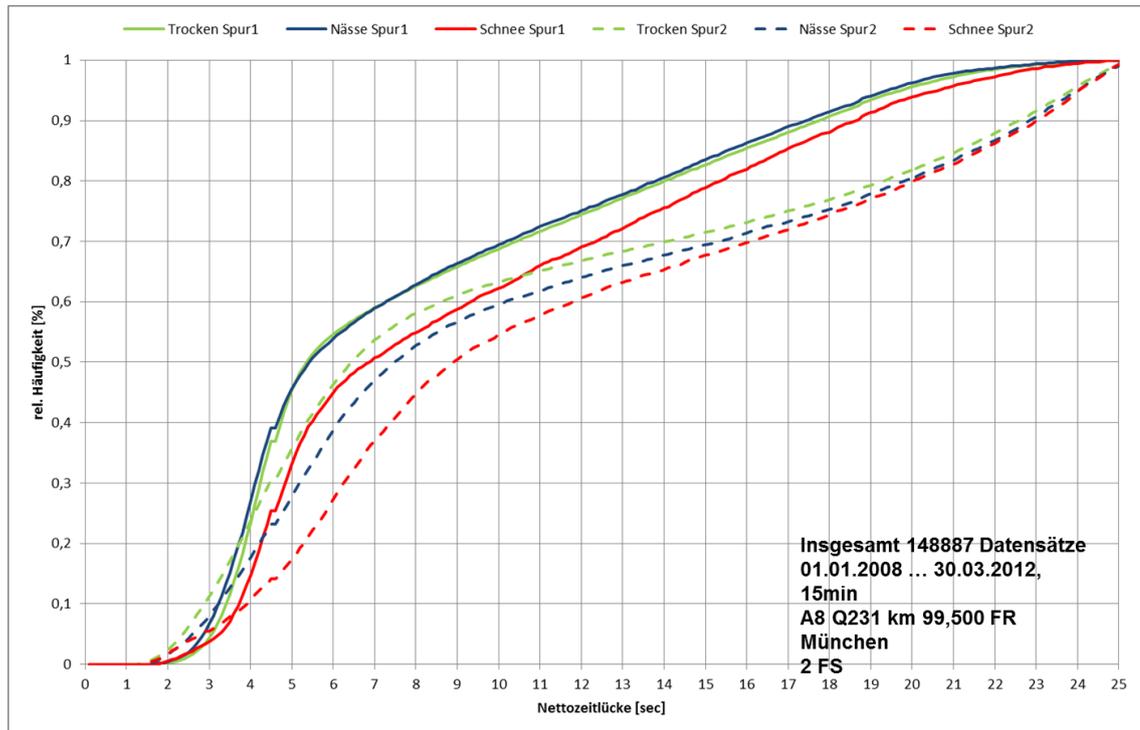


Abbildung 31 Verteilung der mittleren Nettozeitlücken (15min Intervall) nach Wettergruppen und pro Fahrstreifen am Beispiel Q231 A8 mit 2 FS, im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012.

4.1.3.6 Freie Geschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Wetterzustand

Die Verteilung der mittleren PKW Geschwindigkeiten (im 15 min Intervall) in Abhängigkeit von der Wetterklassen-Gruppe am Beispiel des Querschnitts Q231 zeigt die Abbildung 32 und an Q83 Abbildung 33. Erläuterung zu der Methodik siehe auch 4.1.2.5.

Die Ergebnisse für das 85%- und 50% Perzentil nach Wetterklassen-Gruppe zeigt die Tabelle 23.

| km/h | Q62 | | | Q83 | | | Q231 | | |
|------------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|-----|------|
| | 50% | 85% | 85% | 50% | 85% | 85% | 50% | 85% | 85% |
| Trocken | 124 | 126 | 0% | 100 | 105 | 0% | 119 | 123 | 0% |
| Nässe | 111 | 118 | -6% | 95 | 100 | -5% | 105 | 113 | -8% |
| Schnee/Eis | 98 | 112 | -11% | 81 | 93 | -11% | 77 | 98 | -20% |

Tabelle 23 Geschwindigkeiten des 50%- und 85%-Perzentils der Geschwindigkeitsverteilung den drei grundlegenden Wetterzuständen an drei verschiedenen Querschnitten auf der A8

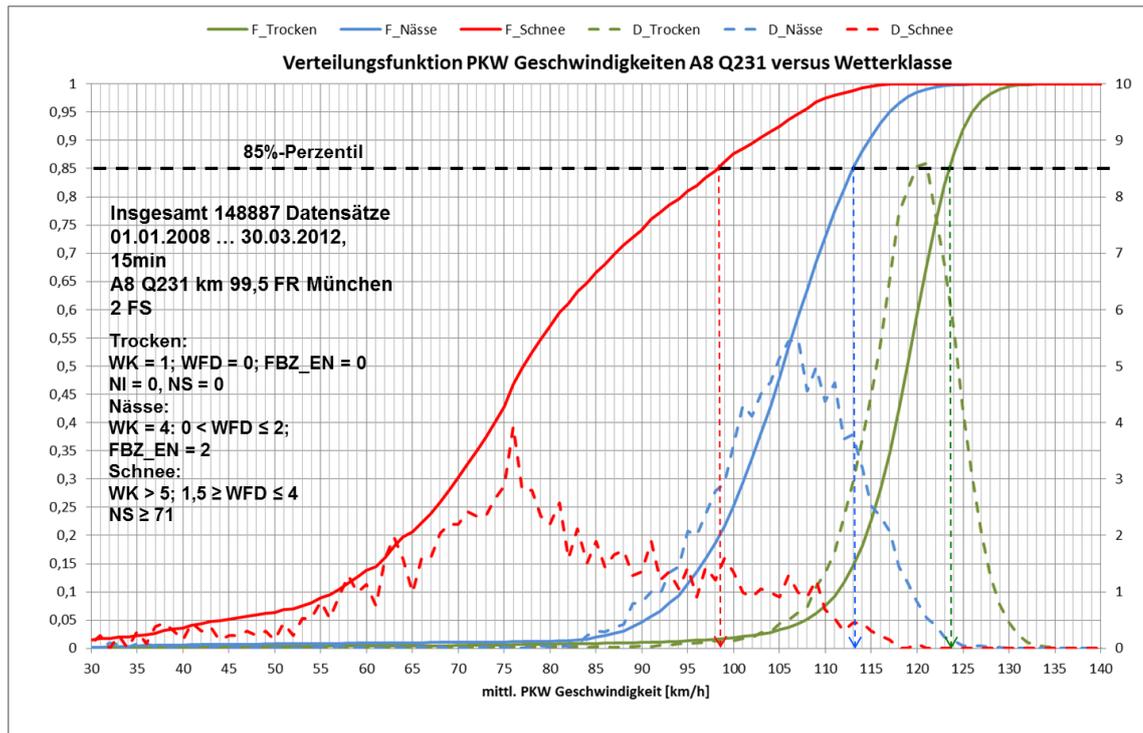


Abbildung 32 Verteilung und Verteilungsfunktion der mittleren PKW Geschwindigkeiten im 15 min Intervall, getrennt nach drei Wetterklassen-Gruppen an Q231 A8 im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012. 85% Perzentil als Kennwerte für die freien Geschwindigkeiten.

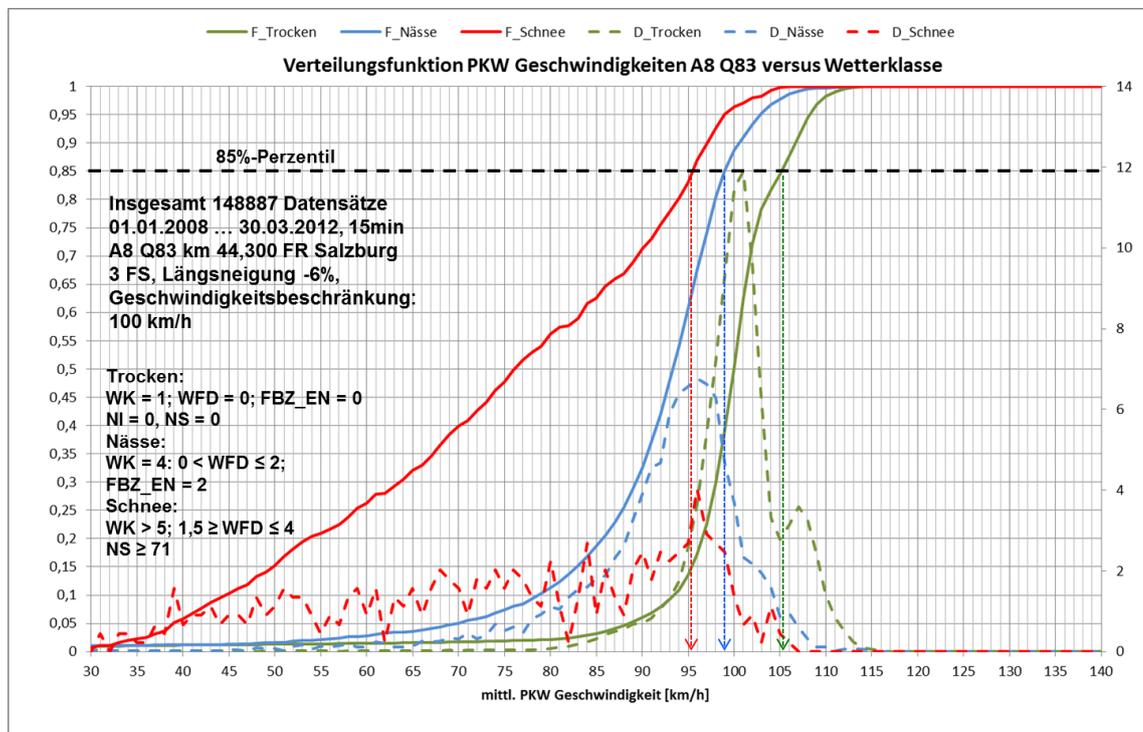


Abbildung 33 Wie Abbildung 32 an Q83 A8.

Wie in Tabelle 23 und in den Verteilungen ersichtlich, sind die Auswirkungen der Wetersituationen an verschiedenen Querschnitten unterschiedlich. Grundsätzlich dürften

die Anzahl der Fahrstreifen, Kurvenradius, Längs- und Querneigung, sowie Geschwindigkeitsbeschränkungen eine Rolle spielen.

| km/h | Q62 | | | Q83 | | | Q231 | | |
|------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|-----|------|
| WK | 50% | 85% | 85% | 50% | 85% | 85% | 50% | 85% | 85% |
| 1 | 124 | 126 | 0% | 100 | 105 | 0% | 118 | 123 | 0% |
| 2 | 116 | 123 | -2% | 95 | 100 | -5% | 109 | 115 | -7% |
| 3 | 104 | 113 | -10% | 81 | 93 | -11% | 91 | 105 | -15% |
| 4 | 110 | 119 | -6% | 93 | 99 | -6% | 105 | 113 | -8% |
| 5 | -- | -- | | -- | -- | | -- | -- | |
| 6 | -- | -- | | -- | -- | | -- | -- | |
| 7 | 109 | 120 | -5% | 91 | 98 | -7% | 101 | 113 | -8% |
| 8 | 102 | 119 | -6% | 85 | 97 | -8% | 91 | 110 | -11% |
| 9 | 78 | 94 | -25% | 59 | 59 | -44% | 76 | 103 | -16% |
| 10 | 51 | 70 | -44% | -- | -- | | 68 | 72 | -41% |

Tabelle 24 Mittlere PKW Geschwindigkeiten (50%- und 85%-Perzentil) im 15min-Intervall in Abhängigkeit von den Wetterklassen an den A8 Querschnitten Q62, Q83 und Q231. Daten aus dem Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012.

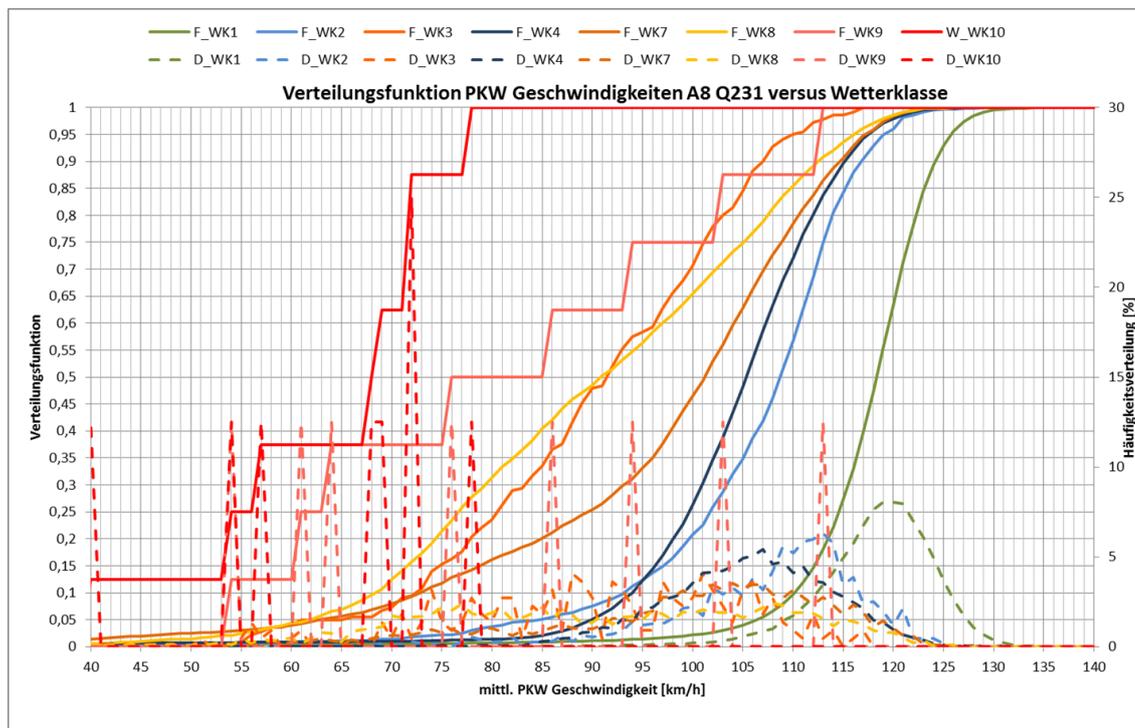


Abbildung 34 Verteilung und Verteilungsfunktion der mittleren PKW Geschwindigkeiten im 15 min Intervall, getrennt nach den Wetterklassen an Q231 A8 im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012.

Die Ergebnisse der Auflösung der Analyse der gefahrenen Geschwindigkeiten in alle 10 Wetterklassen ist in Tabelle 24 wiedergegeben. Die Wetterklassen 5 und 6 sind im Untersuchungszeitraum in allen ausgewählten Querschnitten nicht vorgekommen. Die Wetterklasse 10 ist am Q83 nicht aufgetreten. Die graphische Aufbereitung am Beispiel eines Querschnitts ist in Abbildung 34 zu sehen.

4.1.3.7 Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit von der Wettersituation

Wie in 4.1.2.5 erläutert, wurden die Parameter der Fundamentaldiagramm-Modelle nach Ning Wu [26] und Van Aerde [35] Modells geschätzt, auf Basis der Verkehrsdaten im 15min Intervall getrennt nach den Wetterklassen aus den am jeweiligen Querschnitt gemessenen Straßenwetterdaten.

Ein Beispiel für die Schätzung der 2 wesentlichen Phasen des Modells nach Ning Wu ist in

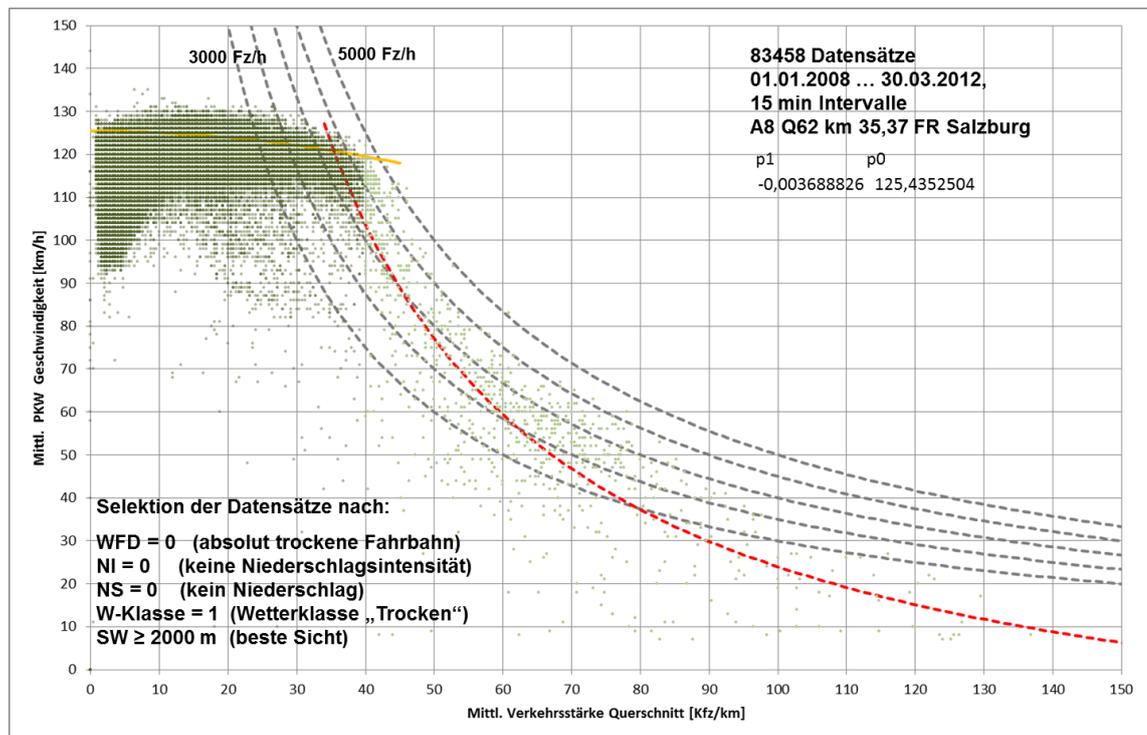


Abbildung 35 Schätzung der Modellparameter nach Ning Wu im v-k-Diagramm. Am Querschnitt Q62 A8 bei Wetterklasse 1. Eingblendete Linien gleicher Verkehrsstärke zum Abgleich.

Auch wenn die Fundamentaldiagramm Modelle unterschiedliche Ansätze verfolgen und die Form des Diagramms, speziell im Kapazitätsbereich der Straßen unterschiedlich ist, sind die Ergebnisse was die Kenngrößen des Fundamentalzusammenhangs angeht ziemlich gleich.

| WK | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| v0: | 123 | 115 | 105 | 113 | 113 | 110 | 103 | 72 |
| vc: | 100 | 100 | 91 | 95 | 95 | 91 | 91 | 68 |
| kc: | 30 | 25 | 20 | 28 | 28 | 22 | 22 | 22 |
| qc: | 3000 | 2500 | 1820 | 2660 | 2660 | 2002 | 2002 | 1496 |

Tabelle 25 Parameter des Van Aerde Modells aus 15 min Verkehrsdaten am Q231 A8, getrennt nach lokalen Wetterklassen im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012.

| WK | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| v0: | 126 | 123 | 113 | 119 | 120 | 119 | 94 | 69 |
| vc: | 111 | 110 | 90 | 100 | 100 | 95 | 80 | 49 |
| kc: | 42 | 37,2 | 40 | 37 | 36 | 33 | 32 | 38 |
| qc: | 4662 | 4092 | 3600 | 3700 | 3600 | 3135 | 2560 | 1862 |

Tabelle 26 Parameter des Van Aerde Modells aus 15 min Verkehrsdaten am Q62 A8, getrennt nach lokalen Wetterklassen im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012.

| WK | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|----|
| v0: | 105 | 100 | 93 | 99 | 98 | 97 | 60 | |
| vc: | 96 | 90 | 81 | 93 | 91 | 85 | 59 | |
| kc: | 48 | 44 | 44 | 44 | 44 | 42 | 44 | |
| qc: | 4608 | 3960 | 3564 | 4092 | 4004 | 3570 | 2596 | 0 |

Tabelle 27 Parameter des Van Aerde Modells aus 15 min Verkehrsdaten am Q83 A8, getrennt nach lokalen Wetterklassen im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012

Die Ergebnisse der Parameterschätzung und die daraus abgeleiteten Kenngrößen des Fundamentaldiagramms v_0 (=freie Geschwindigkeit bei geringer Verkehrsdichte $k \rightarrow 0$), v_c (= Geschwindigkeit an der Kapazität), k_c (= Verkehrsdichte an der Kapazität) und q_c (= Verkehrsstärke an der Kapazität) für die ausgewählten Querschnitte sind in Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 dargestellt.

In den Abbildungen auf Seite 83 sind die jeweiligen Fundamentaldiagramme dargestellt, welche sich aus der Parameterschätzung für die jeweiligen Wetterklassen ergeben. Auch hier sieht man erwartungsgemäß Unterschiede, je nach Autobahn Querschnitt.

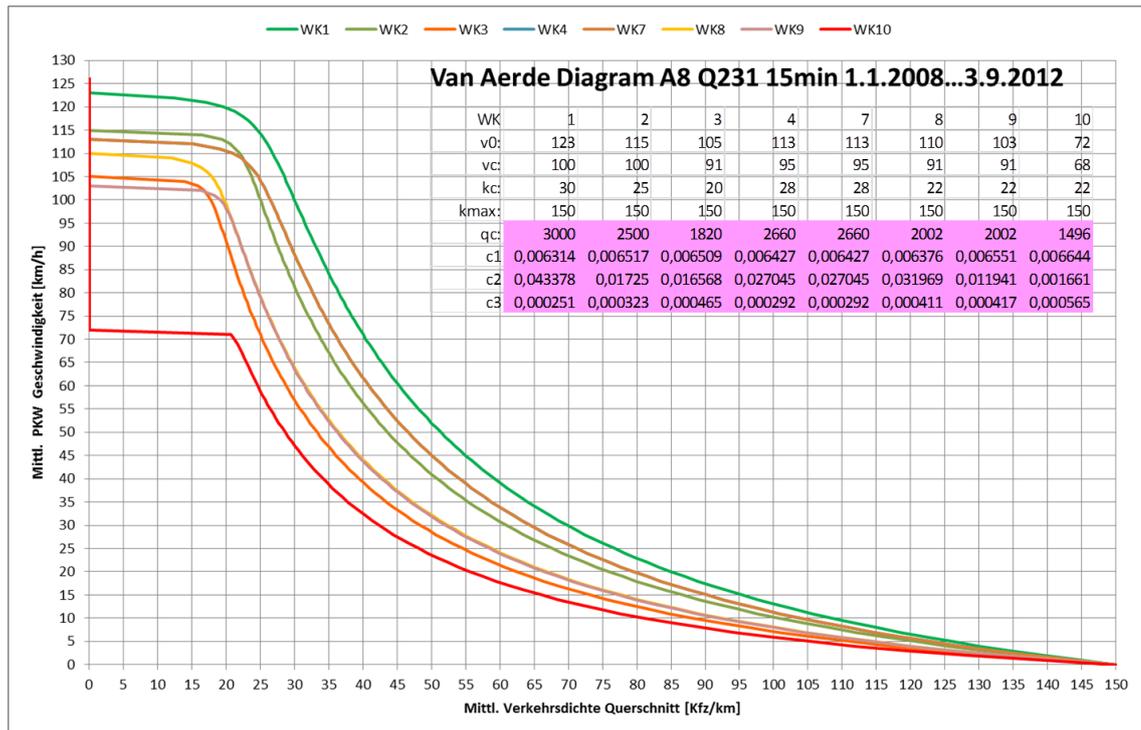


Abbildung 36 Fundamentaldiagramm nach dem Van Aerde Modell. Parameter geschätzt aus 15min Verkehrs- und Straßenwetter-Daten am Q231 A8. Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012. Die Parameter des Van Aerde Modells c₁ bis c₃.

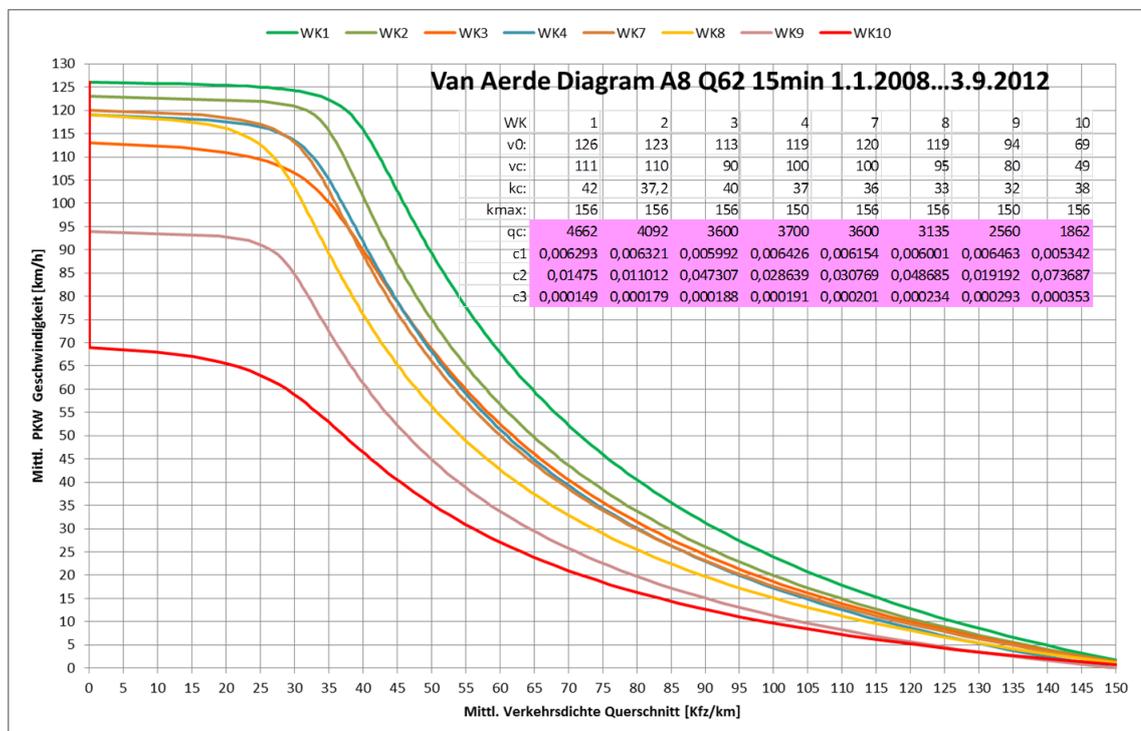


Abbildung 37 wie Abbildung 36 für Querschnitt Q62 A8.

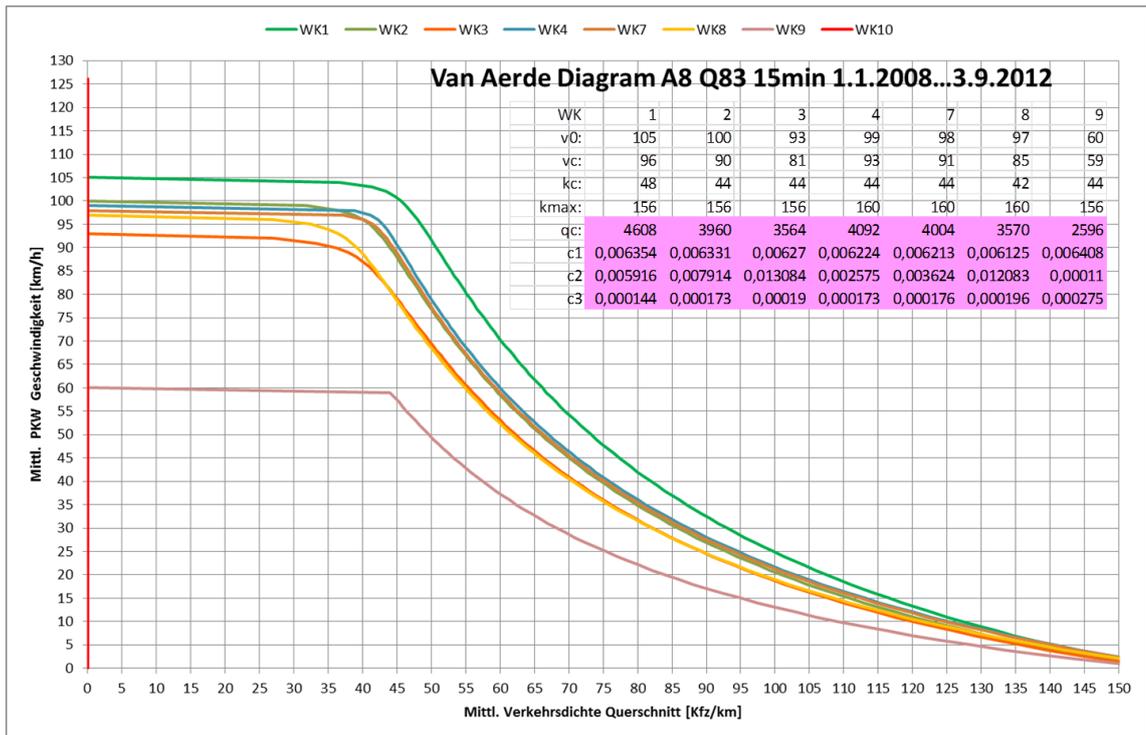


Abbildung 38 wie Abbildung 36 für Querschnitt Q83 A8.

5 AP 5 Modellentwicklung

5.1 Modellentwicklung für das lokale Verkehrsgeschehen

Ziel der Modellentwicklung war es, den Einfluss des Straßenwetters auf den Verkehrsfluss möglichst für jeden Querschnitt und dann auf die Strecke einer Straße angeben zu können. Aufgrund der Analysenergebnisse müssen dabei auch die lokalen Eigenschaften der Straße berücksichtigt werden.

Als Basis für die Beschreibung des Verkehrsflusses, mit den grundlegenden makroskopischen Größen mittlere Geschwindigkeit und Kapazität, dienen die Fundamental-diagramm Modelle. Die Parameter der Verkehrsmodelle können aus den Verkehrsdaten in Abhängigkeit von den Wetterklassen mittels multipler Parameterschätzverfahren bestimmt werden. Aus der im Rahmen der Datenanalysen gewonnenen Erkenntnisse heraus sind diese Parameter aber nur streng genommen für einen bestimmten Querschnitt gültig. Dazu kommt erschwerend, dass für die Bestimmung der Parameter Verkehrs- und lokale Straßenwetter-Daten von jedem Querschnitt über längere Zeiträume vorhanden sein müssen. Außerdem sind die Wetterklassen zur Beschreibung des kurzfristigen lokalen Wettereinflusses häufig zu grob.

Daher war es im zweiten Schritt notwendig zu versuchen, Modelle über den Zusammenhang der Parameter der Fundamentalgleichungen von konkreten Straßenwettergrößen zu entwickeln. Bei den Modellansätzen wurden vereinfachte mikroskopische Zusammenhänge über Fahrbahnzustand und Kraftschluss zum Fahrzeugreifen, Fahrdynamische Zusammenhänge unter Berücksichtigung der Querschnitts- bzw. Strecken-Eigenschaften sowie Haltesichtweite und deren Beeinflussung durch den Wetterzustand, herangezogen.

Die Leitgrößen des Modellansatzes zur Beschreibung der Fundamentalgrößen sind

- Kraftschlussbeiwert zw. Reifen und Fahrbahn
- Sichtweite (Haltesichtweite)

Als Einflussgrößen des Straßenwetters sollten nur Größen verwendet werden, die auch von der Wettervorhersage geliefert werden können. Die Größen sind:

- Fahrbahnoberflächentemperatur
- Niederschlagsintensität
- Niederschlagsart
 - o Oder zur näherungsweisen Bestimmung der Niederschlagsart: Feucht(kugel)Temperatur (aus Lufttemperatur- und Feuchte)

Modelle über das Fahrverhalten müssen auch den Einfluss der Straßeneigenschaften berücksichtigen. Die wesentlichen Einflussfaktoren dabei sind:

- Konstruktive Haltesichtweite (in Meter)

- Längs- und Querneigung (in %)
- Beschaffenheit der Belagsoberfläche (in Form von Material, Rauhtiefe)
- Kurvenradius (in Meter)

5.1.1 Modelle auf der Basis von Fundamentalgleichungen

Neben der grundsätzlichen Möglichkeit für bestimmte Querschnittsarten und Straßentypen Parameter der Fundamentalgleichungen in Abhängigkeit der Wetterklasse über statistische Methoden aus Verkehrs- und Wetter-Daten zu bestimmen, war es auch Ziel einen Modellansatz zu finden, der die Parameter der Fundamentaldiagramme in Abhängigkeit von konkreten lokalen Straßenwettergrößen darstellen kann.

Die Fundamentalgleichung nach Van Aerde [35] ist zwar die gebräuchlichste Gleichung, welche das Fundamentaldiagramm mit 4 Parametern vollständig beschreibt (siehe auch 4.1.2.5). Die Modellierung der Parameter in Abhängigkeit vom Wetter hingegen ist dabei sehr schwierig. Das Fundamentaldiagramm Modell nach Ning Wu [26] eignet sich wesentlich besser, da sich die Parameter dieses Modells (Freie Geschwindigkeit, Kapazität, max. Verkehrsdichte) aus den oben beschriebenen mikroskopischen Ansätzen direkt ausdrücken bzw. sich aus anderen Quellen z.B. HBS [28] ableiten lassen.

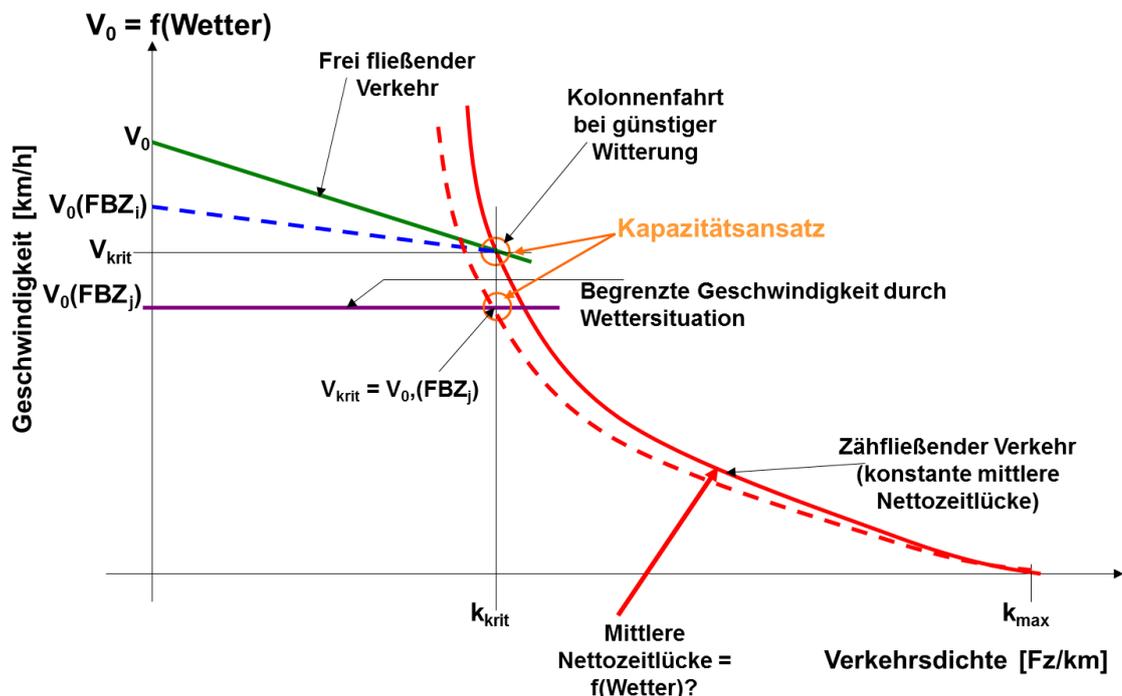


Abbildung 39 Darstellung des vereinfachten (2-Phasen) Fundamental-Modells am v-k-Diagramm. FBZ = Fahrbahnzustand oder Wetterklasse. Andere Größen siehe Text

Die Gleichungen für die einzelnen Phasen des Verkehrsmodells sind ausführlich Kapitel 4.1.2.5, unter Verkehrsmodell nach Ning Wu, beschrieben.

Im Projekt sind zum einen die Parameter der Modellgleichungen durch Parameterschätzverfahren für ausgewählte Querschnitte bestimmt worden. Zum anderen können die wesentlichen Kenngrößen dieses Verkehrsmodells direkt durch die mikroskopisch basierten Modelle über das Fahrverhalten ausgedrückt werden. Die wesentliche Kenngröße dabei ist die freie Geschwindigkeit der Fahrzeuge. Im Folgenden sind die Modellansätze dargestellt.

5.1.2 Modell für die Beschreibung der freien Geschwindigkeit

Die aus der Regressionsanalyse abgeleiteten Parameter der Verkehrsmodelle nach Van Aerde oder NingWu gelten streng genommen nur für diesen Erfassungs-Querschnitt. Um auch Aussagen über Querschnitte treffen zu können, die entweder keine Verkehrs- und Wetter-Erfassung besitzen und um den Aufwand einer Parameterschätzung über lange Zeiträume zu ersparen, wurde versucht über mikroskopische Ansätze das Fahrverhalten unter Berücksichtigung der verschiedenen wesentlichen Einflussgrößen zu modellieren.

Aus den bisherigen Analysen zeigt sich eindeutig, dass die wesentliche Zielgröße die Wahl der Geschwindigkeit darstellt. Man kann sagen, dass die Witterungsverhältnisse einen oberen Grenzwert für die Wahl der freien Geschwindigkeit darstellen. Unter diesem Grenzwert werden die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten durch den Einfluss der Verkehrsdichte und sonstiger von den Eigenschaften der Straße bedingten Einflüsse bestimmt. Nicht zuletzt natürlich auch von Geschwindigkeitsbeschränkungen. Diese nicht witterungsbedingten Einflüsse auf den Verkehrsfluss werden im allgemeinen eben sehr gut von den Verkehrsmodellen auf Basis der Fundamentaldiagramme abgedeckt.

Der Ansatz für die Beschreibung der freien Geschwindigkeit und deren Beeinflussung durch die Witterung fußt auf der Haltesichtweite bzw. der Haltedistanz. Der Modellansatz für die Wahl der freien Geschwindigkeit v_0 bei gegebener effektiver Anhaltesichtweite a bei gerader Strecke ist in Formel 16 wiedergegeben:

$$v_0 = (\mu - s) \cdot g \cdot \left(\sqrt{t_g^2 + \frac{4 \cdot a}{(\mu - s) \cdot g}} - t_g \right) \cdot 1,8$$

Formel 16 Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit v_0 und der effektiven Anhaltesichtweite a in Abhängigkeit vom effektiven Kraftschlussbeiwert μ , und Fahrbahnlängsneigung s bei gerader Strecke. Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ und t_g ist die gesamte Verlustzeit.

Die Anhaltesichtweite ist dabei in Meter, die Geschwindigkeit in km/h einzusetzen. Die effektive Gesamtverlustzeit, die aus der Reaktionszeit des Fahrers, sowie der sog. Schwellen- und Ansprechzeit besteht, wird in Sekunden angegeben und ist im Durchschnitt mit ca. 1,8 sec anzusetzen. Die Längsneigung ist definiert als Verhältnis des Höhenunterschieds zur betreffenden Streckenabschnittslänge. Negative Längsneigung bedeutet Gefälle, positive Werte bedeuten Steigung, jeweils in Fahrtrichtung. Bei gerader Strecke kann die Querneigung bei den hier erzielbaren Genauigkeiten getrost vernachlässigt werden.

Bei gekrümmter Strecke sind die Verhältnisse beim Bremsvorgang schon komplizierter. Es tritt mit gegebenem Kurvenradius neben der tangentialen auch eine radiale Komponente auf, die ein Schleudern des Fahrzeuges bewirken kann. Bei der Modellierung der Geschwindigkeitswahl in Kurvenstrecken ist daher auch die Geschwindigkeit zu finden, bei der durchschnittliche Fahrzeuge noch nicht in einen fahrdynamisch kritischen Zustand kommen, also noch kein Schleudern auftreten kann. Im Detail betrachtet ist der Schleudervorgang sehr komplex und zudem im Einzelfall, wie auch beim Kraftschluss, von der Beschaffenheit und Ausstattung des individuellen Fahrzeuges abhängig, die unmöglich erfasst und berücksichtigt werden können. In diesem Zusammenhang genügt ein vereinfachter Ansatz, wonach die parallel zur Fahrbahnebene wirkende Fliehkraft die zwischen Reifen und Fahrbahn wirkende Reibungskraft erreicht bzw. übersteigt (siehe auch [37]), außerdem wird das Fahrzeug in grober Näherung als ein konzentrierter Massepunkt betrachtet. Die Grenzgeschwindigkeit in Kurvenfahrt wird für dieses Modell wie folgt ermittelt:

$$v_{gr} = \sqrt{127 \cdot R \cdot (\mu + q)}$$

Formel 17 Grenzgeschwindigkeit V_{gr} in km/h bei Kurvenfahrt mit Kurvenradius R in Meter und des effektiven Kraftschlussbeiwertes μ und der Querneigung q .
Die Erdbeschleunigung g ($=9,81 \text{ m/s}^2$).

Die Querneigung ist definiert als Quotient zwischen Höhenunterschied zwischen den Fahrbahnränder und der Fahrbahnbreite. Positive Werte bedeuten Kurvenerhöhung in Fahrtrichtung.

Die Ansätze für gerade und gekrümmte Strecke sind in Kombination zu verwenden. Die jeweils kleinste sich ergebende Wert ist als Modellergebnis für die freie Geschwindigkeit zu verwenden.

Nähere Erläuterungen zu den Ansätzen des gleichen Autors finden sich auch im Schlußbericht zum Forschungsprojekt „Stauprävention auf BAB im Winter“ der BAST [36].

5.1.2.1 Kraftschlussbeiwert

Der Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn hängt mikroskopisch betrachtet von sehr vielen Faktoren und Einflüssen ab, die unmöglich im Einzelnen betrachtet werden können und sind zudem noch bei jedem individuellen Fahrzeug unterschiedlich. Dazu kommt noch, dass der Kraftschluss während des Bremsvorgangs auch nicht gleich ist. Der sogenannte Kraftschlussbeiwert (auch Reibwert oder Reibung – Englisch „friction“ genannt) ist definiert als Quotient zwischen tangentialer Bremskraft und der auf die Reifen wirkenden Gewichtskraft. Nicht zu verwechseln oder gar gleich zu setzen mit dem aus dem Straßenbau stammenden Begriff der Griffigkeit des Belags.

Für diese Modellierung kommt es aber nur darauf an, einen effektiven Kraftschlussbeiwert zu definieren, der den Zusammenhang von Geschwindigkeit und Bremswegverlängerung bei verschiedenen witterungsbedingten Fahrbahnzuständen im Hinblick auf das durchschnittliche Fahrverhalten wiedergibt.

Die wesentliche Kenngröße für den witterungsbedingten Fahrbahnzustand ist die sogenannte Wasserfilmdicke und deren stofflicher Zustand. Grundsätzlich wird unabhängig vom stofflichen Zustand die Filmdicke des Wassergehalts angesetzt. Dabei entspricht 1 mm Wasserfilmdicke einem Liter Wasser pro Quadratmeter. Bei einer Bedeckung durch Schnee ist die Wasserfilmdicke (=Wassergehalt) je nach Dichte entsprechend geringer als die sichtbare Schneedecke. Bei frisch gefallenem Schnee kann die Schneehöhe ca. das 5- bis 15-fache der Wasserfilmdicke ausmachen. Bei gefrorener Eisdecke sind die Unterschiede nicht so gravierend.

Ausführliche Untersuchungen zu diesem Thema und Ansätze für die Modellierung der Abhängigkeit des Kraftschlussbeiwertes von der witterungsbedingten Bedeckung der Fahrbahn wurden im Rahmen des ROADIDEA Projektes [38] unternommen.

Ein empirisches Modell für den Einfluss des witterungsbedingten Fahrbahnzustands auf den Kraftschlussbeiwert wurde außerhalb WOLKE Projektes bereits entwickelt und während des Projektes an verschiedenen Testfeldern in der Praxis validiert. Eine detailliertere Darstellung des Modells kann aus Gründen der Geheimhaltung an diesem Rahmen nicht geboten werden.

Abbildung 40 zeigt die über das Modell vorhergesagten Kraftschlussbeiwerte im laufenden Straßenbetrieb auf einem Testfeld des Schwedischen Zentralamtes für das Verkehrswesen (Trafikverket) auf der E18 bei Vesterås. Die witterungsbedingte Bedeckung der Fahrbahn ausgedrückt in mm bzw. μm Filmdicke, wasseräquivalent, differenziert nach Eis, Schnee und flüssiges Wasser, kann mit Hilfe der Bestimmung der optischen Absorptionsspektren im Infrarotbereich berührungsfrei gemessen werden.

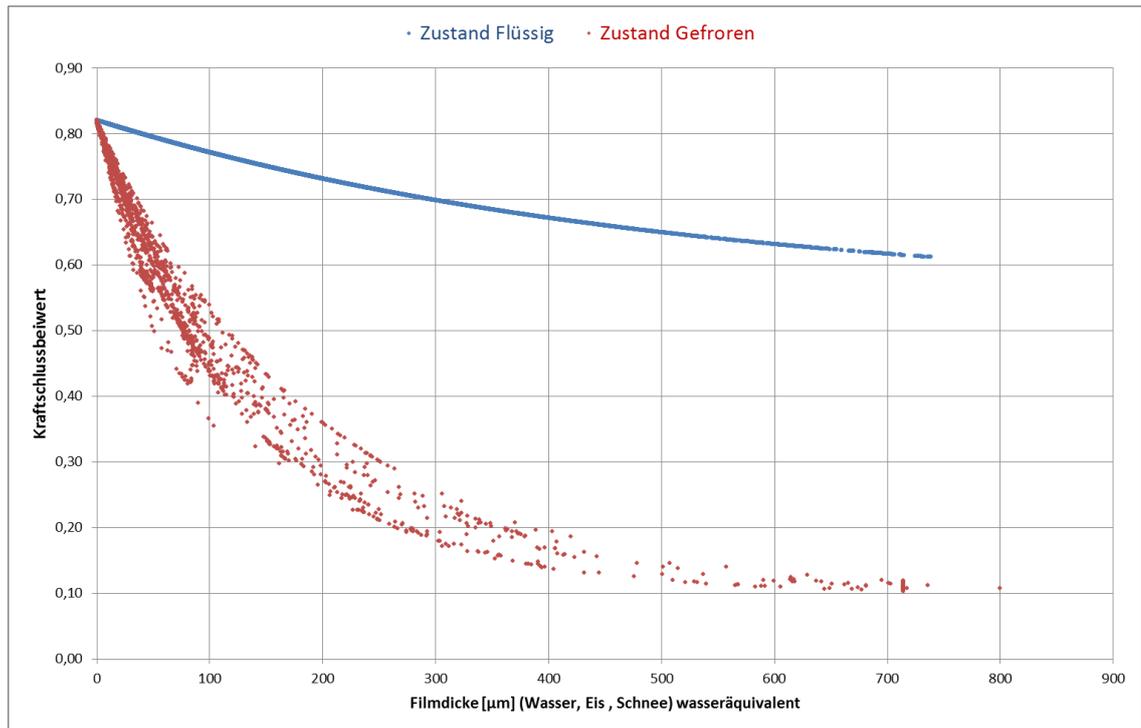


Abbildung 40 Modellvorhersagen für den Kraftschlussbeiwert bei gemessenen Fahrbahnzuständen im realen Straßenbetrieb. Messung der Fahrbahnbedeckung mit optischer Spektralanalyse.

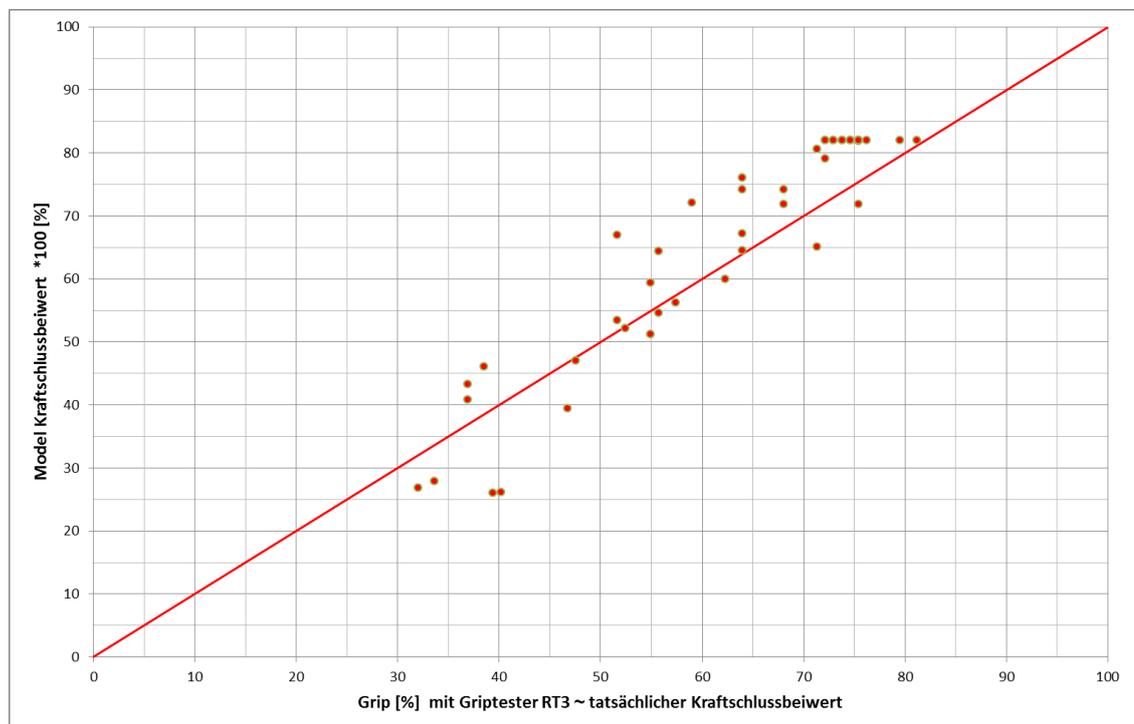


Abbildung 41 Vergleich Modellvorhersage mit Grip-Tester RT3 (CFME) tatsächlich beobachteten Kraftschlussbeiwerten auf der E18 in Schweden im Zeitraum Januar/Februar 2013.

Am selben Testfeld wurden zu bestimmten Zeiten Messfahrten durchgeführt um die tatsächlichen Kraftschlussbeiwerte mit Hilfe von sog. GRIP Testern an Fahrzeugen zu messen. Nach linearer Anpassung der Skalenbereiche der beiden Verfahren konnten die Ergebnisse direkt verglichen werden. Die graphische Darstellung der Vergleichsergebnisse ist in Abbildung 41 zu sehen. Dabei zeigte sich, trotz der bei diesen Größen zu erwartenden starken Streuungen, eine erstaunlich gute Übereinstimmung mit mittleren Abweichungen $<\pm 10\%$ festzustellen ist.

5.1.2.2 Modellierung der Wasserfilmdicke

Da leider in den archivierten Daten keine Messdaten zur Bedeckung der Fahrbahn in Form der Wasserfilmdicke und schon gar nicht zur Differenzierung der stofflichen Beschaffenheit vorgelegen haben, mussten bereits schon für die Analysen die Wasserfilmdicken aus den Niederschlagsdaten und den Temperaturverhältnissen geschätzt werden. Ein Modell für die zu erwartenden Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn ist für spätere Vorhersagen sowieso notwendig. Der Modellansatz ist im Abschnitt 3.5.3.2 bereits ausführlich vorgestellt worden und wird hier nicht mehr weiter vertieft.

5.1.2.3 Modell zur Beschreibung der Sichtweite

Der für das Geschwindigkeitsmodell bestimmende Parameter ist die für den Querschnitt bzw. die Strecke relevante Haltesichtweite. Bei bester Witterung wird die Haltesichtweite bestimmt durch die konstruktiven Eigenschaften der Straße (Kurvenradien, Höhenunterschiede etc.) und der Umgebung (Bebauung, Bewuchs etc.). Bei schlechter Witterung kann diese Haltesichtweite durch Niederschlag oder Nebel weiter eingeschränkt werden.

Die Bildung von Nebel ist ein extrem komplexer und instabiler Vorgang. Es ist bis heute der Meteorologie nicht gelungen die Sichtweite durch Nebel an einer bestimmten Strecke aus den meteorologischen Parametern zu einem bestimmten Zeitpunkt vorherzusagen. Nebel bildet sich in der Regel oberhalb von 97% relativer Luftfeuchte und hängt vom Vorhandensein von Kondensationskeimen in der Atmosphäre ab. Die Dichte des Nebels ist zudem sehr inhomogen, sodass es nahezu unmöglich wird diese Vorgänge an einer Stelle so vorherzusagen, dass auch die Sichtweite angegeben werden könnte. Die Sichtweite kann allenfalls vor Ort direkt durch Verfahren über Lichtstreuung gemessen werden. Selbst da ist noch schwierig aus der Dichtemessung an einem Punkt auf die Sichtweite der ganzen Strecke zu schließen. Interessanterweise waren im Untersuchungsgebiet und –Zeitraum an den gemessenen Sichtweiten nur sehr wenige Ereignisse zu beobachten, an denen die Sichtweite durch die Geschwindigkeit merklich beeinflusst worden wäre. Da wo die Sichtweite gemessen werden kann, ist auch die unmittelbare Auswirkung auf die Geschwindigkeitswahl und damit den Verkehrsfluss über das Geschwindigkeitsmodell gut abbildbar. Die zuverlässige Vorhersage jedoch wird nach wie vor schwierig bleiben.

Hingegen gibt es für die Beeinträchtigung der Sicht durch Niederschläge speziell aus der Flugmeteorologie einige Ansätze bei denen die Sichtweite in Abhängigkeit von der Niederschlags-Art und -Intensität abgeschätzt werden kann. Es wurde bereits außerhalb des vorliegenden Projekts ein Näherungsmodell für die Sichtweite in Abhängigkeit vom Niederschlag aufgestellt (siehe auch [25]). Der Modellansatz auf Basis der optischen Extinktion ist in [36] ausführlicher dargestellt. In Abbildung 42 ist die Sichtbeeinträchtigung durch Niederschlag in Form von Regen und Schnee, gemäß dem Modell aufgetragen. Wie man sieht, hat Schneefall einen deutlich höheren Einfluss als flüssiger Regen. Genau genommen gibt es bei gefrorenem Niederschlag, u.a. abhängig von Temperatur und Feuchte der Atmosphäre, viele unterschiedliche Formen von Schneekristallen, die alle einen anderen Einfluss auf die optische Extinktion haben. Der Aufwand solche Effekte zu berücksichtigen würde aber in keiner Relation zum Gewinn an Gesamtgenauigkeit stehen.

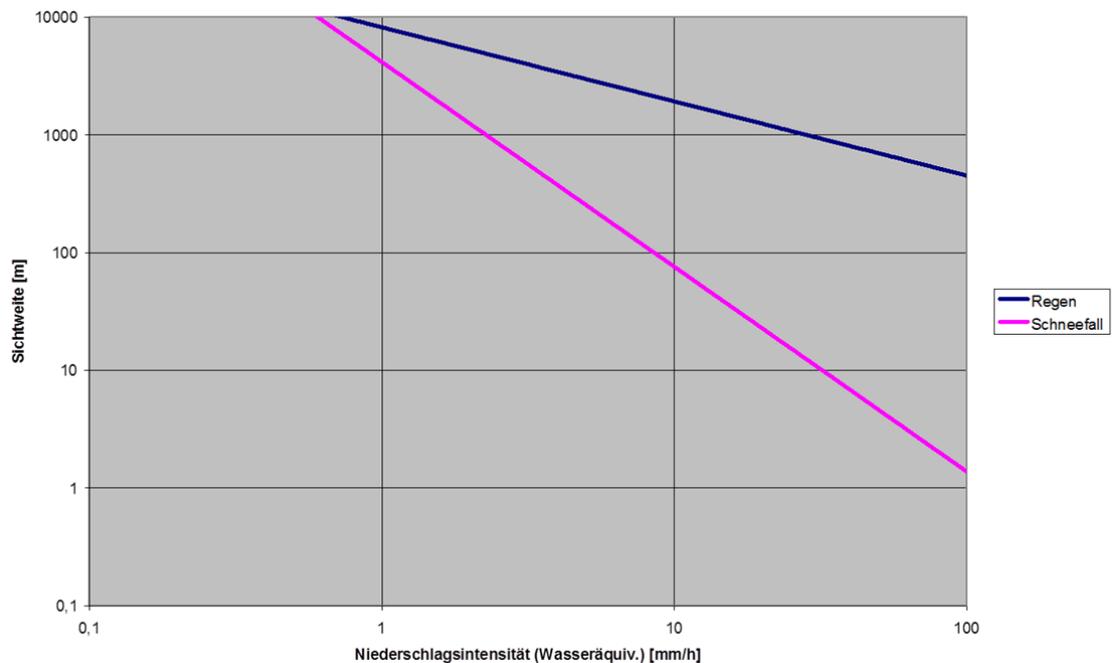


Abbildung 42 Sichtweite (5% Kontrastschwelle) in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität (Wassergehalt) für Regen und Schnee. Logarithmischer Maßstab.

5.1.2.4 Verifikation der Modellierung der Geschwindigkeit

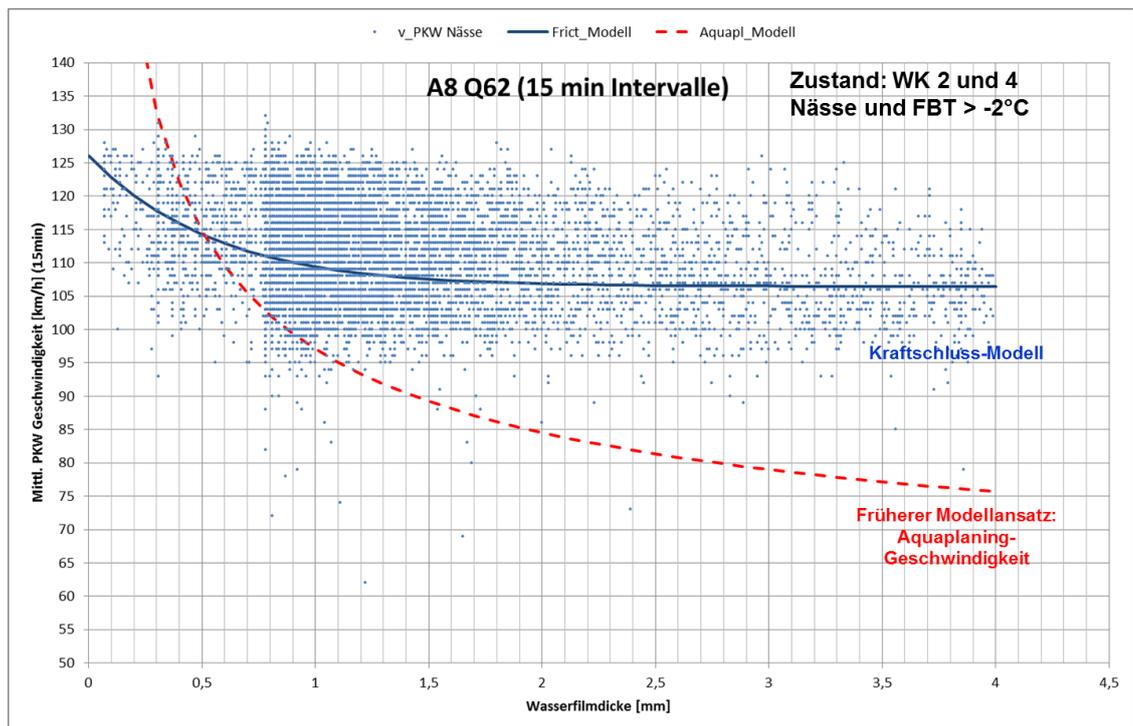


Abbildung 43 Darstellung der gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der geschätzten Wasserfilmdicke bei Nässe und im Vergleich die Vorhersagen des Modells. Ein weiterer Vergleich zeigt die Aquaplaning-Geschwindigkeit nach [13] und nach [36]. Zeitraum 1.1.2008 bis 30.3.2012.

In früheren Untersuchungen wurde als Ansatz für die freie Geschwindigkeit bei regennasser Straße die sog. Aquaplaning-Geschwindigkeit [13] herangezogen. Zur Überprüfung wurden die erfassten Straßenwetter- und Verkehrs-Daten an der A8 auf das Wasserfilmhöhen-Modell (siehe [33]) und über den Kraftschlussbeiwert (5.1.2.1) auf das Geschwindigkeitsmodell (Formel 16) angewendet. Das Ergebnis am Beispiel des Querschnitts Q62 für eine gerade Strecke zeigt Abbildung 43. Die Modellvorhersage stellt einen relativ guten statistischen Trend für die Punktwolke dar. Wie zu erwarten war, weist der Zusammenhang zwischen mittlerer Geschwindigkeit im 15min Intervall und den mittleren Wasserfilmhöhen im gleichen Intervall sehr hohe Streuungen auf. Wie man sieht, passt das vorliegende Modell wesentlich besser zu den tatsächlichen Geschwindigkeit als die sog. Aquaplaning-Geschwindigkeit früherer Ansätze [36][13].

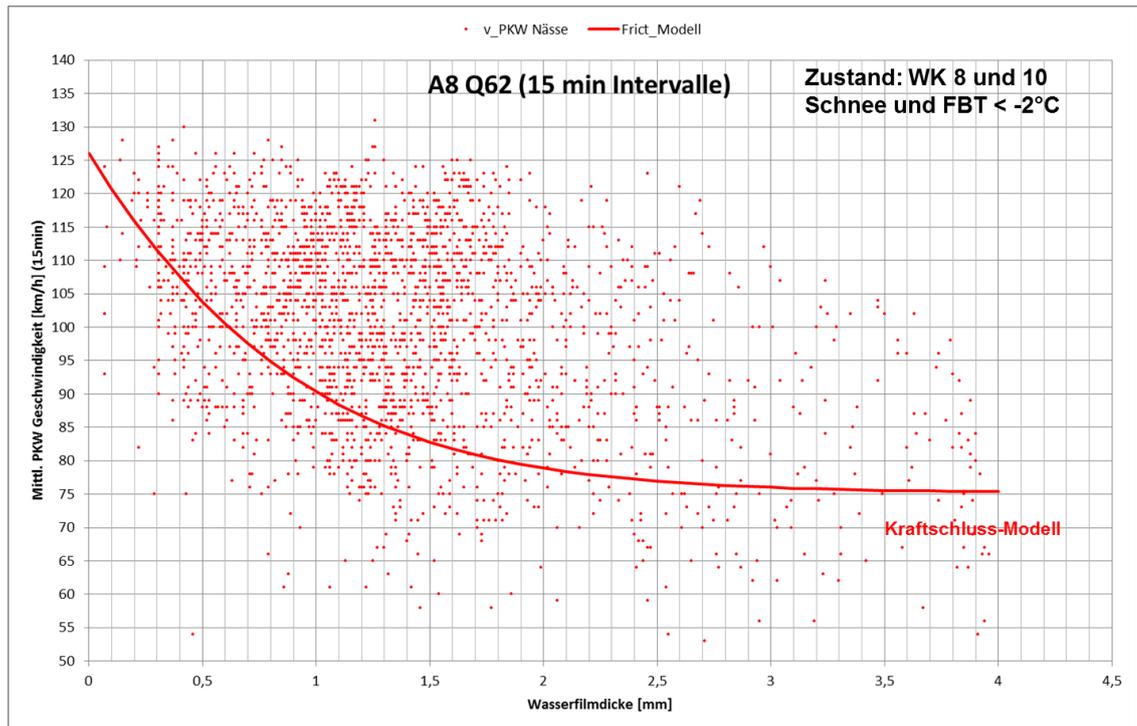


Abbildung 44 Darstellung der gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der geschätzten Wasserfilmdicke bei (teilweiser) Schnee- oder Eisbedeckung und im Vergleich die Vorhersagen des Modells. Zeitraum 1.1.2008 bis 30.3.2012.

Den gleichen Vergleich über denselben Zeitraum aber bei wahrscheinlicher teilweiser Schnee- oder Eisbedeckung zeigt Abbildung 44. Auch hier sind die Streuungen sehr groß, die Modellvorhersagen liegen aber im Streubereich. In diesem Fall kommt noch erschwerend hinzu, dass der Zustand ob und zu welchem Anteil tatsächlich Eis oder Schnee vorgelegen hat, nur schwer abzuschätzen ist und deshalb zusätzlich höhere Abweichungen zu erwarten sind. Eine verlässliche Messung darüber, wie es mit optischen Absorptionmessungen möglich wäre, stand im Untersuchungsgebiet leider nicht zur Verfügung.

6 Modellimplementierung

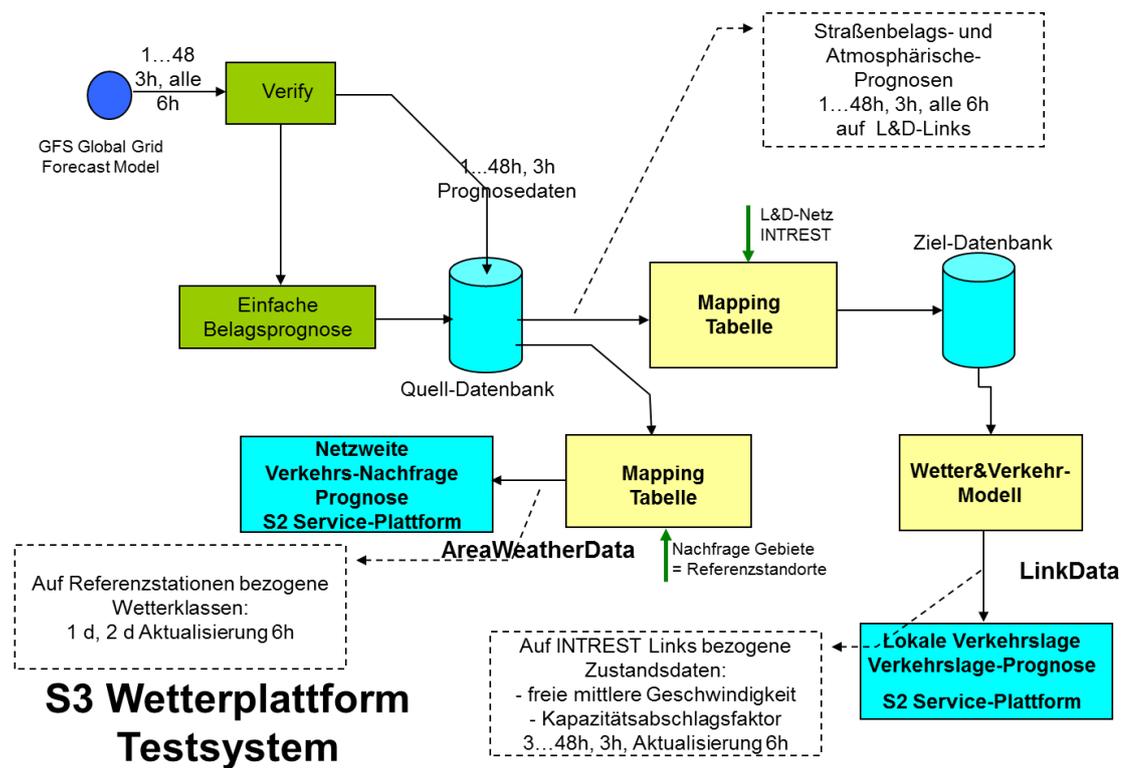


Abbildung 45 Struktur des Testsystems auf der Basis der VIB S3 Wetterplattform

Auf der Basis der digitalen INTREST Karte der Verkehrsinformationsagentur Bayern (VIB) wurde ein Testsystem für die Generierung von Wetterklassen einerseits für den Bedarf der Verkehrsnachfrage-Modelle und andererseits für den Bedarf der lokalen Verkehrsflussmodelle, von mickS aufgebaut und betrieben.

Der Testserver lieferte folgende Ausgangsdaten:

- **LinkData**

Inhalt: streckenbezogene Daten über den verkehrlichen Einfluss des prognostizierten Straßenwetters (Straßenwetterklasse, freie Geschwindigkeit, Kapazität, mittlere Nettozeitlücke)

Aktualisierung: alle 6 h (alle signifikanten Zustände werden vollständig neu ausgegeben)

Prognosehorizonte: 3h, 6h, 9h, 12h, 18h, 24h, 30h, 36h, 42h, 48h

– Bezug: feste Zeitpunkte 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00...

Ausgabe: Pro L&D-Link (Auswahl A8 München Süd) und pro Prognosehorizont.

Format:: csv Text-Datei per FTP

| FeldName | Bedeutung | | DatenTyp | Erklärung |
|--------------|-----------------------------|-----------|----------|--|
| LDLinkID | L&D-Netz INTREST Link ID | Mandatory | LONGINT | Gemäß VIB INTREST |
| StreetNo | Nummer der Straße/Autobahn | Optional | Char5 | Gemäß INTREST |
| StreetName | Name der Straßen/Autobahn | Optional | Char255 | Gemäß INTREST |
| WeatherClass | Wetterklasse | Optional | INT | ID der Wetterklasse |
| AvFreeSpeed | Average Free Speed | Optional | INT | Freie Geschwindigkeit in (ganze) km/h |
| CapacityRed | Kapazitätsreduktions-Faktor | Optional | INT | Reduktion der Kapazität in % (0 ..100) |
| AvNettTG | Mittlere Nettozeitlücke | Optional | LONGINT | In msec |

Tabelle 28 Tabellenstruktur der Ausgabe für streckenbezogene Daten (LinkData)

- **AreaWeatherData**

Inhalt: Auf Nachfragegebiete (=ReferenzWetterstationen) bezogene prognostizierte Wetterklassen.

Aktualisierung: alle 6 h (alle Klassen werden vollständig neu ausgegeben)

Prognosehorizonte: 1d, 2d – Bezug: jeweils feste Zeitpunkte 00:00

Ausgabe: Pro Gebiet und pro Prognosehorizont

Format: csv Text-Datei per FTP

| FeldName | Bedeutung | | DatenTyp | Erklärung |
|----------------|------------------------------|-----------|----------|---------------------------|
| TDAreaID | Traffic Demand Area ID | Mandatory | LONGINT | |
| NameOfTDArea | Name of Traffic Demand Area | Optional | Char5 | Name des Nachfragegebiets |
| TDWeatherClass | Traffic Demand Weather class | Optional | INT | |

Tabelle 29 Tabellenstruktur der Ausgabe für Verkehrsnachfragegebiete (AreaWeatherData)

Die Wetterklassen für die Nachfragegebiete wurden von PTV weiterverarbeitet die Nachfragematrizen dafür wurden von der Uni Stuttgart erarbeitet.

Für den Testbetrieb galten folgende Prämissen zur Vereinfachung:

- ✓ Es werden nur prognostizierte (also in der Zukunft liegende) Zustände ausgegeben
- ✓ Als Prognosequelle wird das globale Gitterpunkt-Prognosemodell GFS verwendet und die Prognosedaten direkt verwendet
- ✓ Die GFS Gitterpunkt-Prognosen werden auf die VIB L&D-Links gemapt.
- ✓ Es werden jeweils zum Aktualisierungs-Zeitpunkt alle L&D-Links, die einen signifikanten Wetterzustand und damit verringerte Verkehrsparameter haben, neu ausgegeben. Alle alten Zustände verlieren ihre Gültigkeit.

- ✓ Für die Nachfragemodellierung wird ebenfalls das GFS Gittermodell auf die die definierten Nachfrage-Gebiete bzw. auf die Standorte der Referenzstationen gemapt.
- ✓ Zum Aktualisierungszeitpunkt werden grundsätzlich alle Wetterzustände (Wetterklassen für die Nachfragemodellierung) neu ausgegeben. Die alten Wetterzustände verlieren damit ihre Gültigkeit.
- ✓ Die Ausgabe erfolgt in Form von CSV Textdateien, die per FTP an die Service-Plattform übertragen werden.
- ✓ Das Testsystem für WOLKE Implementierung wird unabhängig von der im Regelbetrieb laufenden VIB Wetterplattform aufgebaut.

6.1 Ableitung der Prognosen für die Wetterklassen

Da für das Projekt keine auf die GMA Positionen bezogenen laufenden Straßenwetter- und Belagsprognosen und auch keine auf die Wetterstationen bezogenen Wetterprognosen zur Verfügung standen, wurde auf das globale Vorhersagemodell GFS des NCEP (National Centers for Environmental Prediction) USA zurückgegriffen.

GFS global longitude-latitude grid

Geogr. Auflösung: 0,5 ° (ca. 55 km)
 Zeitl. Auflösung: 3 h
 Prognose-Horizont: 0 ... 48 h (opt.max.196 h)
 Aktualisierung: 6 h
 Datenformat: GRIB2
 Übertragung: FTP/HTTP

Anbieter:



National Centers for environmental Prediction
 WHERE AMERICA'S CLIMATE AND WEATHER SERVICES BEGIN

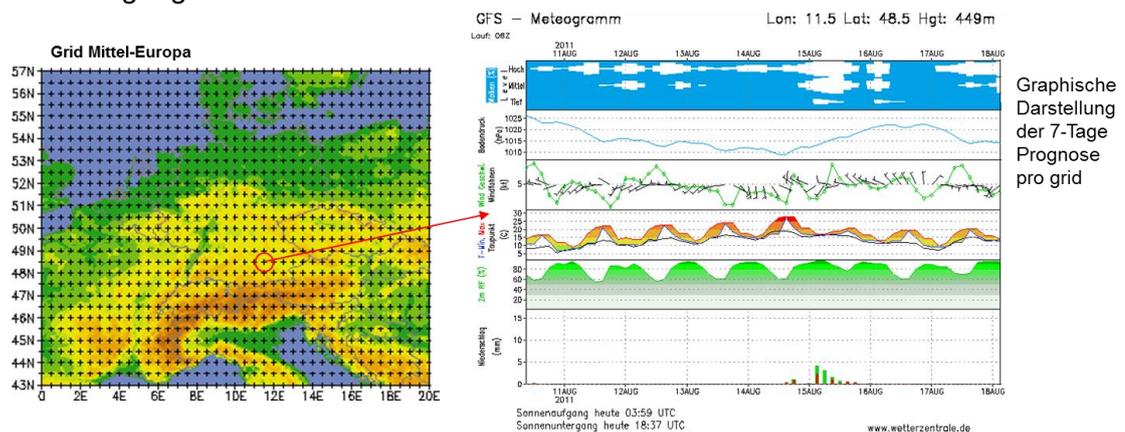


Abbildung 46 Darstellung der GFS Global-Vorhersage

Die Möglichkeiten der GFS Vorhersage sind in Abbildung 46 dargestellt. Die Prognose wird alle 6h aktualisiert auf ein Raster von geographischen Gitterpunkten im 0,5° Abstand zur Verfügung gestellt. Das entspricht in etwa einem Quadrat von etwas mehr als 50 km. Die zeitliche Auflösung beträgt 3h.

6.1.1 Gebietsbezogene Vorhersage der Wetterklassen für die Verkehrsnachfrage

Für die Verkehrsnachfrage sind von der Uni Stuttgart Nachfrageregionen definiert worden. Für jede Nachfrageregion gibt es eine Referenz-Wetterstation des DWD. Die Daten dieser Wetterstationen wurden auch bei der Analyse im Untersuchungszeitraum verwendet. Der der Referenzwetterstation am nächsten gelegene Gitterpunkt des GFS Modells wurde für den Testbetrieb zur Prognose der Wetterklasse verwendet (siehe Abbildung 47)

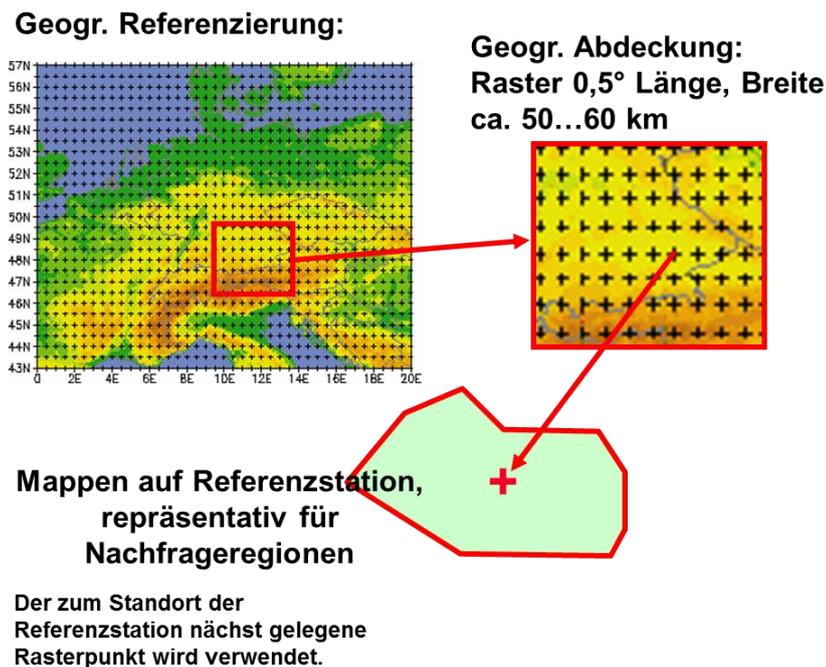


Abbildung 47 Geographische Referenzierung der GFS Vorhersage zu den Nachfrageregionen

Für den Testbetrieb sind von der Uni Stuttgart drei Nachfrageregionen ausgewählt worden (siehe Tabelle 30).

| WSyn_DEVIC EGROUP_ID | NAME | Geogr. Länge | Geogr. Breite | Höhe ü.NN | Gebiet | Land | WMO- STATIONSNR |
|-------------------------|---------------|--------------|---------------|-----------|--------|------|--------------------|
| 10865 | München-Stadt | 11,5442 | 48,1642 | 515,2 | M | D | 10865 |
| AT003 | Kufstein | 12,1628 | 47,5753 | 493 | KU | AT | 11130 |
| AT006 | Salzburg | 13,0517 | 47,7908 | 420 | SB | AT | 11350 |

Tabelle 30 Ausgewählte Referenzwetterstationen zu den Nachfrageregionen

Für die Bildung der Wetterklassen im Testbetrieb liegt folgende Feinklassierung zugrunde:

| Bezeichnung | Sonnenscheindauer [min] | Max. Temperatur pro d, [°C] | Niederschlag pro d [mm/d] | Niederschlagstyp |
|----------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------|
| Heiß | - | > THT95(s) | - | - |
| Kalt | - | < THT5(s) | - | - |
| Topwetter | >= MSD90(d) | - | <= MTN | - |
| Trocken | - | - | <= MTN | - |
| Schauerwetter | >= MSD50(d) | - | > MTN | - |
| Schnee | - | - | >= GSM | Schnee |
| Starker Regen | - | - | > SRM66 | Regen |
| Leichter Regen | - | - | > MTN und <= SRM66 | Regen |

Tabelle 31 Feinklassierung der Wettersituation

Die Parameter sind wie folgt festgelegt worden (Tabelle 32):

| Parameter | Wert | Erläuterung |
|-----------|----------------------|--|
| MSD90(d) | Abhängig von s und d | Grenzwert mit 90% der maximal möglichen Sonnenscheindauer am Kalendertag d. Die maximal mögliche Sonnenscheindauer wird pro Tag grundsätzlich immer zwischen 06:00 und 18:00 UTC gebildet. |
| GSM | 10 mm/d | Grenzwert für Schneefallmenge pro Tag in mm Wasseräquivalent |
| MTN | 0,2 mm/d | Unterer Grenzwert für die Niederschlagsmenge in mm pro Tag wasseräquivalent |

Tabelle 32 Erläuterung zu den Parametern der Feinklassierung

Für die Ausgabe im Testbetrieb wurden die Feinklassen noch einmal zu folgenden Wetterklassen zusammengefasst (Tabelle 33).

| ID | Bezeichnung | Feinklassen |
|----|----------------|------------------------------------|
| 1 | Topwetter | Topwetter |
| 2 | Mittelwetter | Trocken, Schauerwetter, Heiß, Kalt |
| 3 | Schlechtwetter | Leichter Regen, starker Regen |
| 4 | Schnee | Schnee |

Tabelle 33 Wetterklassen für den Testbetrieb zur Verkehrsnachfrage

Das GFS Vorhersagemodell bietet eine Reihe von meteorologischen Parametern. Die für die Klassierung ausgewählten Parameter sind in Abbildung 48 dargestellt.

| Daten-Element | | Level | |
|---------------|---|--------------------|--------------------|
| RH_2m | Rel. Feuchte [%] | 2m über Boden | |
| TMP_2m | Lufttemperatur [°C] | 2m über Boden | → Temperatur |
| TMAX_2m | 3h Max. Lufttemperatur [°C] | 2m über Boden | |
| TMIN_2m | 3h Min. Lufttemperatur [°C] | 2m über Boden | |
| UGRD_10m | U-Komponente Wind [m/s] | 10m über Boden | |
| VGRD_10m | V-Komponente Wind [m/s] | 10m über Boden | |
| FRATE_0m | 3h avg. Niederschlagsintensität [kg/(m²s)] | Boden | |
| PRES_0m | Luftdruck [Pa] | Boden | |
| APCP_0m | 3h Niederschlagsmenge [kg/m²] | Boden | → Niederschlag |
| CSNOW_0m | 3h avg. Klasse Schnee [0/1] | Boden | |
| CICEP_0m | 3h avg. Klasse Hagel [0/1] | Boden | → Niederschlagstyp |
| CFRZR_0m | 3h avg. Klasse gefr. Regen [0/1] | Boden | |
| CRRAIN_0m | 3h avg. Klasse Regen | Boden | |
| TCDC_ea | Gesamtbedeckungsgrad [%] | Gesamte Atmosphäre | |
| HGT_0m | Geopotentielle Höhe [m] | Boden | |
| TMP_0m | Lufttemperatur [°C] | Boden | |
| WEASD_0m | Wasser-Äquiv. d. Akk. Schneeh. [kg/m²] | Boden | |
| SPFH_2m | Spezifische Feuchte [kg/kg] | 2m über Boden | |
| CPRAT_0m | 3h avg. Konvektiver Niederschlag [kg/(m²s)] | Boden | |
| ACPCP_0m | 3h konvektive Niederschlagsmenge [kg/m²] | Boden | |
| SUNSD_0m | Sonnenscheindauer [s] | Boden | → Sonnenschein |
| DSWRF_0m | Kurzwellige Strahlung (abwärts) [W/m²] | Boden | |
| DLWRF_0m | Langwellige Strahlung (abwärts) [W/m²] | Boden | |
| USWRF_0m | Kurzwellige Strahlung (aufwärts) [W/m²] | Boden | |
| ULWRF_0m | Langwellige Strahlung (aufwärts) [W/m²] | Boden | |

Wetterklasse (f. Nachfrage)

Abbildung 48 Auswahl der Parameter des GFS Modells für die Nachfrage Wetterklassen

6.1.2 Streckenbezogene Prognose der Straßenwetterklassen für das lokale Verkehrsgeschehen

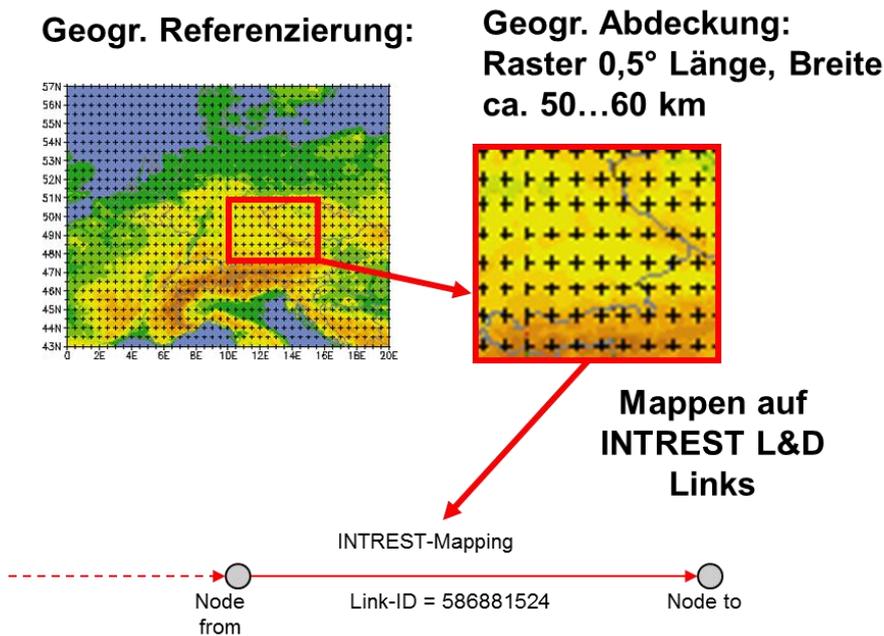


Abbildung 49 Geographische Referenzierung des GFS Vorhersagemodells zu den Streckenabschnitten

Der jeweils geographisch am besten passende Gitterpunkt wird dem jeweiligen Streckenabschnitt (INTREST-Link) zugeordnet (siehe Abbildung 49).

| Wetterklasse | | Klassenkriterien | | | |
|--------------|-----------------|------------------|---------------|------|---------|
| Klasse ID | Kurzbezeichnung | NSA | NSI | FT | FBT |
| | | | mm/h | °C | °C |
| 1 | Trocken | kein | = 0 | * | * |
| 2 | Nass_mRE | Regen | < LLR | >= 0 | > ULST |
| 3 | Glaette_mRE | Regen | < LLR | >= 0 | <= ULST |
| 4 | Nass_sRE | Regen | >= LLR | >= 0 | > ULST |
| 5 | Matsch_mSCH | Schnee | < LLS | < 0 | > ULST |
| 6 | Schnee_mSCH | Schnee | < LLS | < 0 | <= ULST |
| 7 | Matsch_sSCHm | Schnee | >= LLS; < ULS | < 0 | > ULST |
| 8 | Schnee_sSCHm | Schnee | >= LLS; < ULS | < 0 | <= ULST |
| 9 | Matsch_ssSCHm | Schnee | >= ULS | < 0 | > ULST |
| 10 | Schnee_ssSCHm | Schnee | >= ULS | < 0 | <= ULST |

Tabelle 34 Kriterien für die Klassierung der Straßenwettersituation

Die im Testbetrieb verwendeten Straßenwetterklassen entsprechen der in der Analyse verwendeten Klassen (siehe Tabelle 34 und 4.1.2.2). Die dazu verwendeten Parameter sind in Tabelle 35 aufgeführt.

| Parameter | Wert | Erläuterung |
|-----------|----------|---|
| LLR | 0,5 mm/h | Unterer Grenzwert für Niederschlagsintensität als Regen in mm/h. |
| LLS | 0,5 mm/h | Unterer Grenzwert für Niederschlagsintensität als Schnee in mm/h wasseräquivalent. |
| ULS | 3,5 mm/h | Oberer Grenzwert für den Niederschlagsintensität als Schnee in mm/h wasseräquivalent |
| ULST | -2°C | Grenzwert für Fahrbahn-Oberflächen-Temperatur bei der auf Autobahnen Glatteisgefahr eintreten könnte. |

Tabelle 35 Parameter für die Bildung der Straßenwetterklassen

Die Zuordnung der GFS Vorhersagewerte zu den für die Klassierung verwendeten Kriterien ist in Abbildung 50 gezeigt.

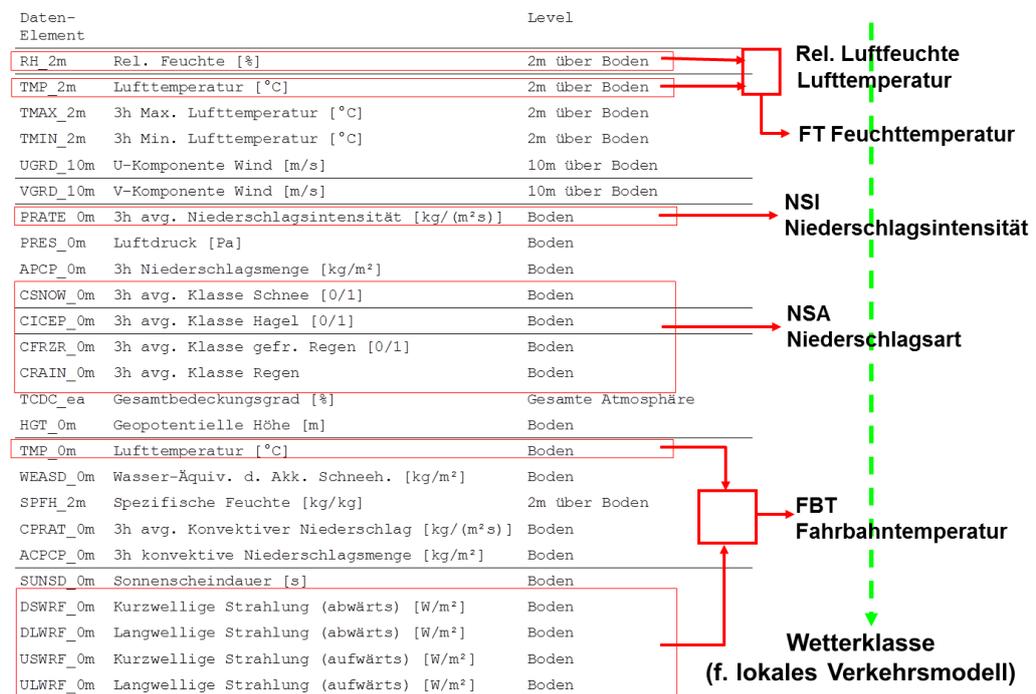


Abbildung 50 Auswahl der GFS Vorhersagewerte für die Straßenwetterklassen für das lokale Verkehrsgeschehen

6.2 Implementierung eines vereinfachtes Fundamentalmodells mit Straßenwetterklassen

Um im Testbetrieb die Verkehrsmodelle kalibrieren zu können, sind die Kenngrößen mittlere freie Geschwindigkeit, Kapazität und Nettozeitlücke gemäß dem Fundamentalmodell (5.1.1), in Abhängigkeit von den Straßenwetterklassen.

Die vorläufig für alle Streckenabschnitte der A8 gleich angesetzten Kenngrößen sind

WOLKE vorl. Klassenparameter

Stand: 12.10.2012

Standard: Autobahn, 2-streifig, gerade, keine Längs- und Querneigung

| Remark | WeatherClass | AvFreeSpeed | CapacityRed | AvNettTG |
|---------------|--------------|-------------|-------------|----------|
| Trocken | 1 | 140 | 0% | 2075 |
| Nass_mRE | 2 | 97 | 0% | 2075 |
| Glaette_mRE | 3 | 65 | -18% | 2530 |
| Nass_sRE | 4 | 85 | -15% | 2441 |
| Matsch_mSCH | 5 | 97 | -3% | 2139 |
| Schnee_mSCH | 6 | 85 | -15% | 2441 |
| Matsch_sSCHm | 7 | 60 | -40% | 2441 |
| Schnee_sSCHm | 8 | 46 | -15% | 2441 |
| Matsch_ssSCHm | 9 | 46 | -54% | 4511 |
| Schnee_ssSCHm | 10 | 43 | -57% | 4826 |

Tabelle 36 Klassenparameter für die Prognosen. AvFreeSpeed = Mittlere freie Geschwindigkeit in km/h, CapacityRed = Reduktion der Kapazität in %, AvNettTG = Mittlere Nettozeitlücke in msec.

Die Geschwindigkeitsangabe ist als maximale Geschwindigkeit, die bei der entsprechenden Wetterklasse anzusetzen ist, zu verstehen. Insbesondere bei gutem Wetter (Klasse 1) sind die zu erwartenden mittleren Geschwindigkeiten von den Streckenbedingungen noch abhängig (Geschwindigkeitsbeschränkungen, Fahrstreifenverengungen etc.). Die zusätzliche Beeinflussung durch die Verkehrsdichte ist durch das nachgeschalteten Verkehrsmodell abzudecken.

6.3 Verifikation der Implementierung

Im Zeitraum Dezember 2012 bis April 2013 wurden alle im Testbetrieb generierten Prognosen archiviert und zusammen mit den von der ABDS/ZVM zur Verfügung gestellten Verkehrs- und Straßenwetter-Daten des gleichen Zeitraums ausgewertet.

Die Auswertung beschränkte sich auf die Querschnitte, die auch bei der Analyse ausgewählt worden sind. Die Ergebnisse sind im Folgenden kurz vorgestellt.

6.3.1 Verifikation der Prognose der Straßenwetterklasse

Wie bereits unter 6.1.2 erläutert wurde das Globale Vorhersagemodell GFS des NCEP/USA ohne weitere Anpassung aus den jeweils nächst gelegenen Rasterpunkten verwendet.

Die im 6h Intervall aktualisierten Prognosen der passenden Streckenabschnitte wurden mit den tatsächlichen gemessenen Straßenwetterdaten im gleichen Intervall an den ausgewählten Querschnitten verglichen.

Das Ergebnis zeigt das Diagramm in Abbildung 51. Es fällt auf, dass die Straßenwetterklasse 1 (= „Trocken“) wesentlich weniger häufig vorausgesagt worden ist, als tatsächlich eingetreten. Insgesamt ergibt sich eine Übereinstimmung zu 37%.

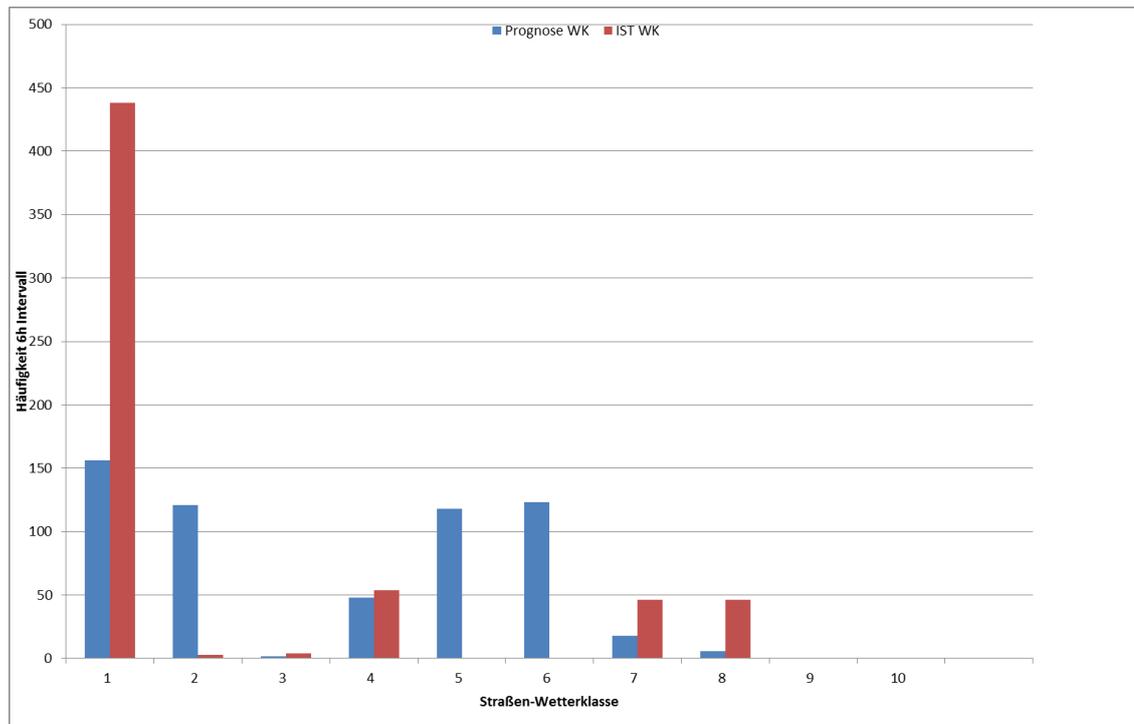


Abbildung 51 Häufigkeitsverteilung der im 6h Intervall prognostizierten Straßenwetterklasse im Vergleich mit den aus den tatsächlich gemessenen Straßenwetterdaten abgeleiteten Straßenwetterklassen im gleichen 6h Intervall.

Das liegt hauptsächlich an der Grenze zwischen Klasse „Trocken“ und „Feucht“. Zudem kommt in den Prognosedaten häufig die Klasse „Schneematsch“ und „Schneebedeckung“ vor zusammen mit Schneefall. Diese Klassen kommen in den tatsächlich gemessenen Daten aber nicht vor. Es war allerdings zu erwarten, dass die unbehandelten Rasterprognosen, zudem nur jeweils ein Rasterpunkt - obwohl der nächste, doch relativ weit entfernt- an einem bestimmten Straßenquerschnitt keine gute Übereinstimmung mit dem Fahrbahnzustand bringen kann. Eine Anpassung und Ableitung einer Belagsprognose war aber im Projekt nicht vorgesehen.

Für eine spätere Anwendung zur wetterabhängigen Kalibrierung von Verkehrsmodelle zur Vorhersage der Verkehrslage wird es wichtig sein eine gut auf den Querschnitt adaptierte Prognose (z.B. mit MOS = „Model Output Statistics“ Verfahren) aus den globalen Vorhersagemodelle zu erzeugen.

6.3.2 Verifikation des kontinuierlichen Geschwindigkeits-Modells

Unabhängig von der Güte der Wetterprognose, die natürlich im Anwendungsfall eine erhebliche Auswirkung auf die Kalibrierung der Verkehrsmodelle hat, kann für die Verifikation der Wetterkalibrierung des Verkehrsmodells selbst, die archivierten Straßenwetter- und Verkehrsdaten herangezogen werden.

Hier wurde im Zeitraum Dezember 2012 bis einschließlich April 2013 die Straßenwetter- und Verkehrs-Daten ausgewertet. Einerseits wurden aus den gemessenen Wettergrößen die gemäß WOLKE vereinbarten Straßenwetterklassen gebildet. Zum anderen wurden mit Hilfe des kontinuierlichen Kalibriermodells für die freie Geschwindigkeit (siehe Kapitel 5.1.2) jeweils für 15min Intervalle die, in Abhängigkeit der Niederschlags- und Temperaturwerte, prognostizierte freie Geschwindigkeit simuliert und mit der tatsächlichen mittleren PKW Geschwindigkeit verglichen.

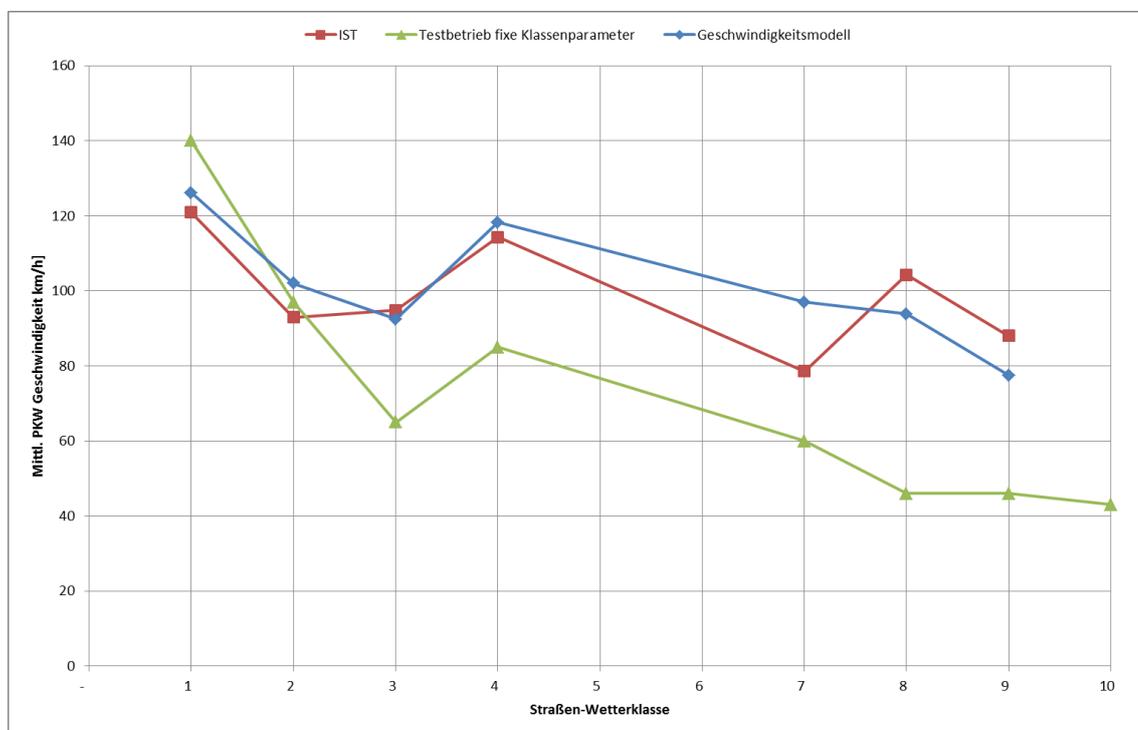


Abbildung 52 Statistik nach Straßenwetterklassen, der im Durchschnitt gemessenen Geschwindigkeiten (rote IST-Kurve) im Vergleich mit dem simulierten kontinuierlichen Modell nach Kapitel 5.1.2 (blaue Linie) und den im Vorfeld vorläufig für den Testbetrieb zu jeder Wetterklasse festgelegten freien Geschwindigkeit (grüne Linie). Es wurden nur Geschwindigkeiten (im 15 min Intervall) bei geringer Verkehrsdichte (<8 Fz/km) für den Vergleich herangezogen.

Der Vergleich mit dem simulierten Geschwindigkeits-Modell in Abbildung 52 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen gefahrenen Geschwindigkeiten. Die Fehler bei der Geschwindigkeitsprognose liegen (gemessen an der HBS Geschwindigkeit für den Querschnitt) im Durchschnitt unter 15%.

Hingegen die vorläufigen, über eine fixe Zuordnungstabelle für den Testbetrieb festgelegten, mittleren Prognosegeschwindigkeiten passten deutlich schlechter zu den tatsächlichen Werten.

6.3.3 Vergleich der Wirksamkeit der Modellansätze im Testzeitraum

Anhand der erfassten und auf 15 min Intervalle aggregierten Verkehrs- und Straßenwetter-Daten eines ausgewählten Querschnittes auf der Pilotstrecke im Testzeitraum (Q062 A8, Zeitraum 1.12.2012 23:00 bis 28.04.2013, ca. 14167 15min Datensätze), wurden die Wirksamkeit verschiedener Modellansätze getestet.

Zunächst war es von Interesse die Verhältnisse am Querschnitt während des Testzeitraums zu analysieren. Das Diagramm Abbildung 53 zeigt die Häufigkeiten der einzelnen Straßenwetterklassen. Wie man sieht kommt die Wetterklasse 1 (= kein signifikantes Wetter) äußerst dominant vor (77,5%). Die restlichen Straßenwetterklassen machen nur 22,5% aus. Straßenwetterklassen 5 und 6 kommen auch hier nicht vor.

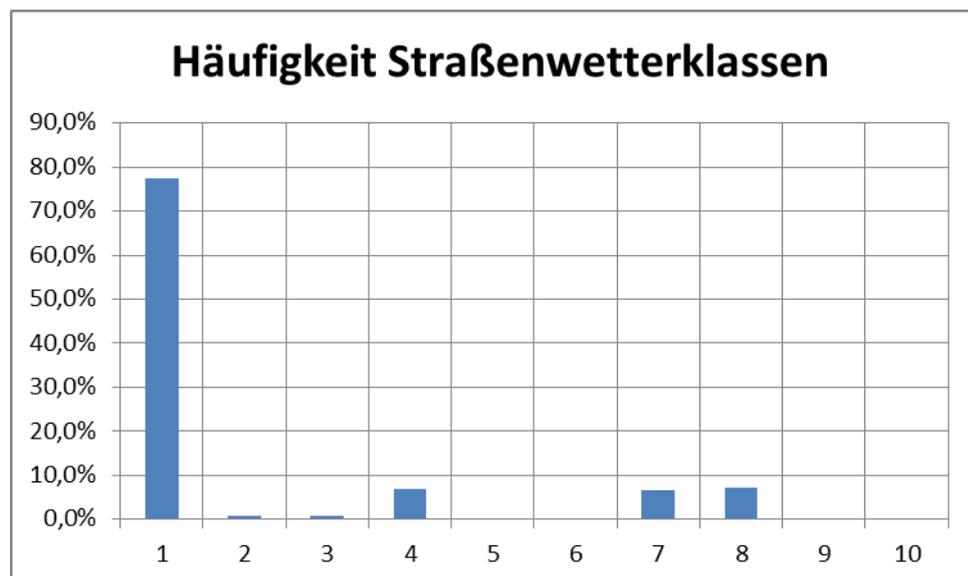


Abbildung 53: Häufigkeit der Straßenwetterklassen. Q062 A8, 15min Datensätze im Zeitraum 01.12.12 bis 28.04.13.

Die kritischen Straßenwetterklassen 9 und 10 liegen unter 0,1%.

Das bedeutet auch, dass sich bei Modellansätzen, welche sich auf die Straßenwetterklassen stützen, in 77,5% der Zeit keine Wetterkalibrierung der Verkehrsmodelle ergibt. Es hat sich jedoch im Laufe des Projektes herausgestellt, dass auch in Situationen, welche nach den Kriterien zur Straßenwetterklasse 1 gehören, sich durchaus auch, durch witterungsbedingte Straßenzustände, Einflüsse auf die gefahrenen Geschwindigkeit und damit die Reisezeit ergeben. Deshalb wurde auch ein kontinuierlicher, nicht von Straßenwetterklassen abhängiger, Modellansatz gewählt (beschrieben in Abschnitt 5.1.2).

Legt man einen strengeren Maßstab an und zählt die Zeiträume (Auflösung 15 min), in denen tatsächlich weder Feuchte bzw. Nässe auf der Fahrbahn, noch Niederschlag vorhanden sind, beträgt der Anteil (im Testzeitraum) knapp 51%.

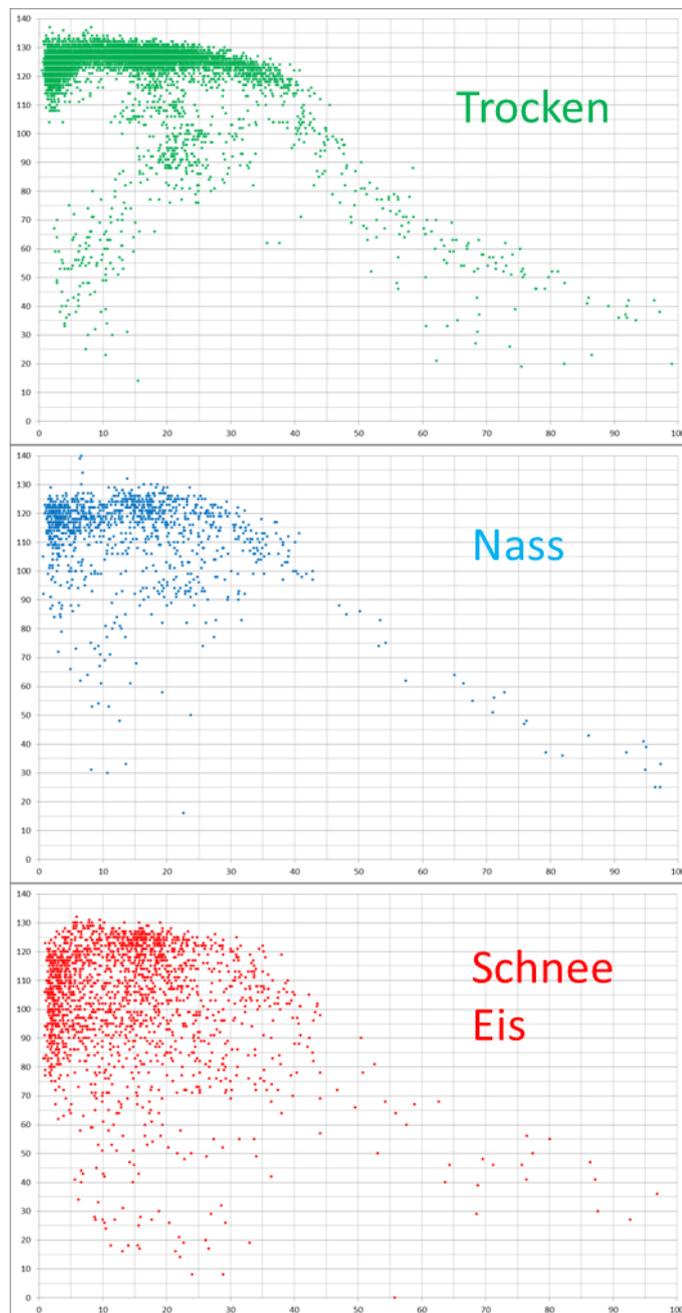


Abbildung 54: 15 min Datensätze im Geschwindigkeits-/Verkehrsdichte-Diagramm getrennt nach den Straßenwetterklasse-Gruppen.

Q062 A8 01.12.12 – 28.04.13

Das heißt umgekehrt, dass in 49% der Fälle eine Wetterkalibrierung des Verkehrsflusses sinnvoll sein kann.

Für die Überprüfung der Wirksamkeit der Modellansätze wurden anhand der Daten im Testzeitraum (ausgewählter Querschnitt Q062) folgende Szenarien getestet:

- 1.) Gängiges auf Fundamentaldiagramm basiertes Verkehrsmodell von Aerde bzw. nach Ning Wu, auf den Querschnitt angepasst aber ohne Kalibrierung durch Wetter
- 2.) Modellansatz für die Kalibrierung basierend auf Straßenwetterklassen mit fest zugeordneten freien Geschwindigkeiten pro Klasse. Wobei die freien Geschwindigkeiten aus der Analyse im Projektzeitraum, angepasst auf den gleichen Querschnitt verwendet wurden.
- 3.) Kontinuierliches Geschwindigkeitsmodell (Abschnitt 5.1.2). Mit den Querschnittseigenschaften und den kontinuierlichen Eingangsgrößen Fahrbahntemperatur, Niederschlag, Feuchttemperatur bzw. Niederschlagsart. Jeweils auf 15 min Intervalle bezogen.

Die prognostizierten bzw. geschätzten mittleren Geschwindigkeiten im 15min Intervall aus den drei Modellansätzen wurden verglichen mit den tatsächlich gemessenen mittleren PKW Geschwindigkeiten. Dabei wurde die durchschnittliche Abweichung (Delta) in km/h und umgerechnet als Reisezeitfehler in min/100km bestimmt. Im Diagramm in Abbildung 55 sind Ergebnisse aufgeführt für die Reisezeitfehler (min/100km), in Fällen, in denen signifikantes Wetter geherrscht hat. Hier werden die Unterschiede natürlich besonders deutlich.

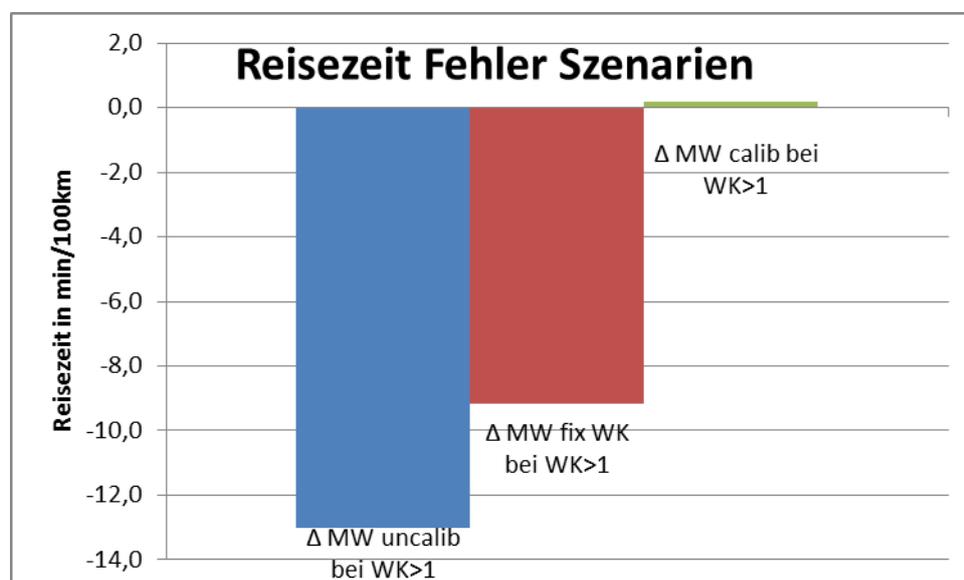


Abbildung 55: Reisezeitfehler bei drei verschiedenen Modellszenarien in Fällen, in denen signifikantes Wetter (Klasse >1) vorhanden war.

MW=Mittelwert Reisezeit.

Die Wetterkalibrierung durch das kontinuierliche Modell zeigte im Mittel die beste Wetteranpassung. Verkehrsmodelle ohne Berücksichtigung der Wettersituation erzeugen, bei signifikanten Wettersituationen, eine Reisezeit, die durchschnittlich -13 min/100km (entspricht einem Fehler von 22,3%) unter der tatsächlichen liegt. Bei allen Wettersituationen immerhin im Durchschnitt noch -4,3 min/100km (entspricht 8,4%). Demge-

genüber bringt der kontinuierlich Modellansatz, bei signifikanten Wettersituationen, eine fast perfekte Anpassung mit nur +0,2 min/100km (entspricht 0,3%) über den tatsächlichen Reisezeiten. Bei allen Wettersituationen bringt der kontinuierliche Modellansatz durchschnittlichen Fehler von -1,0 min/100km (entspricht 2,0%). Der Kalibrieransatz über fest zugeordnete freie Geschwindigkeiten pro Wetterklasse ist zwar immer noch besser als ohne Berücksichtigung des Wetters aber deutlich geringer als das kontinuierliche Modell. Tabelle 37 und Tabelle 38 zeigen noch einmal die Testergebnisse.

| | | | |
|------------------------------|------------------|---------------|-----------|
| Mittelwert PKW V Ist WK>1 | 102,88 | 100% | 58,3 |
| | Δ MW km/h | Δ MW % | min/100km |
| Δ MW uncalib bei WK>1 | 22,99 | 22,3% | -13,0 |
| Δ MW fix WK bei WK>1 | 16,18 | 15,7% | -9,2 |
| Δ MW calib bei WK>1 | -0,34 | -0,3% | 0,2 |

Tabelle 37: Testergebnisse der Vergleichsstudie der zwei Modellansätze und des Verkehrsmodells ohne Wetterberücksichtigung. Über die 15min Intervalle, in denen signifikantes Wetter geherrscht hat (Straßenwetterklasse >1).

| | | | |
|---------------------------------|------------------|---------------|-----------|
| Mittelwert PKW Geschw. IST | 117,47 | 100% | 51,1 |
| | Δ MW km/h | Δ MW % | min/100km |
| Mittel. Fehler Mod. Unkalib. | 9,82 | 8,4% | -4,3 |
| Mittel. Fehler fix WK model | 8,08 | 6,9% | -3,5 |
| Mittel. Fehler cont. Mod. kalib | 2,31 | 2,0% | -1,0 |

Tabelle 38: Testergebnisse der Vergleichsstudie der zwei Modellansätze und des Verkehrsmodells ohne Wetterberücksichtigung. Über den gesamten Testzeitraum.

Das Diagramm (Abbildung 56) zeigt ein typisches Beispiel aus der Testphase. Die gefahrenen PKW-Geschwindigkeiten (15min Intervall) im Vergleich mit den Modellausgaben. Man muss auch bei dem dynamischen, kontinuierlichen Modell damit rechnen, dass erhebliche Streuungen auftreten.

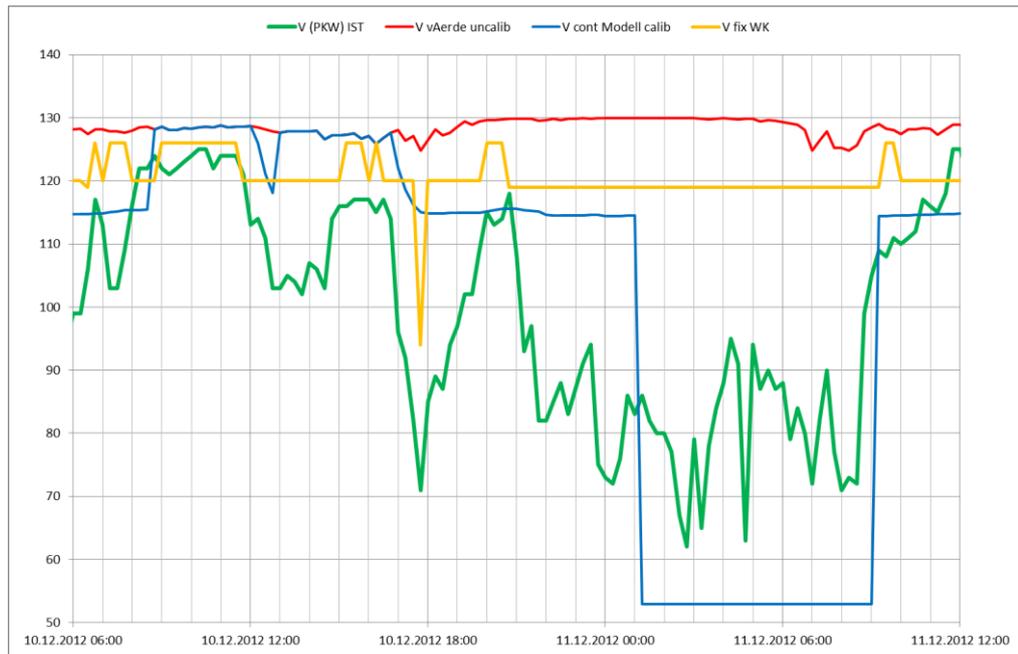


Abbildung 56: Trenddiagramm Auszug Testphase Vergleich tatsächlicher Verlauf der mittl. PKW Geschwindigkeiten (grüne Kurve) im Vergleich mit unkalibriertem Verkehrsmodell (rot), fest zugeordnete Geschwindigkeiten nach Straßenwetterklasse (gelb) und dem dynamischen, kontinuierlichen Geschwindigkeitsmodell (blau).

7 Zusammenfassung

7.1 Zusammenfassung der fachlichen Ergebnisse

Nach der Analyse der verfügbaren Literatur wurde zusammen mit den Partnern eine Struktur der Messdatenbank erarbeitet und die zu erfassenden Daten festgelegt. MicKS hat die Beschaffung sämtlicher Messdaten der synoptischen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes übernommen, ebenso die Aufbereitung in die für das Projekt geeignete Struktur und Bereitstellung der archivierten Umfelddaten aus der VRZ Freimann, die vom Partner ZVM zur Verfügung gestellt wurden. Zusammen mit den Partnern wurde Wetterklassen erarbeitet. Wobei für die Wetterabhängigkeit der Verkehrsnachfrage auf Basis der synoptischen Wetterstationen sinnvollerweise eine andere Klassierung gewählt wurde, wie für das lokale Straßenwetter. Für die Klassierung des lokalen Straßenwetters wurden auch die Ergebnisse des BAST-Projektes „Stauprävention auf BAB im Winter“ [36] eingeflossen sind. Fa. MicKS hat sich im Rahmen des Projektes auf die Analyse und Modellierung des Wettereinflusses auf den lokalen Verkehrsfluss auf außerörtlichen Straßen konzentriert. Das Untersuchungsgebiet dafür war die Autobahn A8 zwischen Holzkirchen und Salzburg (insgesamt ca. 140 km). Es wurden die Verkehrs- und Straßenwetter-Daten von insgesamt ca. 50 Messstellen in beiden Fahrtrichtungen im Zeitraum Januar 2008 bis März 2012 mit einer Aktualisierung von 1 min analysiert. Bei den Verkehrsdaten standen auch die Daten der einzelnen Fahrstreifen zur Verfügung. Es hat sich herausgestellt, dass für die Analyse und Modellierung des Wettereinflusses auf den lokalen Verkehrsflusses eine Aggregation der Messdaten auf 15 min Intervalle am geeignetsten ist. Grundsätzlich wurde erst der Frage nachgegangen, wo hoch der Anteil der Zeiten ist, in denen verkehrlich signifikante Wetterzustände vorherrschen. Basierend auf den Kriterien der Straßenwetterklassen, die sich hauptsächlich auf Niederschlag stützt (weil für die Modellierung keine Bodensensoren verwendet werden können), ist dies in 25% der Zeit der Fall. Legt man mit Hilfe der Bodensensoren einen strengeren Maßstab an und betrachtet die Zeiten zu denen sowohl trockener Fahrbahnzustand, als auch kein Niederschlag vorhanden war, liegt das bei etwas über 50%. In den Fällen dazwischen, konnten auch mehr oder weniger starke Einflüsse auf die gefahrenen Geschwindigkeiten nachgewiesen werden. Die PKW Geschwindigkeiten (unter Berücksichtigung des Schwerverkehrsanteils) kann als Leitgröße für die Beschreibung des Wettereinflusses und für die Modellierung betrachtet werden. Zunächst wurden durch Korrelationsanalysen untersucht, wie die freie mittlere Geschwindigkeit (jeweils in 15 min Aggregationsintervallen) durch einzelne Wetterparameter beeinflusst wird. Dabei wurden aus den verfügbaren Messdaten die wesentlichen Einflussparameter identifiziert (siehe 4.1.2.5). Diese sind Niederschlagsintensität, Niederschlagsart sowie Belagstemperatur und Wasseräquivalent der Fahrbahn-Bedeckung (Wasserfilmdicke). Wasserfilmdicke stand nicht zur Verfügung, diese muss aus den Niederschlagsdaten geschätzt werden, dafür wurden Modelle entwickelt (siehe 5.1.2.2). Ebenso kann die Niederschlagsart näherungsweise unter Berücksichtigung der Lufttemperatur und

Feuchte geschätzt werden. Die Analysen ergaben zwar erwartungsgemäß sehr hohe Streuungen, es waren aber deutliche statistischen Tendenzen zu erkennen (siehe 4.1.2.5). Aus den vorangegangenen Analyseergebnissen wurden drei repräsentative Querschnitte ausgewählt, die für weitergehende Analysen und Entwicklung der Modelle herangezogen wurden (siehe 4.1.2.3). Mit Hilfe der Häufigkeitsverteilung wurden die mittleren freien Geschwindigkeiten (gefahrere Geschwindigkeit bei geringer Verkehrsdichte) in Abhängigkeit der Straßenwetterklassen untersucht. Hier waren signifikante Abhängigkeiten zu finden. Bei starker Nässe sind Geschwindigkeitseinbrüche um 10%, bei Schnee und Eis im Durchschnitt bis zu 44% zu verzeichnen (siehe 4.1.3.6). Zudem gibt es eine leichte Abhängigkeit der Ergebnisse vom Querschnitt, was erwartungsgemäß an den Eigenschaften der Strecke liegt. Als statische Streckeneigenschaften waren zu berücksichtigen, der Kurvenradius, Quer- und Längsneigung und die sog. Haltesichtweite (siehe [28]). Bei der Entwicklung von Modellen für die Prognose bzw. Schätzung des Verkehrsflusses in Abhängigkeit vom Wetter wurden zwei grundlegende Ansätze verfolgt. Der erste Ansatz war, die Parameter des van Aerde Fundamentaldia-gramm-Modells [35] in Abhängigkeit der Straßenwetterklasse zu schätzen (siehe 5.1.1). Um die wetterkalibrierten Verkehrsflussmodelle auch auf Querschnitte übertragen zu können, von denen keine Verkehrs- und Straßenwetter-Daten vorliegen, wurde ein zweiter Ansatz gewählt. Der Modellansatz basiert auf Fahrdynamischen Zusammenhängen, berücksichtigt die statischen Streckeneigenschaften und verwendet als Einflussgrößen direkt die kontinuierlichen Wettergrößen wie Niederschlag, Feuchtkugel- und Belags-Temperaturen ohne Klassierung. Das Modell berücksichtigt den Einfluss der Wettersituation auf den Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn, sowie den Einfluss des Niederschlags auf die Halte-Sichtweite und das daraus resultierende Fahrverhalten (siehe 5.1.2).

Im Rahmen des AP6 wurde von micKS ein Testserver aufgebaut, welcher bezogen auf die Verkehrs-Nachfragegebiete alle 6h aktualisiert die vorhergesagte Nachfragewetterklasse in Prognoseschritten zu 3h bis 48h abgibt. Für den streckenbezogenen lokalen Verkehrsfluss wurden auf die Streckenabschnitte bezogen die vorhergesagten Straßenwetterklassen ausgegeben. Die Daten wurden an den Partner PTV geliefert. Archivdaten der Ausgaben wurden an die Partner bereitgestellt. Die Wettervorhersage wurde aus dem frei zugänglichen GFS (Global Forecast System) des NCEP, auf ca. 50 km Rasterpunkte bezogen entnommen. Für die Verifikation der Ergebnisse im Testzeitraum von Dezember 2012 bis April 2013 wurden von der ZVM wieder archivierte Verkehrs- und Straßenwetter-Daten zur Verfügung gestellt und von micKS aufbereitet. Um die Wirksamkeit der wetterkalibrierten Verkehrsmodelle unabhängig von der Qualität der Wettervorhersage überprüfen zu können, wurden wieder die tatsächlichen Straßenwetterdaten der einzelnen Querschnitte verwendet. Dabei wurden die Geschwindigkeitsschätzungen aus den beiden Modellansätzen mit den tatsächlichen Geschwindigkeiten verglichen und als drittes Szenario ein nicht wetterkalibrierter Fundamentalan-satz (um den reinen Einfluss der Verkehrsdichte abzubilden). Dabei zeigte sich, dass das nicht wetterkalibrierte Verkehrsmodell im Durchschnitt über den gesamten Zeitraum einen Reisezeitfehler von -4,3 min/100km (ca. 8,4%) macht. Berücksichtig

man lediglich die Zeiten, wo signifikantes Wetter geherrscht hat, liegt die Fehleinschätzung bei -13 min/100km. Demgegenüber bringt der wetterkalibrierte, kontinuierliche Modellansatz nur eine Fehleinschätzung von -1 min/100km (ca. 2%). Bei signifikantem Wetter liegt der Wert sogar bei +0,2 min/100km (ca. 0,3%).

Wenn auch verkehrlich signifikantes Wetter im Durchschnitt nur 25% der Zeit ausmacht, macht eine wetterabhängige Kalibrierung des lokalen Verkehrsflusses durchaus Sinn, besonders, wenn es um hohe örtliche und zeitliche Auflösung geht. Voraussetzung ist auch eine kleinräumig angepasste Wetterprognose. Je großräumiger die Wetterprognosen sind, je gröber die Wetterklassierung und wenn es um Reisezeiten über lange Strecken geht, umso mehr tritt der Wettereinfluss hinter anderen Einflussfaktoren zurück.

8 Veröffentlichungen von Projektergebnissen

8.1 Partner übergreifende Veröffentlichungen

Fachzeitschriften:

Bakircioglu, I., Friedrich, M., Lohmiller, J., Janko, J., Pillat, J., Schedler, K. (2014): Wetterabhängige Kalibrierung von Verkehrsmodellen für eine optimierte Verkehrssteuerung, Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum Verlag, Bonn (in Planung).

Friedrich, M., Lohmiller, J., Pillat, J. (2014): Kontinuierliche Erfassung von Fahrzeiten und Verkehrszusammensetzungen mit Kennzeichenerfassungssystemen, Straßenverkehrstechnik, Kirschbaum Verlag, Bonn (in Vorbereitung).

Konferenzberichte:

Heilmann, B., Reinthaler, M., Asamer, J., Fehrenbach, L., Pillat, J., Lohmiller, J., Friedrich, M., Schedler, K., (2013): Integrating Weather Impact in Traffic Demand Models for Private Motorised Transport, Proceedings of ITM (3. Innovations in Travel Modeling)

Lohmiller, J., Friedrich, M. (2012): Factors influencing the travel time reliability of motorway sections, Proceedings of the 6th international symposium Networks for Mobility, Stuttgart.

Pillat, J. (2013): Analyse des Wettereinflusses auf das Verkehrsaufkommen auf Autobahnen, Tagungsband zur Universitätstagung Verkehrswesen 2013, Zürich.

Pillat, J. (2013): Wetterabhängige Prognose des Verkehrsaufkommens, in: Institut für Straßen- und Verkehrswesen (ed.), Kurzfassungen der Vorträge zum 12. Fachkolloquium Straße und Verkehr 2012, Stuttgart.

Pillat, J., Lohmiller, J. (2014): Clusterbasierte Prognose von Ganglinien – ein Zuordnungsverfahren, Heureka, Stuttgart.

8.2 micKS MSR GmbH und KS-Consulting

Konferenzberichte:

Schedler K. E. (2014): New results for analyzing and modelling of weather impact on local traffic flow under the WOLKE project, 17th International Road Weather Conference, SIRWEC, Andorra, January 30 to February 1, 2014

Schedler K. E. (2012): Road Weather related travel time information, 19th ITS World Congress, Vienna, Austria, October 22 to 26, 2012

Schedler K. E. (2012): New Approaches for Modelling of Weather impact on Traffic flow, 16th International Road Weather Conference, SIRWEC, Helsinki, Finland, 23-25 May 2012

9 Glossar

Abstandsfunktion

Funktion zur Bestimmung der Ähnlichkeit bzw. der Differenz zweier Ganglinien. Definierte Funktionen sind z.B. die Summe der Abstandskvadratrate (SAQ), der GEH-Wert und die Prozentfunktion.

ANPR

Abkürzung für Automatic Number Plate Recognition (Automatische Kennzeichenerfassungssysteme)

Cluster

Anhand eines Clusterverfahrens und einer Abstandsfunktion bestimmte Gruppe von Objekten (Ganglinie, Tagesganglinie, Netzganglinie ...) die ähnliche Eigenschaften haben

Fahrzeit

Ist die Zeit, die ein Fahrzeug für eine bestimmte Strecke benötigt. Wird in diesem Bericht synonym für Reisezeit verwendet. Wird allgemein häufig mit min/100km angegeben.

Ganglinie

Menge von Datensätzen über entsprechende Zeitintervalle eines Tages (z.B. 24 Messwerte über 60-Minutenintervalle oder 96 Messwerte über 15-Minuten-Intervalle).

GEH

Wert zum Vergleich von Verkehrsstärken

Richtungsmessquerschnitte (RMQ)

Stelle auf einer Strecke, an der durch einen stationären Detektor Messwerte erfasst werden.

TMC-Location

Codierte Position eines POIs auf dem Straßennetz.

TMC-Locationcodeabschnitts

Streckenabschnitt (vonKM, bisKM) auf einer Strecke des Projektnetz auf dem eine TMC-Location definiert ist.

Schaltzustand

Zustand der Wechselwegweisungs- und Streckenbeeinflussungsanlagen.

Lokale Detektordaten

Lokale Detektoren (Induktionsschleifen, etc.) messen die Verkehrsstärke und die Geschwindigkeit eines Streckenquerschnitts. Sie werden kontinuierlich und automatisch erfasst.

Meldungsdaten

Verkehrsmeldungen aus unterschiedlichen Quellen: Freiwillige Staumelder, Polizei, Verkehrswarndienst, ADAC etc. Sie werden unregelmäßig und nicht automatisch erfasst.

Verkehrslagedaten

Verkehrslagedaten werden durch Fusion der Daten aus einer oder mehrerer Datenquellen generiert. Kenngrößen der Verkehrslage können auf eine Strecke (LOS, Reisezeit, Verlustzeit, Verkehrsstärke, Staulänge) oder eine Relation (LOS, Reisezeit, Verlustzeit, Staulänge) bezogen sein.

Verkehrsinformationsdaten

Informationen über die Verkehrslage, die an die Verkehrsteilnehmer weiter gegeben werden (Verkehrsfunk, RDS-TMC, Internet, straßenseitige Informationen).

Attributierung

Die Versorgung von Netzobjekten (Strecke, Streckenzug, Route) mit Attributen wird als Attributierung bezeichnet. Dabei können die Attribute statisch, d.h. über die Zeit unveränderlich sein (Länge, Fahrzeit im unbelasteten Netz etc.), oder dynamisch, d.h. über die Zeit veränderlich sein (aktuelle Fahrzeit, Level-of-Service etc.).

INTREST-Datenmodell

Georeferenzierungs- und Austauschplattform für verkehrsrelevante Daten.

Projektnetz

Strategisches bzw. maßnahmenrelevantes Verkehrsnetz. Datenhaltung der Verkehrslagedaten.

Friktion

Unter Friktion (engl.: „friction“) versteht man die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche. In der deutschen Literatur auch als Kraftschlussbeiwert bezeichnet. Quantitativ wird die Friktion als dimensionsloser Koeffizient zwischen 0 und 1 angegeben. Er beschreibt das Verhältnis zwischen tangentialer Bremskraft (Horizontalkraft)

und der senkrecht auf die Fahrbahnoberfläche über die Reifen wirkenden Gewichtskraft des Fahrzeuges. Die Friktion ist streng genommen über einen Bremsvorgang nicht gleich bleibend. Vielmehr gibt es Phasen mit Haftreibung und Gleitreibung etc. Im Sinne der Modellbildung kann aber vereinfacht unter der Friktion derjenige effektive Koeffizient verstanden werden, der bei einer Vollbremsung während des gesamten Anhalteweges im Mittel anzusetzen ist.

Sprühfahnen

Der Begriff soll die hinter einem fahrenden Fahrzeug auf nasser Straße von den Reifen aufgewirbelte Gischt (Wasseraerosol) bezeichnen werden. Sprühfahnen können bei dichtem Verkehr eine nicht unerhebliche Sichtbehinderung darstellen.

Kontrastschwelle

Der Begriff Kontrastschwelle wird in der Sichtweitenmessung gebraucht. Die Schwelle in % angegeben bezeichnet den Grenzwert für den Kontrastunterschied (oder auch Helligkeitsunterschied) zwischen zwei optische zu beobachtenden Flächen, bei dem zu den herrschenden Sichtverhältnissen gerade noch ein Unterschied festzustellen ist. Die Sichtweite ist im Straßenverkehr auf eine Kontrastschwelle von 5% bezogen.

Kraftschlussbeiwert

In der deutschen Literatur gebräuchliche Bezeichnung für die Reibungskoeffizient zwischen Fahrbahnoberfläche und dem Fahrzeugreifen. Siehe auch → Friktion!

Reisezeit

In diesem Bericht gleichbedeutend mit Fahrzeit (→) verwendet.

Taupunkttemperatur

Der Taupunkt bezeichnet diejenige Temperatur bei dem die in einem bestimmten Luftvolumen befindliche Wasserdampfmenge gerade noch aufgenommen werden kann. Wird die Taupunkttemperatur unterschritten, kondensiert der Wasserdampf. Es entsteht Nebel in der Luft an sog. Kondensationskeimen oder es schlägt sich z.B. Feuchte auf einer Fahrbahn nieder, deren Oberflächentemperatur unter der Taupunkttemperatur der Luft liegt. Die Taupunkttemperatur kann aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte mit hinreichend genau berechnet werden.

Glättemeldeanlagen

Ist die Amtsbezeichnung für Messstationen, die für den Winterdienst auf Straßen alle Parameter messen, welche für die Glättebildung auf der Fahrbahn relevant sind und für die Vorwarnung vor Glättezuständen dienen.

Umfelddatenmessstellen

Umfelddatenmessstellen bzw. Umfelddatenerfassung ist der Überbegriff in der **TLS** (siehe TLS) für alle Messstellen auf Bundesfernstraßen die verkehrsrelevante Umweltbedingungen erfassen (Glätte auf der Fahrbahn, Wetter in der Atmosphäre, Sichtverhältnisse, Emission und Immissionen durch Luftschadstoffe etc.).

TLS

TLS bedeutet „Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen“, die von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) für Bundesdeutsche Fernstraßen herausgegeben wird und die technischen Anforderungen an die Datenkommunikation für Streckenstationen regelt.

synoptische Wetterstationen

Darunter versteht man Wetterstationen, die möglichst umfassend alle für eine synoptische Wetterprognose erforderlichen Wetterbeobachtungen erfasst. Synoptisch bedeutet in diesem Zusammenhang „Gesamtschau“, also Berücksichtigung aller relevanten Parameter. Heutzutage arbeiten die meisten Wetterstationen automatisch und übermitteln die Daten über Fernwirktechnik bzw. Netzwerk an die jeweiligen Wetterzentralen. Der Deutsche Wetterdienst betreibt in Deutschland ein großes Messnetz von synoptischen Wetterstationen unterschiedlicher Ausbaustufen und auch so genannte Klimastationen, welche für die langfristige Klimatologie vorgesehen sind. Auch einige private Wetterdienste unterhalten eigene Messnetze (z.B. Meteomedia).

SWIS

Ist die Abkürzung für Straßenwetter-Informationen-System. Ein umfassendes SWIS existiert auf Bundesautobahnen in Deutschland, die in Auftragsverwaltung des Bundes von den zuständigen Straßenbauverwaltungen der Länder errichtet und betrieben werden. Im Englischen gibt es den gleichbedeutenden Begriff RWIS (= Road Weather Information System).

SBA

Ist die Abkürzung für StreckenBeeinflussungsAnlage. Synonym verwendet findet man auch den Begriff „VBA“ (= VerkehrsBeeinflussungsAnlage). Eine Anlage besteht aus Streckenstationen die Verkehrs- und Umfeld-Daten aus der Strecke erfassen und mit Hilfe von Anzeigequerschnitten mit Wechsel-Verkehrszeichen und –Wegweisung den Verkehr beeinflussen und in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrs- und Umfeldbedingungen für einen gleichmäßigen Verkehrsfluss sorgen.

Sättigungskonzentration

Ist ganz allgemein diejenige Massenkonzentration (siehe Massenkonzentration) bei der die Lösung gesättigt ist, d.h. dass keine weitere Menge des zu lösenden Stoffes aufgenommen werden kann. Wird in diesem Zusammenhang bei wässriger Lösung von Tausalzen gebraucht

Massenkonzentration

Eine Massenkonzentration ist eine Gehaltsangabe, welche die Masse eines Stoffes i bezogen auf das Volumen eines Stoffgemisches oder einer Lösung angibt.

Optisches Streulichtverfahren

Bezeichnet ein optisches Messverfahren, bei der die Dichte von Aerosolen (z.B. Nebel oder auch Rauch etc.) in der Luft bestimmt werden kann. Bei diesem Verfahren wird eine Lichtstrahl ausgesendet, der von den Aerosolen je nach Dichte mehr oder weniger gestreut (abgelenkt bzw. reflektiert) wird. Je nach dem Winkel zum Lichtstrahl, bei dem das gestreute bzw. reflektierte Licht gemessen wird, unterscheidet man zwischen Vorwärts- oder Rückwärts-Streulichtverfahren. Heutzutage wird im Straßenbereich die optische Dichte von Nebel und damit die Sichtweite, überwiegend mit Geräten nach dem Vorwärts-Streulichtprinzip gemessen. Das Luftvolumen in dem gemessen wird, ist dabei im Zentimeterbereich relativ klein.

Streulichtsignale

Im Zusammenhang mit Streulichtverfahren gebraucht und bezeichnen die elektrischen Signale bzw. Impulse, die am optischen Messaufnehmer durch das an Aerosolen gestreute Licht abgegriffen und ausgewertet werden können.

10 Literatur

- [1] Bayern Info: Internetauftritt der VIB Verkehrsinformationsagentur Bayern GmbH, Stand 26.11.2009, www.bayerninfo.de.
- [2] Chung, E., Ohtani, O., Warita, H., Kuwahara, M., Morita, H. (2006): Does weather affect highway capacity?, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Japan
- [3] Chung, E., Ohtani, O., Kuwahara, M. (2005): Effect of rainfall on travel time and travel demand, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Japan
- [4] Maze T.H., Agarwal, M., Burchett, G. (2005): Whether weather matters to traffic demand, traffic safety and traffic flow, Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, USA
- [5] Oetting, A. (2002): Angebotsabhängige Modellierung der reisezweckspezifischen Verkehrserzeugung und ihre Anwendung auf den städtischen Freizeitverkehr, Dissertation an der RWTH Aachen
- [6] Schlich, R., Simma, A., Axhausen, K.W. (2003): Zielwahl im Freizeitverkehr, Institut für Verkehrsplanung und Transportsystem, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH)
- [7] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (2008): Mobilität und Verkehrstechnologien - Das 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung, Baden-Baden
- [8] FACH, M. (1996): Einflußgrößen auf den Kraftschluß bei Nässe. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Reihe Fahrzeugtechnik Heft F 21, Bergisch-Gladbach.
- [9] GNADLER, R. (1980): Naßgriff- und Aquaplaningverhalten von PKW-Reifen. In: Veröffentlichungen des Institutes für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe (TH) (Hrsg.), Heft 22, Karlsruhe, S. 113-129.
- [10] HEINZ, G. (1981): Erhöhtes Unfallrisiko bei Nässe – Versuch einer Quantifizierung. In: Straßenverkehrstechnik, 1981, H. 6, S. 188-194.
- [11] HORNE, W.B. (1968): Tire Hydroplaning and Its Effects on Tire Traction. In: Highway Research Record No. 214, Transportation Research Board, Washington, D.C., S. 24-33.
- [12] LEHNERT, D. (1975): Rechnerische Ermittlung der Wasserfilmdicke auf Straßen bei Regen. In: Straßen- und Tiefbau, 29, 1975, H. 1, S.12-15.
- [13] RESSEL, W.; HERRMANN, S.R. (2006A): Aquaplaning und Wasserfilmdicken – Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen dreistreifiger Richtungsfahrbahnen; Berechnung der Wasserfilmdicke. FE 05.126/2001/AGB. Schlussbericht, Bundesanstalt für das Straßenwesen (BASt), Bergisch-Gladbach.

- [14] SCHULZE, K.-H. (1977): Kraftschluß neuester Reifentypen bei nassen Fahrbahnoberflächen und hohen Geschwindigkeiten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 228; Herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg.
- [15] HEINIJOKI, HEIKKI (1993): Influence of the type and condition of tires and drivers' perceptions of road conditions on driving speed. Helsinki 1993. Finnra reports 19/1994, 99 p + appendix 60 p. ISSN 0788-3722, ISBN 951-47-9098-7, TIEL 3200229.
- [16] SAASTAMOINEN, KIMMO (1993): Effect of road conditions on driving behavior and properties of traffic flow. Helsinki 1993. Finnra reports 80/1993. ISSN 0788-3722, ISBN 951-47-8139-2, TIEL 3200204.
- [17] ALPPIVUORI, KARI & al. (1994): Friction tires and studded tires in different circumstances. Helsinki 1994. Finnra 68/1994. TIEL 4000098.
- [18] NORRMAN J. (2000): Slipperiness on roads – an expert system classification. Meteorological applications, 7 (1), 27 – 36, 2000
- [19] STEFFEN R. HERRMANN (2008): SIMULATIONSMODELL ZUM WASSERABFLUSS- UND AQUAPLANING-VERHALTEN AUF FAHRBAHN-OBERFLÄCHEN, (Dissertation) Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Ressel, Februar 2008
- [20] MARKUS FACH (1999): Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn, (Dissertation), Fachbereich Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt, 1999
- [21] HARTZ, WEBER (2009): Geschwindigkeit auf Autobahnen bei starkem Regen, Straße und Autobahn, eingereicht zur Veröffentlichung 2009
- [22] FGSV, AK Nässeerfassung in SBA, (2002): Merkblatt für die Nässeerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA), FGSV Verlag
- [23] KLOTZ, (2002): Besonderheiten des Verkehrs auf Autobahnen unter winterlichen Bedingungen, Dissertation, TU Darmstadt, 2002
- [24] Runway Surface Condition (RSC) and CFRI Equivalent, Canadian Transport, <http://www.tc.gc.ca/civilaviation/commerce/operationalstandards/crfi/table4.htm>
- [25] RASMUSSEN R. et.al., (1998): Theoretical Considerations in the Estimation of Snowfall Rate Using Visibility, The National Center for Atmospheric Research, Colorado
- [26] NING WU, (2000): Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm – Ein neues Modell und seine Anwendungen, Straßenverkehrstechnik, Heft 8, 2000
- [27] BRILON W., GEISTEFELDT J., (2007): Überprüfung der Kapazitätswerte und q-v-Diagramme des HBS 2001 für Autobahnabschnitte außerhalb Knotenpunkte, Schlussbericht Juni 2008, FE 21.0049/2007 BAST

-
- [28] FGSV (2001a): FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN (FGSV) Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) Köln 2001, Ausgabe 2005
- [29] PISZCEK, BAST_V5P, ARBEITSKREIS 3.2.1 (2010): Umfelddatenerfassung in Streckenbeeinflussungsanlagen (SBA), Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Strecken-beeinflussungs-anlagen, 2010
- [30] COST TU0702 (2010), Real-time monitoring, surveillance and control of road networks under adverse weather conditions, Les collections de l'INRETS – Ref.: R283, Dec. 2010
- [31] SCHEDLER Karl E. (1998): Verifikation der Wasserfilmhöhen durch die Niederschlagsintensität; Wasserfilmhöhen Modell, Spezifikation Umfelddatenstationen VBA A1 Bremen, micKS MSR GmbH, 1998
- [32] RAHJA JAKKO (2008): Road Safety – Road Maintenance Strategies. Finish Road Assosiation, Winter Road Congress 2008, Turku, Finland
- [33] WOLKE Konsortium (2012): Wetterabhängige Kalibrierung von Verkehrsmodellen für eine optimierte Verkehrssteuerung. 1. Meilensteinbericht Forschungsprojekt WOLKE
- [34] BASt (2012): Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, Ausgabe 2012,
- [35] VAN AERDE, M. A SINGLE REGIME SPEED-FLOW-DENSITY RELATIONSHIP FOR FREEWAYS AND ARTERIALS. IN PROC., 74TH ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES, WASHINGTON, D.C., 1995.
- [36] Kirschfink H., Poschmann M., Zobel D. und Schedler K.E., Stauprävention auf BAB im Winter, Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen, Berichte der BASt Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 215, Juni 2012
- [37] Sammer et.al.: Verkehrswegeplanung und Umwelt. (LV.Nr. 856103) - Strassenverkehrstechnik 14, Institut f. Verkehrswesen, Feb. 2008, Universität f. Bodenkultur, Wien.
- [38] Hippel M., et.al.: A statistical forecast model for road surface friction. SIRWEC 15th International Road Weather Conference 2010, Quebec City, Canada Feb. 2010

11 Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1: | Einfluss des Wetters auf den Verkehrszustand und Ziele von Wolke ... | 8 |
| Abbildung 2: | Datenfluss auf der VIB S3 Wetterplattform..... | 16 |
| Abbildung 3: | Abbildung des Straßenwetterzustands auf den Verkehrsfluss in der Wetterplattform..... | 17 |
| Abbildung 4: | Demonstrationsgebiet auf deutscher Seite (Quelle: Google Maps) | 19 |
| Abbildung 5: | Struktur der Messdatenbank..... | 21 |
| Abbildung 6: | Projektnetz des Untersuchungsgebiets mit verorteten Dauerzählstellen, Umfelddatenerfassung und Anzeigequerschnitten der SBA... | 22 |
| Abbildung 7: | Projektnetz des Untersuchungsgebiets mit TMC-Locations, Kameramessquerschnitten und synoptischen Wetterstationen | 23 |
| Abbildung 8: | Grobe Übersicht über das Zielgebiet in Bayern und die Standorte der Datenquellen (▲ = Straßenwetter; ● = synoptische Wetterstation)..... | 24 |
| Abbildung 9: | Sättigung und Gefriertemperatur bei Taumittellösung | 28 |
| Abbildung 10: | UV Kamera Bild Verteilung von Taumittel auf der Straße | 29 |
| Abbildung 11: | Modellstruktur der Fahrbahnzustandsklassierung..... | 48 |
| Abbildung 12: | Darstellung Wasserfilmdicke und der mittleren Textur-Rautiefe..... | 49 |
| Abbildung 13: | Modellstruktur für die Schätzung der Wasserfilmdicke..... | 49 |
| Abbildung 14: | Phasen des Oberflächenabflusses. Quelle: [13] | 50 |
| Abbildung 15 | Übersicht Komponenten der Modellierung und Kennzeichnung der Ziele der Analyse des lokalen Verkehrsgeschehens..... | 51 |
| Abbildung 16: | Ganglinie mittlere Geschwindigkeiten versus Sichtweite (A8, Q61 20./21.11.2010). Alle Zeitangaben in UTC | 53 |
| Abbildung 17: | Ganglinien Schneefallintensität, Geschwindigkeit und Verkehrsfluss eines Schneeglätteereignisses am 26.11.2010 A8, Q61 km 33,39. Alle Zeitangaben in UTC..... | 54 |
| Abbildung 18: | Ganglinien für mittl. Geschwindigkeit, Niederschlagsintensität und Schneelayer auf der Fahrbahn. A8, Q62, 20...21.01.2011 06:00...06:00 | 55 |
| Abbildung 19: | Kenndaten und Lage des Querschnitts Q231 A8..... | 59 |
| Abbildung 20: | Kenndaten und Lage des Querschnitts Q62, A8 km 35,37 | 59 |
| Abbildung 21: | Kenndaten und Lage des Querschnittes Q82 A8..... | 60 |
| Abbildung 22: | Diagramm Häufigkeitsverteilung und Verteilungsfunktion der PKW Geschwindigkeit bei absolut guter Witterung an Q62 A8. Auswertung im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012, 147619 Messintervalle. | 66 |
| Abbildung 23: | Darstellung Verkehrsflussmodell n. Ning Wu im k-v-Diagramm (Quelle: [26]) | 68 |
| Abbildung 24: | Diagramm mittl. PKW Geschwindigkeiten in Abhängigkeit zur Sichtweite mit drei Clustern (Wetterklasse =1 und >1, sowie bei hoher Verkehrsdichte >8 Fz/km) | 72 |
| Abbildung 25 | Abhängigkeit der mittl. PKW Geschwindigkeiten von der Niederschlagsintensität bei Regen und Schneefall an Q231 A8. Intervalle von 15 min im Zeitraum 01.01.2008 – 14.09.2011..... | 73 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 26 Abhängigkeit der mittl. PKW Geschwindigkeiten von den mittl. Wasserfilmdicken im 15 min Intervall, getrennt nach $WK \leq 4$ und $WK \geq 5$. An Q231 A8 im Zeitraum 01.01.2008 bis 14.09.2011. Gekennzeichneter Bereich $FBT \leq -2^{\circ}\text{C}$ | 74 |
| Abbildung 27 Mittlere freie PKW Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke von 15 min Intervallen. Am Querschnitt Q83 A8 bei flüssiger Bedeckung. Beste Trendlinie logarithmisch. | 75 |
| Abbildung 28 wie Abbildung 27 jedoch bei Schneebedeckung..... | 75 |
| Abbildung 29 Verteilung der mittleren freien Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Tageszeit und bei guter Witterung ($WK1$) an Q62 A8. Im Zeitraum 01.01.2008 bis 14.09.2011 | 76 |
| Abbildung 30 wie Abbildung 29 bei Q231 A8 im gleichen Zeitraum. | 77 |
| Abbildung 31 Verteilung der mittleren Nettozeitlücken (15min Intervall) nach Wettergruppen und pro Fahrstreifen am Beispiel Q231 A8 mit 2 FS, im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012. | 78 |
| Abbildung 32 Verteilung und Verteilungsfunktion der mittleren PKW Geschwindigkeiten im 15 min Intervall, getrennt nach drei Wetterklassen-Gruppen an Q231 A8 im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012. 85% Perzentil als Kennwerte für die freien Geschwindigkeiten..... | 79 |
| Abbildung 33 Wie Abbildung 32 an Q83 A8. | 79 |
| Abbildung 34 Verteilung und Verteilungsfunktion der mittleren PKW Geschwindigkeiten im 15 min Intervall, getrennt nach den Wetterklassen an Q231 A8 im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012. | 80 |
| Abbildung 35 Schätzung der Modellparameter nach Ning Wu im v-k-Diagramm. Am Querschnitt Q62 A8 bei Wetterklasse 1. Eingblendete Linien gleicher Verkehrsstärke zum Abgleich. | 81 |
| Abbildung 36 Fundamentaldiagramm nach dem Van Aerde Modell. Parameter geschätzt aus 15min Verkehrs- und Straßenwetter-Daten am Q231 A8. Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012. Die Parameter des Van Aerde Modells c_1 bis c_3 | 83 |
| Abbildung 37 wie Abbildung 36 für Querschnitt Q62 A8..... | 83 |
| Abbildung 38 wie Abbildung 36 für Querschnitt Q83 A8..... | 84 |
| Abbildung 39 Darstellung des vereinfachten (2-Phasen) Fundamental-Modells am v-k-Diagramm. FBZ = Fahrbahnzustand oder Wetterklasse. Andere Größen siehe Text | 86 |
| Abbildung 40 Modellvorhersagen für den Kraftschlussbeiwert bei gemessenen Fahrbahnzuständen im realen Straßenbetrieb. Messung der Fahrbahnbedeckung mit optischer Spektralanalyse. | 90 |
| Abbildung 41 Vergleich Modelvorhersage mit Grip-Tester RT3 (CFME) tatsächlich beobachteten Kraftschlussbeiwerten auf der E18 in Schweden im Zeitraum Januar/Februar 2013. | 90 |
| Abbildung 42 Sichtweite (5% Kontrastschwelle) in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität (Wassergehalt) für Regen und Schnee. Logarithmischer Maßstab. | 92 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 43 Darstellung der gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der geschätzten Wasserfilmdicke bei Nässe und im Vergleich die Vorhersagen des Modells. Ein weiterer Vergleich zeigt die Aquaplaning-Geschwindigkeit nach [13] und nach [36]. Zeitraum 1.1.2008 bis 30.3.2012..... | 93 |
| Abbildung 44 Darstellung der gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten in Abhängigkeit von der geschätzten Wasserfilmdicke bei (teilweiser) Schnee- oder Eisbedeckung und im Vergleich die Vorhersagen des Modells. Zeitraum 1.1.2008 bis 30.3.2012..... | 94 |
| Abbildung 45 Struktur des Testsystems auf der Basis der VIB S3 Wetterplattform | 95 |
| Abbildung 46 Darstellung der GFS Global-Vorhersage..... | 97 |
| Abbildung 47 Geographische Referenzierung der GFS Vorhersage zu den Nachfrageregionen | 98 |
| Abbildung 48 Auswahl der Parameter des GFS Modells für die Nachfrage Wetterklassen..... | 100 |
| Abbildung 49 Geographische Referenzierung des GFS Vorhersagemodells zu den Streckenabschnitten | 101 |
| Abbildung 50 Auswahl der GFS Vorhersagewerte für die Straßenwetterklassen für das lokale Verkehrsgeschehen..... | 102 |
| Abbildung 51 Häufigkeitsverteilung der im 6h Intervall prognostizierten Straßenwetterklasse im Vergleich mit den aus den tatsächlich gemessenen Straßenwetterdaten abgeleiteten Straßenwetterklassen im gleichen 6h Intervall. | 104 |
| Abbildung 52 Statistik nach Straßenwetterklassen, der im Durchschnitt gemessenen Geschwindigkeiten (rote IST-Kurve) im Vergleich mit dem simulierten kontinuierlichen Modell nach Kapitel 5.1.2 (blaue Linie) und den im Vorfeld vorläufig für den Testbetrieb zu jeder Wetterklasse festgelegten freien Geschwindigkeit (grüne Linie). Es wurden nur Geschwindigkeiten (im 15 min Intervall) bei geringer Verkehrsdichte (<8 Fz/km) für den Vergleich herangezogen..... | 105 |
| Abbildung 53: Häufigkeit der Straßenwetterklassen. Q062 A8, 15min Datensätze im Zeitraum 01.12.12 bis 28.04.13. | 106 |
| Abbildung 54: 15 min Datensätze im Geschwindigkeits-/Verkehrsdichte-Diagramm getrennt nach den Straßenwetterklasse-Gruppen. Q062 A8 01.12.12 – 28.04.13 | 107 |
| Abbildung 55: Reisezeitfehler bei drei verschiedenen Modellszenarien in Fällen, in denen signifikantes Wetter (Klasse >1) vorhanden war. MW=Mittelwert Reisezeit..... | 108 |
| Abbildung 56: Trenddiagramm Auszug Testphase Vergleich tatsächlicher Verlauf der mittl. PKW Geschwindigkeiten (grüne Kurve) im Vergleich mit unkalibriertem Verkehrsmodell (rot), fest zugeordnete Geschwindigkeiten nach Straßenwetterklasse (gelb) und dem dynamischen, kontinuierlichen Geschwindigkeitsmodell (blau). | 110 |

12 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Kurzüberblick über angewendete Technologien und Methoden | 11 |
| Tabelle 2: Liste der Standorte der archivierten WQ Messstationen und deren Datentypen (nähere Erläuterungen im Text) | 25 |
| Tabelle 3 Liste der für WOLKE ausgewählten synoptischen Wetterstationen und die dazugehörigen Datentypen. | 26 |
| Tabelle 4 Liste der für WOLKE benötigten Datentypen bzw. Messgrößen von Umfelddatenstationen auf der Autobahn..... | 27 |
| Tabelle 5 Codierung der gemeldeten Fahrbahnzustände FBZ..... | 31 |
| Tabelle 6: Liste der Codierung des Datentyps NS..... | 32 |
| Tabelle 7 Zuordnungstabelle für die Konvertierung NA zu NS | 33 |
| Tabelle 8 Liste der für WOLKE benötigten Datentypen der synoptischen Wetterstationen | 36 |
| Tabelle 9 Liste der Codenummern (enum) für Niederschlags- und Wettersituationen (nach „ww“ gem. WMO)..... | 39 |
| Tabelle 10: Statistik der Wetterdaten | 41 |
| Tabelle 11 Liste der Ausfälle einer Station in Stunden und Prozent von der Sollzeit ... | 42 |
| Tabelle 12 Gemeldete Fahrbahnzustände pro Station | 43 |
| Tabelle 13 Nebelereignisse mit Sichtweiten unter 100m..... | 44 |
| Tabelle 14 Anzahl der erfassten Datensätze und Ausfallrate der synoptischen Wetterstationen | 45 |
| Tabelle 15 Ergebnis der Auswertung der Verfügbarkeit einzelner Sensorwerte bei synoptischen Wetterstationen | 45 |
| Tabelle 16 Häufigkeit von bestimmten Wetterzuständen der einzelnen Wetterstationen | 46 |
| Tabelle 17 Liste der lokalen Fahrbahnbezogenen Wetterzustandsklassen | 47 |
| Tabelle 18: WOLKE (lokale) Straßenwetterklassen, Tabelle der Kriterien..... | 57 |
| Tabelle 19 Liste der Zuordnung der Wetterklassen zu übergeordneten Gruppen..... | 58 |
| Tabelle 20: Liste der bei der Analyse verwendeten Datentypen..... | 61 |
| Tabelle 21: Zuordnung der Mindestwerte für Niederschlagsintensität (NI) zu den Niederschlagsarten (NS) | 62 |
| Tabelle 22: Zuordnung der Mindestwerte für WFD in mm zu gemeldeten Fahrbahnzuständen..... | 63 |
| Tabelle 23 Geschwindigkeiten des 50%- und 85%-Perzentils der Geschwindigkeitsverteilung den drei grundlegenden Wetterzuständen an drei verschiedenen Querschnitten auf der A8..... | 78 |
| Tabelle 24 Mittlere PKW Geschwindigkeiten (50%- und 85%-Perzentil) im 15min-Intervall in Abhängigkeit von den Wetterklassen an den A8 Querschnitten Q62, Q83 und Q231. Daten aus dem Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012..... | 80 |
| Tabelle 25 Parameter des Van Aerde Modells aus 15 min Verkehrsdaten am Q231 A8, getrennt nach lokalen Wetterklassen im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012... | 82 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 26 Parameter des Van Aerde Modells aus 15 min Verkehrsdaten am Q62 A8, getrennt nach lokalen Wetterklassen im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012... | 82 |
| Tabelle 27 Parameter des Van Aerde Modells aus 15 min Verkehrsdaten am Q83 A8, getrennt nach lokalen Wetterklassen im Zeitraum 01.01.2008 bis 30.03.2012... | 82 |
| Tabelle 28 Tabellenstruktur der Ausgabe für streckenbezogene Daten (LinkData) | 96 |
| Tabelle 29 Tabellenstruktur der Ausgabe für Verkehrsnachfragegebiete (AreaWeatherData)..... | 96 |
| Tabelle 30 Ausgewählte Referenzwetterstationen zu den Nachfrageregionen..... | 98 |
| Tabelle 31 Feinklassierung der Wettersituation | 99 |
| Tabelle 32 Erläuterung zu den Parametern der Feinklassierung..... | 99 |
| Tabelle 33 Wetterklassen für den Testbetrieb zur Verkehrsnachfrage | 99 |
| Tabelle 34 Kriterien für die Klassierung der Straßenwettersituation | 101 |
| Tabelle 35 Parameter für die Bildung der Straßenwetterklassen..... | 102 |
| Tabelle 36 Klassenparameter für die Prognosen. AvFreeSpeed = Mittlere freie Geschwindigkeit in km/h, CapacityRed = Reduktion der Kapazität in %, AvNetTG = Mittlere Nettozeitlücke in msec. | 103 |
| Tabelle 37: Testergebnisse der Vergleichsstudie der zwei Modellansätze und des Verkehrsmodells ohne Wetterberücksichtigung. Über die 15min Intervalle, in denen signifikantes Wetter geherrscht hat (Straßenwetterklasse >1)..... | 109 |
| Tabelle 38: Testergebnisse der Vergleichsstudie der zwei Modellansätze und des Verkehrsmodells ohne Wetterberücksichtigung. Über den gesamten Testzeitraum..... | 109 |