

Stauprävention auf BAB im Winter

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 215

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed to give a 3D effect. The logo is positioned in the bottom right corner of the page, partially overlapping a vertical white line that runs from the top to the bottom of the page.

Stauprävention auf BAB im Winter

von

Heribert Kirschfink
Michael Poschmann
Daniel Zobel

momatec GmbH
Aachen

Karl E. Schedler

KS-Consulting
Oberstdorf

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 215

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 04.210/2007/KRB:
Stauprävention durch Erfassung der „kritischen Verkehrsmenge“
auf Bundesautobahnen im Winter

Projektbetreuung

Horst Badelt

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-86918-245-2

Bergisch Gladbach, Juni 2012

Print  kompensiert
Id-Nr. 1220821
www.bvdm-online.de

Kurzfassung – Abstract

Stauprävention auf BAB im Winter

Als Ergebnis des Forschungsvorhabens wurde ein Simulationsverfahren für die Ermittlung von Streckenkapazitäten auf Bundesautobahnen (BAB) bei winterlichen Straßenzuständen erarbeitet. Der Berechnungsansatz wurde auf eine robuste Verfahrensweise ausgelegt, um die Auswirkungen von Ungenauigkeiten und Fehlern der Eingangsgrößen zu minimieren. Das Verfahren orientiert sich an den technischen Rahmenbedingungen wie z. B. den Eigenschaften der derzeit verfügbaren Daten der Wetterprognose und der Umfelddatenerfassung. Zugleich werden die Anforderungen an die Nutzung der Prognoseergebnisse berücksichtigt.

Ausgehend von einer Grundkapazität der Streckenabschnitte in Anlehnung an das Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) wurden Abschlagsfaktoren für die jeweils vorherrschende Witterungssituation ermittelt. Diese Witterungseigenschaften wurden zuvor anhand charakteristischer Eingangsgrößen zusammengefasst und als Wetterklassen definiert.

Das nachgeschaltete Prognoseverfahren ist als zweistufiger Ansatz mit einer Planungsprognose für die vorausschauende Disposition sowie einer Kurzfristdarstellung für die operative Durchführung des Verkehrsmanagements, des Straßenbetriebsdienstes und des Arbeitsstellenmanagements aufgebaut. Es basiert auf einem Warteschlangenmodell. Die Ergebnisse zeigen mögliche Stauereignisse auf und können als Entscheidungshilfe verwendet werden. Beide Komponenten setzen auf den gleichen grundsätzlichen Vorgehensweisen für die Prognose auf.

Es bleibt offensichtlich, dass die Güte der Wetterprognose für die korrekte Auswahl der Wetterklasse entscheidend ist. Die Zuverlässigkeit der nachfolgend aufgesetzten Prognose des Verkehrsablaufs korreliert daher unmittelbar mit der Qualität der Eingangsgröße Wetterprognose. Aus diesem Grund ist der Bereitstellung hochwertiger und kleinräumiger Wetterprognosen für den Straßenbetriebsdienst die erforderliche Aufmerksamkeit zu widmen.

Die im Forschungsvorhaben entwickelte modelltechnische Abbildung der witterungsbedingten Kapazitätseinschränkung und ihrer Auswirkungen auf den Verkehrsablauf durch zwei Risikostufen in Form einer „Warnung“ und eines „Alarms“ hat sich in der Evaluierung bewährt. Dabei ist die betriebsnahe Interpretation der Prognoseergebnisse möglich. Das Verfahren mit den Vorhersagen des Verkehrszustands Eingangsgrößen beweist, dass sie als Auslösekriterien für Maßnahmen des Verkehrsmanagements genutzt werden können.

Prediction of Capacity of Road Sections under Hibernial Atmospheric Conditions

This research project aims for a prediction of capacity of road sections under hibernial atmospheric conditions. Hereby the focus is on motorways. The robustness of the method assures compensation of scattered input data, especially imperfection of weather forecast. Development and prototypical implementation of the concept were oriented to available data from weather forecast applications, environment and sensor data. At the same time, requirements of road operation and maintenance have been considered.

Parameters were identified by analysis of weather forecast data to classify any weather situation. Each grouping correlates with specific loss of capacity, which factor was extracted from analyses of traffic patterns.

It is obvious that the results of weather classification strongly rely on the quality of weather forecast. Therefore, further improvement and quality assurance of meteorological data is preferable. The capacity loss is used as an input parameter for a congestion prediction model, which is based on queuing theory. The significant statistical spread of loss parameters has lead to an approach which accounts for those effects. The prediction therefore gives two levels of output: a congestion warning and a congestion alarm.

The suggested concept was implemented within a demonstration application and used for evaluation

during winter halfyears in 2009 and 2010. Using this prediction concept as a part of a comprehensive Winter Maintenance Management Systems, sustainable improvement of traffic flow and maintenance even under hibernal weather conditions seems to be possible.

Inhalt

1	Einführung	7	4.4.2	Wetterklassen	47
1.1	Problemstellung	7	4.4.3	Ermittlung der Kapazitäts- minderungsfaktoren	48
1.2	Gesamtziel	7	4.4.4	Überarbeitete Wetterklassen	50
1.3	Methodik des Vorgehens	9	4.4.5	Fallbeispiele	53
2	Kapazität bei winterlichen Verkehrsverhältnissen	11	5	Praktische Erprobung des gewählten Konzepts	59
2.1	Stand der Technik	11	5.1	Konzeption und Umsetzung der Pilotphasen	59
2.1.1	Kapazität der Strecke	11	5.2	Ziele der Pilotphase 1	60
3	Verfahrensentwicklung zur Kapazitätsschätzung	12	5.3	Ziele der Pilotphase 2	61
3.1	Betriebliche Einbettung	12	5.4	Voraussetzungen für die Umsetzung der Pilotphasen	61
3.1.1	Mittelfristprognose	12	5.4.1	Organisatorische Voraussetzungen für die Umsetzung der Pilotphasen	61
3.1.2	Kurzfristprognose	14	5.4.2	Technische Voraussetzungen für die Umsetzung der Pilotphase	62
3.2	Verwendete Datenarten	15	5.5	Implementierung des Pilotbetriebs	62
3.2.1	Statische Eingangsdaten	15	5.5.1	Web-Darstellung der Prognose- Ergebnisse	62
3.2.2	Dynamische Eingangsdaten	16	5.5.2	Baustelleneingabe	66
3.3	Komponenten der Prognose	17	5.6	Durchführung und Ergebnisse des Pilotbetriebs Phase 1	67
3.3.1	Klassifikation der Wettersituation	17	5.7	Durchführung und Ergebnisse des Pilotbetriebs Phase 2	68
3.3.2	Prognose des Staurisikos	22	5.7.1	Analyse der DWD-Prognose	70
3.3.3	Nutzung der Prognoseergebnisse	23	5.7.2	Analyse der Stauprognose	72
4	Modellbildung	24	5.7.3	Analyse der Verkehrsnachfrage bei wetterbedingten Sonder- ereignissen	74
4.1	Vorgehensweise	24	5.7.4	Analyse des Winterdienstes	75
4.2	Datenanalyse	25	6	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen	76
4.2.1	Identifikation von Fallbeispielen	25	6.1	Prognosemodell	76
4.2.2	Analyse des Verkehrsflusses in Abhängigkeit der Fahrbahnzu- stände im k-v-Diagramm	29	6.2	Betriebliche Einbettung	78
4.2.3	Schwerlastverkehr	32	6.3	Fazit	78
4.3	Modellansatz	33	7	Literatur	79
4.3.1	Die Modellgrößen	33			
4.3.2	Modelle für die freie Geschwindigkeit	39			
4.4	Wetterklassen und deren Kapazitäten für den Pilotbetrieb	44			
4.4.1	Einfacher Modellansatz für die Kapazität	44			

Abkürzungsverzeichnis

AK	Arbeitskreis
BAB	Bundesautobahnen
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
CEN	Europäisches Komitee für Normung
DIN	Deutsche Industrie-Norm
DWD	Deutscher Wetterdienst
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
HTML	Hypertext Markup Language
IT	Informationstechnologie
LOS	Level of Service
MARZ	Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen
NRW	Nordrhein-Westfalen
OKSTRA	Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen
PDF	Portable Document Format
QS	Qualitätssicherung
RAA	Richtlinien für die Anlage von Autobahnen
SWE	Softwareeinheit
SWIS	Straßenwetter-Informationssystem
TC	Technisches Komitee (in der CEN)
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
UZ	Unterzentrale
VRZ	Verkehrsrechnerzentrale
VT	Verkehrstechnik
XML	Extensible Markup Language

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Der vorliegende Schlussbericht des Forschungsprojekts FE 04.0210/2007/KRB „Stauprävention auf BAB im Winter“ dokumentiert den Stand der Arbeiten und die Entwicklung des Prognoseverfahrens einschließlich der softwaretechnischen Umsetzung in Form eines Feldversuchs-Prototypen mit Stand Juli 2010.

Auch bei winterlichen Fahrbahnverhältnissen besteht das gemeinsame Ziel des Verkehrsmanagements und des Winterdienstes darin, den Verkehrsfluss aufrechtzuerhalten. Insbesondere an die Verfügbarkeit des Autobahnnetzes werden aufgrund der großen zu bewältigenden Verkehrsmengen hohe Anforderungen gestellt. Verschiedene Forschungsprojekte haben die Optimierung des Winterdienstes auf Bundesautobahnen zum Thema, so z. B. FE 03.343/2001/HGB „Optimierung des Winterdienstes auf hochbelasteten Autobahnen“ und FE 03.414/2006/HRB „Bewältigung großer Verkehrsmengen auf Bundesautobahnen im Winter“.

Ausschlaggebend für das Erreichen des Ziels der Aufrechterhaltung des Verkehrsflusses ist neben der angemessenen Ausstattung des Straßenbetriebsdienstes, der optimalen Organisation des Winterdienstes sowie einer zeitlich-räumlich differenzierten Witterungsprognose die exakte Kenntnis der Kapazität der Strecken und des Netzes. Diese Information über die Verfügbarkeit und die kapazitätsbezogenen Eigenschaften der Straßeninfrastruktur stellt die Grundlage für geeignete Verkehrsmanagementmaßnahmen unter definierten winterlichen Verkehrsbedingungen dar.

Das vorliegende Forschungsvorhaben hat zur Aufgabe, das Risiko von überlastungsbedingten Verkehrsstörungen unter winterlichen Witterungseinflüssen zu prognostizieren. Dabei sollen die verkehrlichen Rahmenbedingungen wie die theoretisch erreichbare Kapazität verschiedener Straßenquerschnitte, planbare Ereignisse als Störstellen im Verkehrsraum wie z. B. Arbeitsstellen im Kontext verschiedener winterlicher Fahrbahnzustände wie beispielsweise Nässe, Schneefall, Schneematsch, Helligkeit berücksichtigt werden. Die Prognosen sollen ferner Schwankungen der Verkehrsnachfrage sowie unterschiedliche Verkehrskollektive – abgeleitet aus geeigneten Parametern wie z. B. dem Schwerverkehrsanteil – berücksichtigen.

Für die Stauprognosen ist ein ausreichender zeitlicher Vorlauf vorzusehen, um eine vorausschauende Einsatzplanung des Winterdienstes und damit geeignete Maßnahmen zur Vermeidung von Verkehrsstörungen zu ermöglichen. Zu diesem Zweck sind aufbauend auf der Prognose Warnhinweise zu generieren, die bereits vor dem Auslösen eines Winterdiensteinsatzes den Grad des witterungsbedingten Störungseinflusses beschreiben. Diese Aufgabe soll durch den Einsatz einer praxisnahen Simulation abgedeckt werden, welche auf der Auswertung historischer und aktueller Erfassungsdaten basiert.

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit sollen dazu beitragen, die nachteiligen Auswirkungen von Verkehrsbehinderungen wie Unfällen oder Staus aufgrund von winterlichen Witterungsverhältnissen für den Gesamtverkehr zu vermeiden oder zumindest nachhaltig zu verringern. Dadurch kann die Mobilität auch bei hohen Verkehrsbelastungen gewährleistet werden, sodass der aus der winterlichen Witterung resultierende verkehrsbezogene gesamtwirtschaftliche Schaden minimiert wird. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen des Weiteren dazu dienen, geeignete Verkehrsmanagementmaßnahmen, die in den Verkehrsfluss eingreifen, bereits im Vorfeld zu planen und rechtzeitig auszulösen. Hierzu gehört auch die Aufgabe, die Notwendigkeit dieser Maßnahmen nachvollziehbar zu ermitteln und belastbar zu dokumentieren.

1.2 Gesamtziel

Die Optimierung der organisatorischen Abläufe des Straßenwinterdienstes und des Verkehrsmanagements hat zum Ziel, zum einen die Einschränkungen für die Verkehrsteilnehmer und zum anderen die Behinderung der Winterdiensteinsätze durch Verkehrsteilnehmer durch frühzeitige Planung und geeignete Wahl der Ausführungsvariante auf ein möglichst geringes Maß zu reduzieren. Gleichzeitig muss die Verkehrssicherheit gewährleistet bleiben, dabei soll ein betriebswirtschaftlich optimaler Ablauf der Durchführung des Winterdienstes erreicht werden.

Dies erfordert eine Optimierung in unterschiedlichen Dimensionen, zu denen jeweils zahlreiche Aspekte den Stand der Wissenschaft und Technik definieren.

Technische Optimierung

Die Streckeninfrastruktur wird durch verschiedene Maßnahmen optimiert, wie

- Nutzung von Glättemeldealanlagen; diese sind auf Bundesautobahnen im durchschnittlichen Abstand von ca. 25 km verfügbar. Für die Datenübertragung wird eine TLS-konforme Architektur verwendet,
- Nutzung von visueller Überwachung des Straßenzustandes durch infrarotempfindliche Kameras (Standbild oder Bewegtbild),
- Einsatz von Taumittelsprühanlagen; diese werden überwiegend auf Brücken und teilweise auf abschüssigen Strecken im Autobahnbereich eingesetzt. Dazu sind die „Hinweise für Planung, Bau und Betrieb von Taumittel-Sprühanlagen“ (FGSV) zu beachten.

Die Optimierung der Fahrzeuginfrastruktur für den Straßenwinterdienst ist ein weiterer wesentlicher Faktor, zu dem laufende Forschungen, Erfahrungen, Richtlinien und Vorgaben bestehen. Beispielfhaft sind in diesem Zusammenhang zu nennen:

- technisch optimierte Feuchtsalzmischung sowie TL Streu (FGSV), Erfassung und Einstellung der Streumengen (g/m^2), mobile Erfassung der Fahrbahnoberflächentemperatur durch Infrarotsensoren und davon abgeleitete Empfehlung der Streumengeneinstellung,
- GPS-gestützte Bordcomputer im Winterdienstfahrzeug mit Off-line- oder On-line-Erfassung aller relevanten Betriebsdaten,
- FGSV 416 E: Praktische Hinweise für die Einsatzleitung im Winterdienst (Stand: Juni 2009),
- FGSV 416 F: Praktische Hinweise zum Räumen und Streuen für das Fahrpersonal im Winterdienst (Stand: Juni 2009),
- technische Normung von „Maschinen für Straßenbetriebsdienst“ CEN/TC337 Subcommittee.

Die Datenerfassung hat in den letzten Jahren im für den Winterdienst relevanten Einsatzumfeld wesentliche Fortschritte erzielt. Dies beinhaltet die optimale Warnung und Reaktion auf kritische Winterwetter-Situationen durch die klassischen Instrumente Lenken, Leiten, Steuern, Informieren. Hinzu kommen neuere Ergebnisse aus der Fahrzeugentwicklung „XFCD“ und die aktuellen Forschungspro-

gramme aus der Fahrzeug-Zentrale Kommunikation. Insbesondere existieren Erfahrungen, Produkte, Richtlinien und Vorgaben zur Umfelddatenerfassung:

- Niederschlagsdetektoren, nach Niederschlagsart und -Intensität nach kapazitiv-, optisch- und microwellen-basierten Verfahren,
- optische „Present Weather“-Messgeräte zur kombinierten Erfassung von Sichtweiten und Niederschlag mit hoch differenzierter Niederschlagsartenerkennung nach Infrarot-(Vorwärts-) Streulicht und Transmissions-Messverfahren,
- Sichtweitenmessgeräte nach Rückwärts-Streulicht-Verfahren zur Erfassung der Sichtweite,
- atmosphärische Sensoren zur Messung der Lufttemperatur, der relativen Feuchte und der Taupunkttemperatur,
- mechanische oder elektroakustische Messgeräte zur Erfassung der Windrichtung und -geschwindigkeit im Straßenbereich,
- bildgebende Scanner-Messgeräte mit kohärentem Laserlicht zur berührungslosen Detektion des Fahrbahnzustandes (in der Erprobung),
- Sensoren zum Einbau in die Fahrbahn zur Erkennung des Fahrbahnzustandes und der Wasserfilmhöhe nach elektrischen oder elektromagnetischen Messverfahren (Leitwert, Polarisierungseffekte, optische Lichtbrechung oder Mikrowellen-Radar),
- Messaufnehmer zur Erfassung der Fahrbahnoberflächentemperatur und der Bodentiefentemperatur (meist durch Widerstandsmessung von Aufnehmer mit positivem oder negativem Temperaturkoeffizient) – auch in Kombination mit den Fahrbahn-Einbausensoren,
- Sensoren zur Detektion der Taumittelkonzentration und der Gefriertemperatur mit passiven Messverfahren (elektrischem Leitwert) oder mit aktiven Messverfahren durch Kühlung und Aufheizung und Ermittlung des Enthalpiesprungs,
- Winterdienstausrüstung – Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme – Teil 1: Allgemeine Definitionen und Komponenten; Deutsche Fassung EN 15518-1:2011; Teil 2: Straßenwetter – Empfohlene Beobachtung und Vordersage; Teil 3: Anforderungen an gemessene

Werte der stationären Anlagen, Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen (FGSV-Nr. 306, 2010).

Ein weiterer wesentlicher technischer Aspekt ist die kleinräumige Wetterprognose. Dazu sind zu beachten:

- Modelle zur Glättewarnung im Straßenbetriebsdienst (BASt),
- detaillierte Straßengebietswetterprognosen des DWD, bezogen auf ca. 180 Klimagebiete und Höhenstufen in der BRD,
- Niederschlagsradar-Prognose mit zeitlicher Auflösung von 2 bis 3h und räumlicher Auflösung von 2 km x 2 km über die gesamte BRD,
- verbesserte Höhenauswertung von Niederschlagsradar- und Radar-Reflexionsdaten durch „Downscaling“-Verfahren privater Wetterdienste,
- auf Messstellendaten bezogene Kurzzeitprognosen (bis 3h) durch adaptive, selbstoptimierende dynamische Modelle basierend auf statistischen Parameterschätzverfahren (Methode der kleinsten Fehlerquadrate),
- auf Messstellen und geografische Punkte bezogene Prognosen (bis 24h) durch MOS- bzw. Multi-Model-MOS- (Model Output Statistic-)Verfahren,
- Verbesserung streckenbezogener Straßenzustandsprognosen durch „Thermal Mapping“-Verfahren (= thermische Kartierung von Betreuungsstrecken bei verschiedenen Wettersituationen).

Organisatorische Optimierung

Neben technischen Instrumenten bedarf es organisatorischer Maßnahmen zur Vermeidung witterungsbedingter Verkehrsstörungen im Winter, welche aus Forschungen, Erfahrungen und Richtlinien abgeleitet werden können:

- Erfolgreiche Strategien zur Einsatzplanung: rechtzeitiges Streuen, Vermeidung von Einsätzen in Zeiten mit Verkehrsnachfrage-Spitzen. Technische Ausstattung, Maßnahmen, Planung, Vorbereitung, Information über Wetterentwicklung und Einsatzablauf, zu finden im „Merkblatt für Winterdienst, Ausgabe 2010 (FGSV 416).

- Einsatzplanung und -steuerung des Winterdienstes durch Winterdienstzentralen – „Arbeitspapier Aufbau und Betrieb von Winterdienstzentralen“ (FGSV 412).

- Erfolgreiche Strategien des Verkehrsmanagements wie die Koordination mit (planbaren) Ereignissen, insbesondere Arbeitsstellen sowie das strategische länderübergreifende Umlenkungsmanagement.

1.3 Methodik des Vorgehens

Das Projekt wurde in vier wesentlichen Phasen durchgeführt.

Schritt 1: Literaturstudie

Zur wissenschaftlichen Absicherung des Vorhabens wurde zum Projektbeginn eine Literaturstudie durchgeführt. Darin wird der Stand der Technik bei der Prognose der Kapazität von Streckenabschnitten auf BAB und des Verkehrsflusses bei winterlichen Witterungsverhältnissen untersucht. Hierbei sind auch die Aspekte Arbeitsstellen sowie Ereignismanagement berücksichtigt. Die Literaturrecherche bezieht vorrangig die aktuellen Erkenntnisse aus Deutschland ein, bewertet aber die grundlegenden Entwicklungen im europäischen und außereuropäischen Kontext. Dies wird abgesichert durch weitgehende Erfahrungen aus Projekten des Forschungsnehmers vor allem in Deutschland, Österreich und in der Schweiz.

Die Untersuchung umfasst insbesondere die unter „Stand der Wissenschaft und Technik“ behandelten Aspekte, wobei jeweils organisatorische, verfahrenstechnische und informationstechnische Rahmenbedingungen betrachtet werden. Schwerpunkte der Recherche sind die eingesetzten Prognoseverfahren, der Einfluss winterlicher Witterung auf die Kapazität und Verkehrsabwicklung einschließlich der Bewertung der Genauigkeit der Vorhersagen sowie Vorgaben und Regelwerke für den Straßenbetriebsdienst im Winter. Des Weiteren werden Rahmenbedingungen für die Planung und Durchführung von Arbeitsstellen untersucht und hierzu insbesondere Vorgaben aufgrund winterlicher Witterung wie z. B. die Nutzung heller Tagesstunden, anzuwendende Bauverfahren in frostgefährdetem Umfeld oder witterungs- oder verkehrsablaufbedingte Räumung von Arbeitsstellen betrachtet. Die Literaturstudie berücksichtigt neben dem Stand der

Wissenschaft und Technik auch die Trends, die sich aus aktuellen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben abzeichnen.

Schritt 2: Entwicklung eines Simulationsverfahrens für Streckenkapazitäten bei winterlichen Straßenzuständen

Im Rahmen der Entwicklung eines Simulationsverfahrens für Streckenkapazitäten bei winterlichen Straßenzuständen wurden zunächst umfassende Datenanalysen zur Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Streckenkapazitäten bzw. Verkehrszuständen und witterungsbedingten Straßenzuständen durchgeführt.

Zu diesem Zwecke wurden verfügbare Daten über Wetterzustand (Niederschlag, Sichtweite, Wind), Fahrbahnoberflächenparameter (Nässe bzw. Wasserfilmdicke, Bedeckungsart, Taumittelkonzentration, Temperatur) sowie Verkehrsdaten (Verkehrsstärken, Geschwindigkeiten) von ausgewählten Strecken bzw. Querschnitten systemanalytisch untersucht. Daraus wurden praxisnahe Modelle zur Beschreibung des Zusammenhangs des Verkehrsverhaltens und des Witterungszustands entwickelt. Ebenso wurde die Signifikanz der Wetterprognosen direkt bezogen auf die Streckenabschnitte quantitativ und zeitlich bestimmt. Als Ergebnis wurden streckenbezogene Kapazitäten verschiedener BAB-Querschnitte unter winterlichen Bedingungen abgeleitet.

Darauf sowie auf die Literaturstudie aufbauend wurde ein Simulationsverfahren für die Ermittlung von Streckenkapazitäten auf BAB bei winterlichen Straßenzuständen erarbeitet. Hierbei werden neben den organisatorischen Abläufen auch die technischen Hilfsmittel und Verfahren spezifiziert. Die Prognoseverfahren sind auf den Erfahrungen aus zahlreichen Projekten mit Bezug zur Ermittlung von Streckenkapazitäten sowie dem Arbeitsstellen- und Ereignismanagement aufgesetzt. Eingeflossen sind Erfahrungen in der Entwicklung und Anwendung von Straßenwetter-Informationssystemen sowie den datenbasierten Verfahren zur Straßenwetterprognose. Insbesondere sind Verfahren in der Entwicklung und Erprobung, mit denen Daten aus zeitlich und räumlich unterschiedlichen Quellen (z. B. Straßenwetter- und Umfelddatenstationen, Niederschlagsradar, Thermal Mapping, xFCD) auf kürzere Streckenabschnitte bezogen bzw. abgebildet werden können

und somit Aussagen über den witterungsbedingten Belagszustand einer kompletten Route ermöglicht werden.

Das Simulationsverfahren wird als zweistufiger Ansatz realisiert. Eine Komponente dient der Planungsprognose für die vorausschauende Disposition des Straßenwinterdienstes und des Arbeitsstellenmanagements. Sie wird vorrangig als Entscheidungshilfe für das Verkehrsmanagement und zur Disposition des Straßenwinterdienstes verwendet und mit einem zeitlichen Vorlauf von mehreren Stunden bis zu einem Tag genutzt. Die zweite Komponente dient der operativen Durchführung und Optimierung des Verkehrsmanagements und des Straßenwinterdienstes und beinhaltet Funktionalitäten zur Detektorauswertung für die winterbezogene Ereigniserkennung und zur Kurzfristprognose. Beide Komponenten setzen auf den gleichen grundsätzlichen Vorgehensweisen für die Prognose auf.

Schritt 3: Evaluierung der Praxistauglichkeit

In einem nachfolgenden Schritt wurde die praktische Umsetzung der Vorgaben und Empfehlungen mit Hilfe der entwickelten Software in einem begrenzten Testfeld erprobt. Zu diesem Zweck erfolgte die Umsetzung in ausgewählten Bundesländern während zweier Winterhalbjahren in 2008/2009 und 2009/2010 über einen Zeitraum von insgesamt ca. 10 Monaten.

Für die praktische Umsetzung des Prognoseverfahrens wurde eine prototypische Implementierung durchgeführt. Diese stand in Form einer webbasierten Applikation für die Feldversuchsteilnehmer bereit. Auf diese Weise ist es möglich, neben der Überprüfung der Vorhersageergebnisse auf Korrektheit bereits in einem frühen Stadium betriebliche Rahmenbedingungen und Anforderungen an den Einsatz eines derartigen Tools zu erfassen und in die Entwicklung einfließen zu lassen.

Es war vorgesehen, gegebenenfalls zusätzlich auf bereits in einzelnen Bundesländern vorhandene Infrastruktur für das Management von Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer sowie von Incidents zurückzugreifen. Unterstützend wurde die Evaluierung begleitet durch eine intensive Abstimmung und den Erfahrungsaustausch mit den Betreibern und dem Betreuerkreis.

Schritt 4: Zusammenstellung von Empfehlungen zum Vermeiden kritischer Belastungszustände

Um die Ergebnisse der Analysen und Verfahrensdefinitionen aus den vorangegangenen Arbeitsschritten im Betrieb nutzen zu können, wurden Handlungsempfehlungen erarbeitet, aus denen die erforderlichen Umsetzungsschritte erkennbar sind, die durch die einzelnen Beteiligten erbracht werden müssen. Als Ergebnis dieses Arbeitsschritts wird ein Leitbild für die Stauprävention durch die Erfassung der kritischen Verkehrsmenge auf Bundesautobahnen im Winter zusammengestellt. Dazu werden Empfehlungen zur technischen und organisatorischen Umsetzung erarbeitet. Dabei werden die sich aus diesem Lösungsansatz ergebenden betrieblichen Rahmenbedingungen und Anforderungen aufbereitet.

Eine intensive Abstimmung mit dem Betreuerkreis sowie die Übernahme der gewonnenen betrieblichen Erfahrungen aus dem Evaluierungsschritt gewährleisten einen praxisgerechten, ergebnisorientierten und akzeptanzfähigen Ansatz.

2 Kapazität bei winterlichen Verkehrsverhältnissen

2.1 Stand der Technik

Nachfolgend wird der Stand der Technik bei der Abschätzung von Kapazitätswerten für Streckenabschnitte auf Bundesautobahnen beschrieben. Die Darstellung beschränkt sich auf die in der praktischen Anwendung für das Verkehrsmanagement gebräuchlichen Ansätze.

2.1.1 Kapazität der Strecke

Für die Abschätzung der Kapazität von Streckenabschnitten ist zu unterscheiden zwischen unbeflussten Streckenkapazitäten, d. h. erreichbaren Werten ohne den Einfluss von Einschränkungen des Verkehrsraums aufgrund von Arbeitsstellen sowie die Auswirkungen von Witterungsereignissen, sowie den erreichbaren Kapazitäten in Streckenabschnitten mit Arbeitsstellen und den kapazitätsmindernden Einflüssen von Witterungsereignissen wie z. B. winterlichen Straßenverhältnissen.

2.1.1.1 Abschätzung der Kapazität der freien Strecke

Die Abschätzung der Kapazität der freien Strecke erfolgt in der Regel aufbauend auf Verfahren und Kenngrößen, die im „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen“ [HBS 2005] definiert sind. Für einen zweistreifigen Querschnitt mit reinem Pkw-Verkehr außerhalb von Ballungsgebieten wird dort ein Kapazitätswert von 3.600 Kfz/h angegeben. Der entsprechende Wert für einen dreistreifigen Querschnitt lautet 5.400 Kfz/h. Die Abschätzung gilt bis zu einer Längsneigung der Strecke von 2 %. Für größere Werte der Längsneigung sowie höhere Schwerverkehrsanteile am Fahrzeugkollektiv werden geringere Kapazitäten ermittelt.

Innerhalb von Ballungsgebieten werden nach HBS höhere Kapazitätswerte ausgewiesen. Zum Teil werden sogar über längere Zeiträume deutlich über den durch die HBS genannten Werten liegende Kapazitäten erreicht, ohne dass Störungen des Verkehrsablaufs eintreten.

Festzuhalten ist, dass die Festlegung von maximal erreichbaren Werten für die Kapazität sowie die maximal erreichbare Verkehrsdichte und die mittlere Geschwindigkeit eine Unschärfe aufweist. Dies liegt darin begründet, dass der exakte Verlauf des Fundamentaldiagramms im Übergang zum instabilen Verkehrsfluss unbekannt ist. Sowohl theoretische Überlegungen als auch Auswertungen von gemessenen Verkehrsdaten zeigen, dass die Kapazität von unterschiedlichen Einflussgrößen abhängig ist. Sie kann auch unter gleichbleibenden Umfeldbedingungen variieren [BRILON et al., 2005; BRILON, 2003].

Der Eintritt der Dunkelheit führt nicht in jedem Fall zu einer Verringerung der Kapazität. Jedoch ist festzuhalten, dass bei nassen Fahrbahnverhältnissen die Kapazität in der Größenordnung von ca. 11 % geringer sein kann verglichen mit den Kapazitätswerten bei trockener Fahrbahn [BRILON et al.; PONZLET, 2005].

Neben den Kapazitäten der freien Strecke, die den Ablauf im fließenden Verkehr modellieren, sind Werte für die Kapazitäten aus dem Stau heraus herzuleiten. Die „Capacity Drop“ genannte Verringerung der Streckenkapazität bei Stauereignissen auf bis zu drei Viertel der ursprünglichen Kapazität stellt einen nennenswerten Effekt dar, den es bei der Prognose der verkehrlichen Auswirkungen zu berücksichtigen gilt.

2.1.1.2 Abschätzung der Kapazität in Arbeitsstellenbereichen

Arbeitsstellen auf Autobahnen beeinträchtigen durch die Veränderungen der Verkehrsführung oder Sperrung von Fahrstreifen die Kapazität der betroffenen Streckenabschnitte. Als Folge können Störungen des Verkehrsablaufs unerwünschte Reisezeitverlängerungen verursachen. Die verkehrliche Optimierung von Baustellen hat zum Ziel, diese Behinderungen der Verkehrsteilnehmer durch geeignete Wahl der Planungsparameter auf ein möglichst geringes Maß zu reduzieren. Gleichzeitig soll jedoch ein betriebswirtschaftlich optimaler Ablauf der Arbeiten erreicht werden.

Für die Bestimmung der maßgeblichen Kapazität im Bereich der Arbeitsstellen ist eine Vielzahl beschreibender Faktoren zu berücksichtigen. Dies sind Streckeneigenschaften wie

- Fahrstreifenanzahl,
- Seitenstreifenmitnutzung,
- Verschwenkungen,
- Lage und Anordnung von Fahrstreifeneinziehungen und daraus resultierende Auswirkungen auf den Verkehrsfluss,
- Längsneigung des Streckenabschnitts.

Hinzu kommen Witterungseinflüsse, z. B. Beeinträchtigungen durch Regen, Nebel, Schnee und Eis sowie Lichtverhältnisse. Weitere Faktoren wie der Schwerverkehrsanteil, das anzutreffende Fahrerkollektiv oder Ablenkung der Fahrzeugführer durch erhöhte Arbeitsaktivität in den Baustellen führen ebenfalls zu einer Verringerung der Kapazität.

Zum Teil können diese Einflussgrößen für eine Abschätzung der verfügbaren Kapazität aus den örtlichen und kalendarischen Rahmendaten abgeleitet werden. Der genaue Kontext wird jedoch erst durch die Erfassung der Umfeldeinflüsse der Engstelle vollständig abgebildet. Diese werden im Regelfall bei der Planung der Arbeitsstelle durch den Baustellenverantwortlichen abgeschätzt und bewertet. Weiterführende Erkenntnisse zu den beeinflussenden Faktoren lassen sich darüber hinaus aus der Massendatenanalyse gewinnen. Dadurch können mit den arbeitsstellenbeschreibenden Faktoren korrelierende Abschlagsgrößen auf die Kennwerte für die Kapazität der freien Strecke bestimmt werden. In [BECKMANN, 2000; OBER-SUNDERMAIER,

2003] sind unter Bezug auf reale Arbeitsstellen und in der Praxis angewendete Verkehrsführungen entsprechende Werte der Kapazitäten zusammengestellt. Wie für die Kennwerte der Kapazität der freien Strecke gilt auch hier, dass die Forschungsergebnisse unterschiedliche, teilweise weit streuende Angaben aufweisen. Es bleibt daher festzuhalten, dass auch die Kapazität im Arbeitsstellenbereich innerhalb einer Bandbreite variiert.

Der Schwerlastverkehr weist im Vergleich zum Pkw-Verkehr deutlich abweichende Fahrcharakteristika auf, deren Ausprägung durch topografische Merkmale wie Steigungen noch verstärkt wird. Um die schwerverkehrsbedingten Einflüsse auf den Verkehrsablauf zu berücksichtigen, hat es sich als sinnvoll herausgestellt, die Kapazität analog zur freien Strecke auch in Arbeitsstellenbereichen in Abhängigkeit des Schwerverkehrsanteils und der maßgeblichen Streckenlängsneigung zu modifizieren.

2.1.1.3 Einfluss winterlicher Verkehrsverhältnisse auf die Kapazität

Insbesondere Fahrbahnzustände bei lang andauernden und starken Schneefällen verursachen erhebliche Rückgänge der Kapazität und beeinflussen den Verkehrsablauf in negativer Weise [CYPRA, 2007]. In der vorgenannten Untersuchung werden Abschätzungen für die Größenordnung der Kapazitätsrückgänge durchgeführt. Der Autor kommt jedoch zu dem Ergebnis, dass aufgrund der geringen Anzahl der ausgewerteten Stauereignisse eine wissenschaftlich belastbare Aussage noch nicht möglich sei. Er verweist zudem auf den erforderlichen Abgleich mit weiteren beeinflussenden Parametern wie der Streckenlängsneigung, der Fahrstreifenanzahl sowie dem Schwerverkehrsanteil.

In der vorgenannten Untersuchung werden folgende Abschlüsse der Streckenkapazität abgeleitet:

- 10 bis 20 % Rückgang der Kapazität bei leichten Schneefällen, welche nicht zu einer durchgehend mit Schnee bedeckten Fahrbahn führen; der Winterdienstesatz erfolgt im Wesentlichen durch Streueinsätze,
- 30 bis 40 % Rückgang der Kapazität bei kurzzeitigen starken Schneefällen, die weniger als eine halbe Stunde andauern; die Fahrbahn ist bei Räumeeinsätzen kurzzeitig schneebedeckt,

- mehr als 40 % Rückgang der Kapazität bei lang anhaltenden starken Schneefällen mit erheblicher Sichtweitereinschränkung; die Fahrbahn ist trotz permanenter Räumearbeiten verbreitet schneebedeckt.

Zur Validierung dieser grundlegenden Abschätzungen wurden im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens intensive Untersuchungen von verkehrsbezogenem Datenmaterial unter Berücksichtigung winterlicher Witterungssituationen durchgeführt. Dabei konnten die getroffenen Aussagen in der Tendenz bestätigt werden.

3 Verfahrensentwicklung zur Kapazitätsschätzung

3.1 Betriebliche Einbettung

Nachfolgend wird das im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelte Prognoseverfahren zur Kapazitätsschätzung beschrieben. Dabei werden die Gesichtspunkte der betrieblichen Einbettung und Nutzung des Ansatzes und der für die Vorhersage verwendeten Daten beschrieben. Im Anschluss an den Überblick werden die Bausteine, aus denen das Verfahren aufgebaut ist, im Detail vorgestellt.

Das Simulationsverfahren wird als zweistufiger Ansatz realisiert. Eine Komponente dient der Planungsprognose für die vorausschauende Disposition des Straßenwinterdienstes. Sie wird vorrangig

als Entscheidungshilfe zur Disposition des Straßenwinterdienstes und für Zwecke des Verkehrsmanagements verwendet und mit einem zeitlichen Vorlauf von mehreren Stunden bis zu einem Tag genutzt. Die zweite Komponente dient neben der Durchführung und Optimierung des Straßenwinterdienstes insbesondere dem operativen Verkehrsmanagement und beinhaltet Funktionalitäten zur Detektorauswertung für die winterbezogene Ereigniserkennung und zur Kurzfristprognose. Beide Komponenten setzen auf den gleichen grundsätzlichen Vorgehensweisen für die Prognose auf.

3.1.1 Mittelfristprognose

Die in Bild 3-1 dargestellte Planungsprognose verwendet als Eingangsgrößen die Straßenwetterprognose, die eine Vorhersage der zu erwartenden Umfelddaten wie z. B. Nässe, Schneefall, Schneematsch, geschlossene Schneedecke oder Vereisung bereitstellt. Hinzu kommen Informationen über geplante Ereignisse und Störstellen im Netz, insbesondere Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer. Diese beinhalten zusätzliche Angaben zur ereignisbezogenen Streckenkapazität, z. B. aufgrund von nicht oder nur eingeschränkt nutzbaren Fahrstreifen. Somit ist die nachfolgende Ermittlung der Beeinträchtigung des Verkehrs durch planbare Störstellen unter verschiedenen winterlichen Fahrbahnzuständen möglich. Das Prognoseverfahren basiert auf der statistischen Auswertung von Verkehrsmengenwerten und Geschwindigkeitswerten in Kapazitäts-Grenzbereichen, wobei diese

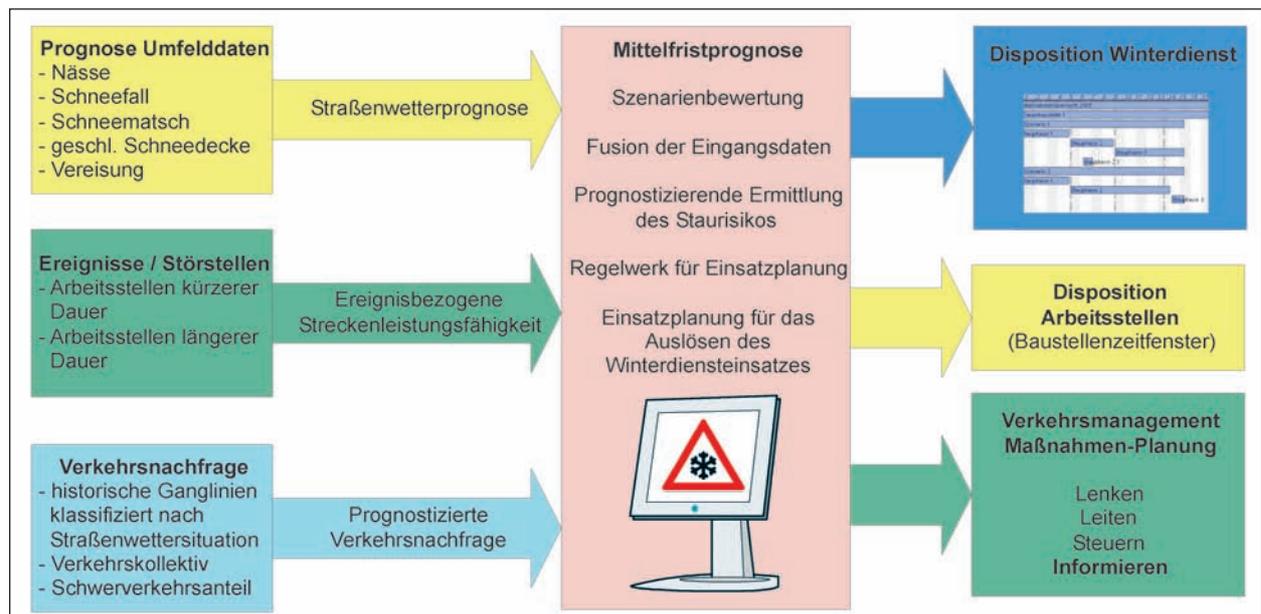


Bild 3-1: Mittelfristige Planungsprognose

Auswertungen räumlich, zeitlich und kontextbezogen differenziert werden. Daher sind als weitere Eingangsdaten statistisch bewertete Informationen zur erwarteten Verkehrsnachfrage auf den einzelnen Streckenabschnitten in Form von historischen Fraktil- bzw. Mittelwert-Ganglinien hinterlegt, welche durch Datenanalysen nach unterschiedlichen Straßenwettersituationen klassifiziert werden. Die statistisch bewertete Auswirkung der Straßenwettersituationen auf die Kapazitäten wird so in statistisch repräsentativen Grundgesamtheiten analysiert und für die Planungsprognose hinterlegt. In der anschließenden Mittelfristprognose werden die genannten Eingangsdaten fusioniert und eine Szenarienbewertung durchgeführt. Als Ergebnis steht eine prognostizierende Ermittlung des Staurisikos und der zu erwartenden Restkapazitäten zur Verfügung. Auf der Grundlage einer nachgeschalteten regelwerksbasierten Auswertung kann in Abhängigkeit der ermittelten Risikostufe von zu erwartenden witterungsbedingten Verkehrsstörungen eine gestufte Einsatzplanung für die Auslösung und Durchführung von Winterdiensteseinsätzen und Verkehrsmanagementmaßnahmen erfolgen. Für die Software-Funktionalitäten der Planungsprognose werden interaktive Mensch-Maschine-Schnittstellen für eine komfortable und performante Nutzung durch die Winterdienst-Disponenten und die verkehrlichen Operatoren bereitgestellt.

Somit werden die Ergebnisse der Planungsprognose für die Prozesse der Disposition des Winter-

dienstes zur Verfügung gestellt. Im Falle voraussehbarer witterungsbedingter Störungen im Verkehrsablauf empfiehlt es sich zudem, diese Informationen den Baustellenverantwortlichen für die Disposition von Arbeitsstellen zur Verfügung zu stellen, um ggf. eine Adaption der Arbeitsstellenplanung vorzunehmen. Ein weiterer Abnehmer für die Ergebnisse der Planungsprognose ist das Verkehrsmanagement, das die ermittelten Informationen bereits im Vorfeld für die Aufgaben des Lenkens, Leitens und Steuerns nutzen und entsprechende Informationen für die Verkehrsteilnehmer aufbereiten kann.

3.1.2 Kurzfristprognose

Der zweite Funktionskreis ist in Bild 3-2 dargestellt und zeigt die erforderlichen Bausteine für eine winterwitterungsbezogene Ereigniserkennung und Kurzfristprognose. Der Berechnungsansatz für die Kurzfristprognose setzt auf dem gleichen Verfahrensmodell auf wie die Mittelfristprognose. Er verwendet jedoch aufgrund des abweichenden Prognose-Horizonts andere Eingangsdaten.

Für die Situationserkennung werden Umfelddaten ausgewertet, die das aktuelle Straßenwetter einschließlich einer Prognose für die nächsten Stunden umfassen. Auch in diesem Funktionskreis werden Informationen über geplante Ereignisse und Störstellen im Netz und deren Einfluss auf die Streckenkapazität ausgewertet, insbesondere be-



Bild 3-2: Kurzfristige Planungsprognose

züglich Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer. Ferner werden Messdaten zur aktuellen Verkehrsnachfrage auf den einzelnen Streckenabschnitten sowie kontextbezogene historische Ganglinien genutzt.

Die Situationserkennung stellt eine klassifizierte, d. h. mit Hilfe einer Metrik bewertete Einstufung der aktuellen Verkehrssituation unter Einbeziehung der winterlichen Witterungseffekte einschließlich einer Prognose des Staurisikos über einen kürzeren Zeitraum für die kommende Stunde, bereit. Im Ablauf schließt sich eine Komponente für das Winter-Ereignismanagement an. Diese beinhaltet ein Regelwerk, um auf der Basis der Situationseinstufung Winterdienstesätze auszulösen und Maßnahmen für Modifikationen des geplanten Winterdienst-Ablaufs sowie Prioritäten für die operative Disposition vorzuschlagen. Somit steht den Winterdienstverantwortlichen ein umfassendes Werkzeug für die Entscheidungsunterstützung im operativen Betrieb zur Verfügung. Als weitere Ausgaben stehen Informationen zur Disposition von Arbeitsstellen (z. B. Verschiebung, Unterbrechung oder Abbruch von Maßnahmen) zur Verfügung. Die Ergebnisse der Kurzfristprognose können des Weiteren für Aufgaben des operativen Verkehrsmanagements genutzt werden.

3.2 Verwendete Datenarten

In den nachfolgenden Kapiteln sind die für die Prognose erforderlichen Eingangsdaten zusammengestellt. Dabei erfolgt die Unterscheidung zwischen statischen Eingangsdaten, die zur Versorgung des Prognosemodells mit Grunddaten erforderlich sind, und den dynamisch generierten bzw. aktualisierten Informationen, welche die jeweilige Witterungssituation und deren Prognose sowie den Verkehrsablauf in den Netzabschnitten der Bundesautobahnen beschreiben.

3.2.1 Statische Eingangsdaten

Als statische Eingangsdaten werden diejenigen Größen bezeichnet, welche im Rahmen der Erstellung der Grunddatenversorgung einmalig aufbereitet und im Prognosemodell hinterlegt werden. Die Datenpflege kann in der Folge zyklisch erfolgen; alternativ können die statischen Eingangsdaten bei Veränderung aktualisiert werden. Kennzeichnend sind in diesem Fall Aktualisierungszyklen, die beispielsweise in der Größenordnung von Quartalen liegen.

3.2.1.1 Netzmodell

Das Netzmodell erfordert die Festlegung einer Abschnittsdefinition für die Strecken der Bundesautobahnen, für welche eine Kapazitätsprognose unter winterlichen Witterungsbedingungen berechnet werden soll. Hierzu kommt ein Location-Code-basiertes Netzmodell zur Anwendung. Die hinterlegten Angaben der Location Code List (LCL) bilden in hinreichender Auflösung die Eigenschaften der einzelnen Streckenabschnitte ab. Dieses Bezugsmodell ermöglicht ferner die einfache Abbildung weiterer Eingangsdaten wie Verkehrswarndienstmeldungen oder baustellenbezogener Informationen, die im Regelfall ebenfalls unter Referenzierung auf die LCL zur Verfügung gestellt werden.

Für die Netzabschnitte sind die jeweils vorhandenen Fahrstreifenzahlen hinterlegt. Dabei ist die baulich vorgegebene Fahrstreifenzahl in den Datenbestand versorgt. Änderungen, die sich temporär zum Beispiel aufgrund von geänderten Verkehrsführungen in Arbeitsstellen längerer oder kürzerer Dauer oder Seitenstreifenfreigaben ergeben, werden gesondert berücksichtigt und als dynamische Eingangsdaten eingepflegt.

3.2.1.2 Verkehrsstärke-Ganglinien

Zur Modellierung der Verkehrsnachfrage werden abschnittsbezogene Verkehrsstärke-Ganglinien verwendet. Diese können beispielsweise aus Daten der Verkehrserfassung abgeleitet werden. In hochbelasteten Abschnitten des Bundesautobahnnetzes sind die erforderlichen Daten im Regelfall verfügbar und können durch Verkehrsrechnerzentralen bereitgestellt werden.

Alternativ ist die Verwendung typisierter Ganglinien möglich, welche durch die Berücksichtigung von abschnittsbezogenen DTV-Werten eine örtlich und zeitlich differenzierte Abbildung der Verkehrsnachfrage erlauben.

Die Verkehrsstärke-Ganglinien sollten eine Unterscheidung nach Wochentagen aufweisen und ggf. auch Sondersituationen wie Brückentage, Ferien- und Urlaubszeiten berücksichtigen.

Die Differenzierung zwischen Werten für Pkw und Lkw durch getrennte Gangliniendaten ist sinnvoll. Alternativ können Angaben zu den Schwerverkehrsanteilen, ggf. unter Angabe des Zeitbezugs, berücksichtigt werden.

3.2.1.3 Verkehrlicher Ereigniskalender

In den hinterlegten Grunddaten erlaubt ein verkehrlicher Ereigniskalender die korrekte Zuordnung zwischen dem für den Prognosezeitraum relevanten verkehrlichen Kontext und der jeweils anzuwendenden Verkehrsstärke-Ganglinie. Der verkehrliche Ereigniskalender kann dabei auch Differenzierungen aufgrund von planbaren Sondersituationen wie z. B. Messeereignissen oder Sportgroßveranstaltungen beinhalten, sofern sich hieraus ein Einfluss auf die Entwicklung der Verkehrsnachfrage bzw. der Grundannahmen für die Kapazität im Netz ergibt.

3.2.1.4 Kapazität der Streckenabschnitte

Durch die Multiplikation der im Netzmodell hinterlegten abschnittsbezogenen Fahrstreifenzahl mit einer Grundannahme für die Kapazität eines einzelnen Fahrstreifens kann die Gesamtkapazität der einzelnen Streckenabschnitte abgeschätzt werden.

Beim Ausgangsparameter für die Kapazität eines einzelnen Fahrstreifens handelt es sich um einen einheitlich für das gesamte Netz vorgegebenen Parameterwert. Dieser kann jedoch optional individuell für jeden Netzabschnitt aufgrund regionaler Besonderheiten angepasst werden, sofern entsprechende Werte vorliegen. In vielen Fällen sind die hierfür erforderlichen Daten jedoch nicht in der erforderlichen abschnittsbezogenen Auflösung vorhanden, sodass der einheitliche Parameterwert genutzt werden muss.

3.2.2 Dynamische Eingangsdaten

Als dynamische Eingangsdaten werden diejenigen Größen bezeichnet, die zyklisch für die Berechnungen des Prognosemodells zur Verfügung gestellt werden, wie z. B. Witterungsdaten, Wetterprognosen oder gemessene bzw. berechnete Verkehrsqualitätsstufen im Netz. Ferner gehören zu den dynamischen Eingangsdaten auch die ereignisbezogenen Informationen und Meldungen, die im Regelfall eine zeitlich begrenzte Gültigkeit aufweisen. Beispiele hierfür sind Meldungen des Verkehrswarndienstes oder Baustellenmeldungen.

3.2.2.1 Wetterprognose des DWD

Bei den straßenbezogenen Wetterprognosen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) handelt es sich

um die Vorhersage der Witterung mit einem Vor-schauzeitraum von sechs Stunden. Verfügbar sind die Daten mit einer stundenscharfen Auflösung der Einzelprognosen. Die Wetterprognosen werden vom DWD auf die Standorte von Glätteldealanlagen (GMA) referenziert und liegen in stündlicher Aktualisierung vor. Die verfügbaren Prognosedaten umfassen

- die Zielzeit der Vorhersage,
- die Lufttemperatur,
- die Taupunkttemperatur,
- die Temperatur des Fahrbahnbelags für den Bereich von Hauptstrecken,
- Angaben zum Straßenzustand für den Bereich von Hauptstrecken,
- die voraussichtliche Niederschlagsmenge sowie
- den klassifizierten Niederschlagstyp.

Die Wetterprognosen sind in standardisierter Form als ASCII-Dateien verfügbar und werden direkt vom DWD bereitgestellt.

3.2.2.2 SWIS Glättewarnmodell

Das Glättewarnmodell stellt einen Bestandteil des Straßenwetterinformationssystems (SWIS) dar. Eine modelltechnische Aufbereitung stellt eine Abschätzung der Glättegefahr in sechs Glättewarnstufen zur Verfügung:

- Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag möglich,
- Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag sowie Reifglätte möglich,
- Eisglätte möglich,
- Glättegefahr bei Wetteränderung möglich,
- Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag sofort möglich,
- Schneeglätte oder Glatteis bei Niederschlag sofort sowie Reifglätte möglich.

Nach Auswertungen in [BAST, 2003] werden Vorwarnzeiten für den Straßenwinterdienst erreicht, die im Regelfall größer als 90 min sind und somit einen hinreichenden Vorlauf für das Einleiten von operativen Winterdiensttätigkeiten ermöglichen.

Die Daten des Glättewarnmodells stehen zurzeit noch nicht in einer standardisierten Form zur Verfügung, die für die automatisierte Weiterverarbeitung in einem Prognosemodell für die Vorhersage der Kapazität von Streckenabschnitten geeignet ist.

3.2.2.3 Disposition Straßenwinterdienst

Die Disposition des Straßenwinterdienstes auf Bundesautobahnen erfolgt entsprechend der Organisation des Straßenwinterdienstes im Regelfall durch Winterdienstzentralen oder dezentral in Verantwortungsbereichen von Autobahnmeistereien. Die Entscheidungen werden zwar üblicherweise dokumentiert, stehen jedoch nicht in datentechnisch kodierter Form für die Verwendung im Rahmen von Kapazitätsprognosen zur Verfügung.

3.2.2.4 Arbeitsstellen

Grundlegende Angaben zu Arbeitsstellen werden in vielen Bundesländern im Rahmen von Baustellenmanagement- und Informationssystemen erfasst. Je nach Auslegung der Systeme stehen Informationen zu dem betroffenen Streckenabschnitt, den geplanten Zeiträumen für die Durchführung der Arbeitstätigkeiten und den verbleibenden Fahrstreifen zur Verfügung. In einigen Fällen werden daraus Angaben zur verbleibenden Kapazität der Streckenabschnitte abgeleitet.

Die entsprechenden Daten können prinzipiell für Kapazitätsprognosen des Straßenwinterdienstes zur Verfügung gestellt werden. Die hierfür erforderlichen Datenschnittstellen sind jedoch vielfach bislang noch nicht operativ eingerichtet und verfügbar.

3.2.2.5 Sonstige verkehrsbezogene Daten

Weitere verkehrsbezogene Daten können für die Modellbildung von Interesse sein, insbesondere im Rahmen von Prognosen über einen kurzen Zeithorizont. Zu nennen ist hier insbesondere die Auswertung von Meldungen des Verkehrswarndienstes. Entsprechende Daten werden durch die Landesmeldestellen der Polizei der Länder generiert und stehen datentechnisch kodiert unter Bezug auf die Streckenabschnitte zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um AlertC-Daten (Deutsches Meldungsmanagement) bzw. DATEX-kodierte Meldungsformate.

Die Meldungen des Verkehrswarndienstes umfassen zurzeit keine speziellen, auf winterliche Witterungsbedingungen bezogenen Meldungen. Sie können daher lediglich als ergänzende Informationen bei der Auswertung von witterungsbezogenen Daten herangezogen werden.

Die Daten des Glättewarnmodells stehen zurzeit noch nicht in einer standardisierten Form zur Verfügung, die für die automatisierte Weiterverarbeitung in einem Prognosemodell für die Vorhersage der Kapazität von Streckenabschnitten geeignet ist.

3.3 Komponenten der Prognose

Das Berechnungsverfahren besteht aus mehreren, in sich gekapselten Komponenten. Diese Einzelmodule können getrennt voneinander implementiert und optimiert werden. Sie erlauben zudem die flexible Anpassung an unterschiedliche Verfügbarkeit der Eingangsdaten.

Das Berechnungsverfahren setzt sich zusammen aus den Modulen für

- die Klassifikation der Wettersituation,
- die Zuordnung von Kapazitätswerten für die jeweilige Wettersituation,
- die Prognose des Risikos von Verkehrsstörungen,
- die Auswertung der Prognose und Ableitung von Handlungsempfehlungen.

Nachfolgend werden diese Module aufbauend auf den Ergebnissen der durchgeführten Datenanalysen in ihrer Funktion beschrieben.

3.3.1 Klassifikation der Wettersituation

Durch die Klassifikation der Wettersituation wird eine Zuordnung zwischen den Eingangsdaten, welche die aktuelle Witterung oder den prognostizierten Wetterzustand zu einem definierten Zeitpunkt beschreiben, und vorgegebenen Wetterklassen erreicht. Die Wetterklassen fassen jeweils spezifische Wettersituationen zusammen, denen bestimmte Eigenschaften und Auswirkungen auf den Verkehrsablauf zugewiesen sind. Sie aggregieren die Eingangsdaten und erlauben die Verwendung einer überschaubaren Anzahl von Prognose-Eingangsgrößen für die Bestimmung der Kapazität von Streckenabschnitten.

Abhängig von der Anzahl und Güte der Eingangsdaten können unterschiedlich viele Wetterklassen abgeleitet werden. Diese sollen eine hinreichend genaue Unterscheidung der einzelnen Witterungszustände erlauben, müssen dabei jedoch eine statistisch repräsentative Abdeckung durch gemessene Daten sicherstellen.

3.3.1.1 Ergebnisse der Datenanalysen

Zur Eingrenzung der relevanten Datenarten, der Bestimmung einer geeigneten Anzahl von Wetterklassen sowie zur Ableitung der Eigenschaften der einzelnen Wetterklassen wurden umfassende Datenanalysen durchgeführt.

Zu den Aufgabenstellungen der Datenanalyse gehörten folgende Fragestellungen:

- Welche Datenarten sind für die Witterungsprognose relevant?
- Welche Parameter sind in welcher Weise relevant, d. h., welche Gewichtungsfaktoren können abgeleitet werden?
- Wie können die Ergebnisse zu Wetterklassen aggregiert werden?
- Wie ist ein Wetterdatenmonitor aufzubauen, und welche Ausgaben können damit zur Verfügung gestellt werden?

Angaben zur Datenverfügbarkeit

Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein Datenbestand von Verkehrsdetektoren für das Bundesland Hessen ausgewertet. Zur Verfügung standen Verkehrsstärke- und Geschwindigkeits-Messdaten von 55 Detektoren, die sich auf 21 Standorte verteilten. Im Einzelnen waren dies:

- A 3 AS Idstein,
- A 3 Elzer Berg,
- A 4 AS Friedewald,
- A 45 AS Altenstadt,
- A 45 Gießen-Ost,
- A 45 östl. AK Gambach,
- A 45 Talbrücke Haiger,
- A 49 AS Borken,
- A 5 AS Heppenheim,
- A 5 nördl. AS Alsfeld Ost,
- A 5 südl. AS Heppenheim,
- A 648 AS Rebstock,
- A 66 AS WI-Biebrich,
- A 661 AS Friedberger Warte,
- A 67 südl. AK Darmstadt,

- A 67 südl. AS Gernsheim,
- A 671 AS Gustavsburg,
- A 7 AS Bad Hersfeld-West,
- A 7 AS Homberg-Efze,
- A 7 NWA Ostheimer Senke,
- A 7 Uttrichshausen.

Zur Verfügung standen Daten für q_{Kfz} , q_{Lkw} , v_{Pkw} , v_{Lkw} aus den Winterzeiträumen 2005/2006, 2006/2007 und 2007/2008. Berücksichtigt wurden jeweils Messdaten aus den Monaten November bis März.

Zur Beschreibung der Witterungssituation wurden Messdaten aus dem Straßenwetter-Informationssystem (SWIS) verwendet. Die verfügbaren Daten stammen aus 18 Standorten:

- A 45 Haigerbrücke,
- A 45 Talbrücke Langgöns,
- A 49 Kuhberg,
- A 66 Salzbachtalbr,
- A 67 AK Darmstadt,
- A 67 Gernsheim,
- A 648 Opelrondell,
- A 661 Seckbach,
- A 671 Hochheimer Brücke,
- A 3 Elzer Berg,
- A 3 Idstein,
- A 4 Friedewald,
- A 5 Heppenheim,
- A 5 Rimberg,
- A 7 Forsthausbrücke,
- A 7 Melsungen,
- A 7 Pommer,
- A 45 Altenstadt.

Die verfügbaren Informationen decken die gleichen Zeiträume ab wie die verkehrsbezogenen Messwerte.

In einem ersten Untersuchungsschritt wurden die Standorte der SWIS-Daten unter Beachtung der topografischen Verhältnisse den räumlich nächstgelegenen Detektorstandorten zugeordnet. Dabei

ergab sich ein maximaler Abstand zwischen dem Standort der Verkehrsdatenerfassung und dem SWIS-Standort von 10,3 km. Der durchschnittliche Abstand beträgt 2,7 km. Es sind 15 Standorte mit einem Abstand kleiner als 2,7 km vorhanden.

Die Daten aus dem SWIS decken folgende Parameter ab:

- Fahrbahnoberflächen-Temperatur,
- Gefrierpunkt-Temperatur,
- Restsalzgehalt,
- Fahrbahnzustand,
- Lufttemperatur,
- relative Luftfeuchte,
- Taupunkt-Temperatur,
- Windgeschwindigkeit, Mittelwert,
- Windrichtung,
- Windgeschwindigkeit, Spitzenwert,
- Niederschlagsart,
- Niederschlagsintensität,
- Wasserfilmdicke,
- Tiefentemperatur.

Vorgehen bei der Datenanalyse

Das Vorliegen von witterungsbedingten Stauereignissen wurde in den Fällen angenommen, wenn eine starke bzw. ansteigende Belastung der Strecke vorlag und sich nachfolgend ein Stauereignis, gekennzeichnet durch einen deutlichen Rückgang der gefahrenen Geschwindigkeiten, einstellte. Aus dem dabei beobachteten Rückgang der Verkehrsstärkewerte lässt sich auf kapazitätsbegrenzende Witterungssituationen schließen.

Es erfolgte die Auswertung der gefahrenen Geschwindigkeiten der Pkw als Maß für die Ableitung von verkehrlichen Einschränkungen aufgrund der Witterung, ohne dass die Kapazität der Strecke erreicht bzw. überschritten wurde.

Nachfolgend wurde die zum betreffenden Zeitpunkt gegebene Witterungssituation in die Analyse einbezogen. Auszuschließen waren Stauereignisse ohne direkten Zusammenhang mit winterlicher Witterung.

Ferner waren Situationen aus der Betrachtung herauszunehmen, bei denen Verkehrsstörungen

durch Sonderereignisse wie z. B. Havarien oder Unfälle ausgelöst wurden. Diese Datensätze konnten durch den Abgleich mit archivierten Verkehrswarndienstmeldungen ausgefiltert werden.

Bei der Auswahl der für die Ableitung der Wetterklassen zu verwendenden Eingangsgrößen wurde darauf geachtet, dass diese neben einer hinreichenden Aussagekraft auch im Betriebsalltag zur Verfügung gestellt werden können. Dies betrifft insbesondere die Prognose von witterungsbezogenen Daten durch den Deutschen Wetterdienst.

Ferner fand Anwender- und Expertenwissen Berücksichtigung bei der Auswahl, so z. B. aus Gesprächen mit Operatoren in der Winterdienstzentrale der Niederlassung Hamm des Landesbetriebs Straßen NRW. In diesen Gesprächen wurde die Einschätzung des Messwerts Restsalzgehalt als nicht zuverlässig genug und im derzeitigen Betrieb als nicht signifikant gewertet geäußert. Diese Experteneinschätzung deckt sich mit den im Rahmen der Datenanalysen gewonnenen Erkenntnissen.

3.3.1.2 Abgeleitete Wetterklassen

Die Witterungssituation wird in Form von acht Wetterklassen abgebildet. Diese sind in Bild 3-3 zusammengefasst. Der Lösungsraum wird im ersten Teil der Pilotphase durch die drei Eingangsgrößen

- Fahrbahnoberflächentemperatur,
- Fahrbahnzustand und
- Niederschlagsart

aufgespannt. Der Parameter Fahrbahnoberflächentemperatur wurde in einem ersten Modellierungsschritt zwischen Werten kleiner und gleich null Grad Celsius unterschieden. Für den Parameter Fahrbahnzustand erfolgt eine Differenzierung zwischen den Werten „trocken“ und „Fahrbahn ist feucht/nass bzw. schnee- oder eisbedeckt“. Die Niederschlagsart unterscheidet zwischen „kein Niederschlag“ und „Niederschlag aller Art“.

Die verwendeten Parameter erlauben eine grundsätzliche Abschätzung der verkehrlichen Auswirkungen und die Zuordnung von Kapazitätswerten. Eine Verfeinerung der Aussagekraft wurde nachfolgend durch die Hinzunahme von weiteren Eingangsparametern untersucht und in die Modellbildung integriert. Dabei muss jedoch die Verfügbarkeit dieser Daten in der praktischen Anwendung sichergestellt sein.

Wetterklassen									
		Wettersituation							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Fahrbahnoberflächen- temperatur	[°C]	<= 0	<= 0	<= 0	<= 0	> 0	> 0	> 0	> 0
Fahrbahnzustand	-	Fahrbahn ist feucht/nass, bzw. schnee- oder eisbedeckt	Fahrbahn ist feucht/nass, bzw. schnee- oder eisbedeckt	trocken	trocken	Fahrbahn ist feucht/nass, bzw. schnee- oder eisbedeckt	Fahrbahn ist feucht/nass, bzw. schnee- oder eisbedeckt	trocken	trocken
Niederschlagsart	-	Niederschlag aller Art	kein Niederschlag	Niederschlag aller Art	kein Niederschlag	Niederschlag aller Art	kein Niederschlag	Niederschlag aller Art	kein Niederschlag

Bild 3-3: Zusammenstellung der Wetterklassen der Pilotphase 1

Die transiente Wechselsituation von trockenem auf nassen Fahrbahnzustand erscheint von Interesse hinsichtlich der verkehrlichen Auswirkungen. Sie ist jedoch in den bislang vorliegenden Erfassungsdaten unterrepräsentiert, da es sich um einen nur vorübergehend anzutreffenden Zustand handelt. Somit konnten keine aussagekräftigen Kennwerte und quantifizierbaren Auswirkungen abgeleitet werden.

3.3.1.3 Abgeleitete Kapazitätswerte

Durch umfassende Untersuchungen der beigestellten Daten wurden Minderungs-Faktoren hergeleitet, d. h. Abschläge gegenüber der Kapazität der unbeeinflussten Strecke bei „normalen“ Witterungsverhältnissen. Diese werden durch den „Nullfall“, die Wetterklasse „8“ repräsentiert.

Es stellte sich im Verlauf der Untersuchungen heraus, dass es nicht möglich ist, den Witterungssituationen jeweils einen allgemeingültigen Kapazitätswert zuzuordnen. Vielmehr treten starke Streuungen sowohl der Kapazitätswerte als auch der gefahrenen Pkw-Geschwindigkeiten auch bei vergleichbaren winterlichen Witterungs- und Fahrbahnzuständen auf.

Bild 3-4 zeigt beispielhaft als Ergebnis einer Regressionsanalyse den deutlichen Anstieg der Streuung der gefahrenen Geschwindigkeiten, sobald winterliche Fahrbahnbedingungen mit Temperaturen kleiner als null Grad Celsius vorliegen. In dem Bild werden die gemessenen Pkw-Geschwindigkeiten der stationären Detektion A45/1EHS „Haigerbrücke“ über den gemessenen Fahrbahnoberflächentemperaturen der GMA „Haigerbrücke“ an der A 45 für den Zeitraum Dezember 2005 aufgetragen.

Unter diesen Rahmenbedingungen stellte es sich als sinnvoll heraus, eine Abbildung der Bandbreite

möglicher Kapazitätsreduktionen im Verfahrensansatz zu berücksichtigen.

Aus den beigestellten Daten der Glättemeldeanlage (GMA) und der stationären Verkehrserfassung wurden daher jeweils folgende drei Minderungs-Faktoren abgeschätzt: Zum einen wurde der maximal aufgetretene Kapazitätsabschlag w_{\max} in der jeweiligen Wetterklasse zur Berücksichtigung der ungünstigsten aufgetretenen Verkehrssituation („worst case“) ermittelt. Ferner wurde der arithmetische Mittelwert der Kapazitätsabschläge w_{mittel} für die jeweilige Wetterklasse berechnet. Des Weiteren wurde der minimal aufgetretene Kapazitätsabschlag w_{\min} aus den gemessenen Daten bestimmt.

Die Kapazitätsabschläge wurden jeweils aus einer Stichprobe aus den grafischen Darstellungen der Verkehrsstärken über der Zeitachse abgeschätzt. Ein Datenbeispiel zeigt Bild 3-5.

Für die nachfolgende Prognose des Staurisikos wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Berechnung einer Prognose für eine ungünstige Verkehrssituation durch Verwendung des Minderungs-Faktors w_{\max} ,
- Berechnung einer Prognose für eine Abschätzung der Verkehrssituation durch Verwendung des Minderungs-Faktors w_{standard} . Dieser ergibt sich aus dem arithmetischem Mittelwert der Kapazitätsabschläge w_{mittel} für diese Wetterklasse aus der betrachteten Stichprobe (vgl. Kapitel 3.3.1.3).

Diese beiden Minderungsfaktoren w_{\max} und w_{standard} werden für die Prognose des Staurisikos jedes Streckenabschnitts im Untersuchungsgebiet herangezogen. In Tabelle 3-1 sind diese beiden Abschlagsfaktoren für die acht betrachteten Wetter-

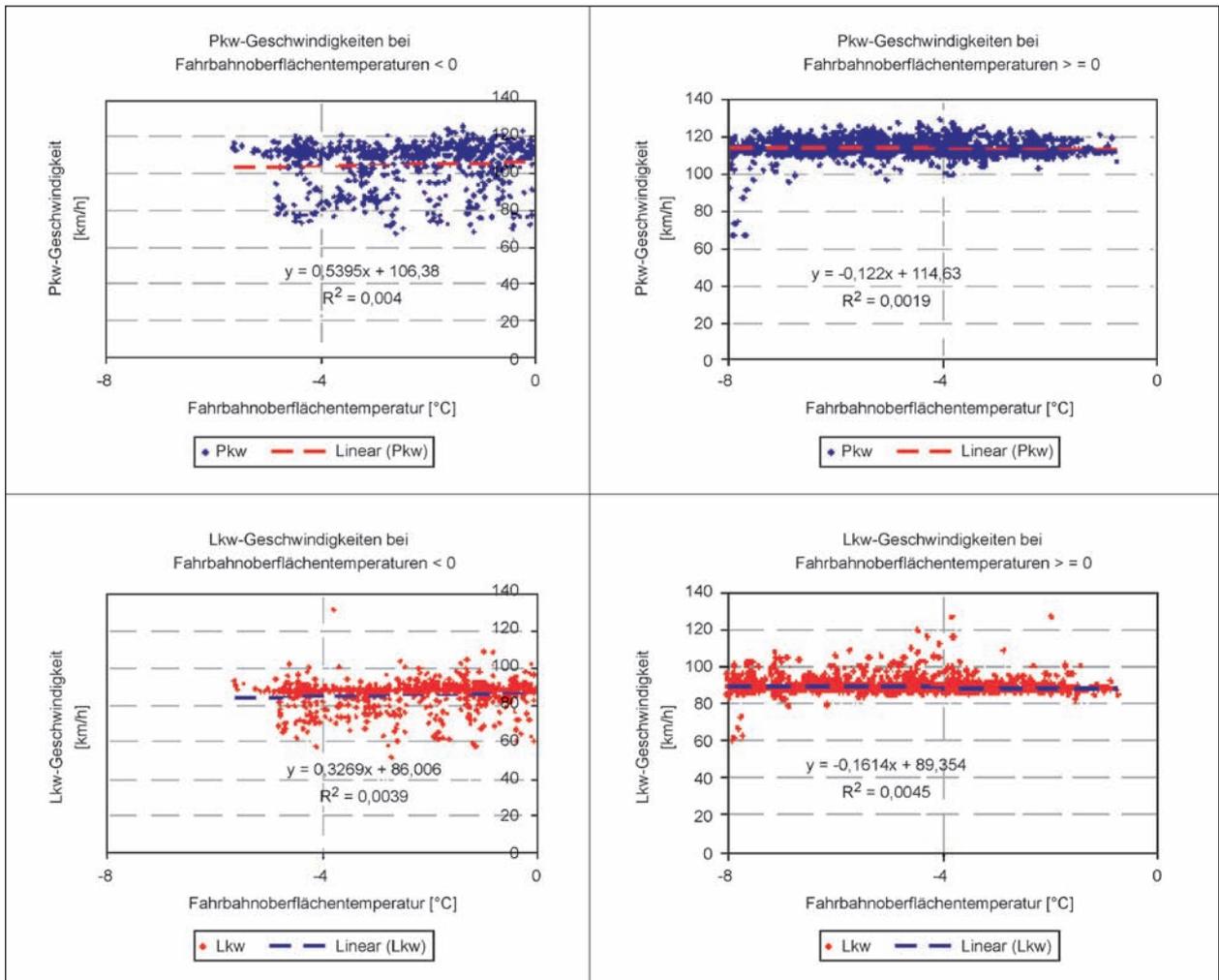


Bild 3-4: Streuung der Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen-Temperaturen

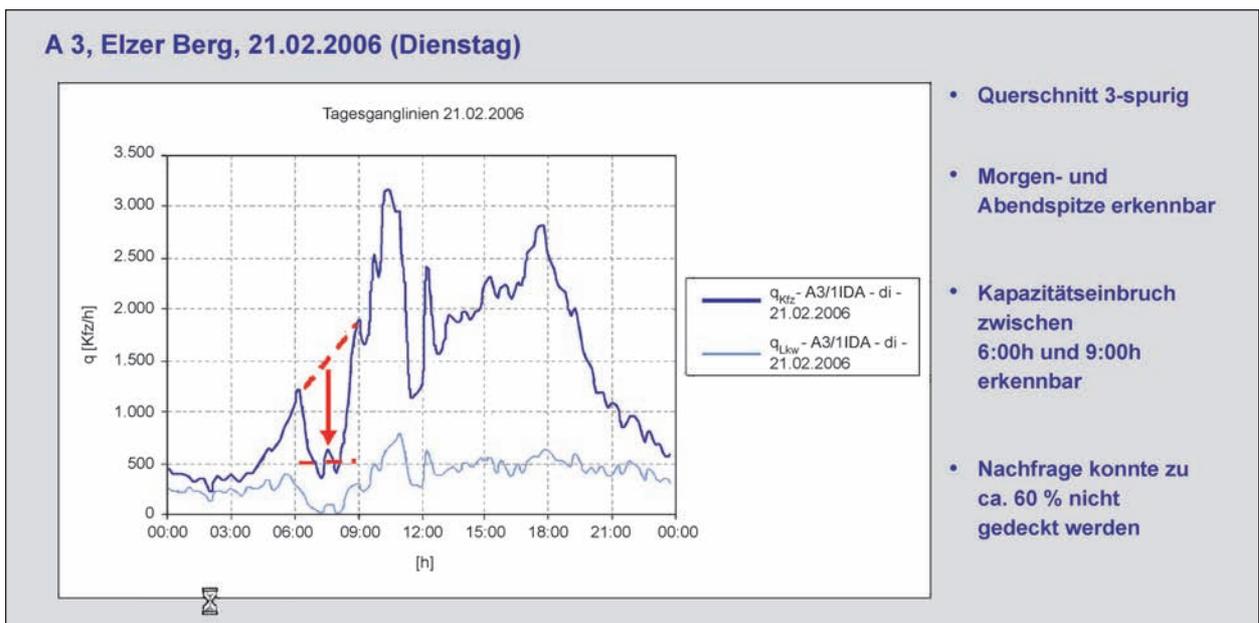


Bild 3-5: Beispiel für Abschätzung des Kapazitätseinbruchs aus aufbereiteter Datensituation mit witterungsbedingter Verkehrsstörung

Wetterklasse	Abschlagsfaktor Kapazität Worst Case	Abschlagsfaktor Kapazität
1	58 %	32 %
2	58 %	34 %
3	58 %	11 %
4	0 %	0 %
5	30 %	10 %
6	0 %	0 %
7	30 %	10 %
8	0 %	0 %
0	0 %	0 %

Tab. 3-1: Initialgrößen der Kapazität zugeordnet zu Wetterklassen für die prototypische Implementierung der ersten Feldversuchsphase (abgeleitet aus einem Stichprobenumfang von 87 Wettersituationen)

klassen zusammengestellt. Es ist zu beachten, dass diese Werte als Initialgrößen für die prototypische Implementierung herangezogen wurden. Dabei wurde angenommen, dass die Wetterklassen 8 (Nullfall), 6 und 4 keinen mindernden Einfluss auf die Kapazität eines Streckenabschnitts aufweisen, da diese Wetterklassen – mit Ausnahme der Wetterklasse 6 – durch eine Wettersituation ohne Niederschlag und trockene Fahrbahnoberfläche gekennzeichnet sind. Die Abschlagsfaktoren w_{\max} und w_{standard} wurden daher für diese Wetterklassen zu null angenommen. Die Wetterklasse 6 stellt einen transienten Zustand im Übergang zur Wetterklasse 8 dar, der durch eine (noch) feuchte/nasse bzw. (noch) schnee- oder eisbedeckte Fahrbahnoberfläche, aber durch keinen Niederschlag und Temperaturen $> 0\text{ °C}$ charakterisiert ist. Da davon auszugehen ist, dass der Wetterzustand der Wetterklasse 6 im zeitlichen Verlauf in den Zustand der Wetterklasse 8 übergeht, wurden auch für die Wetterklasse 6 die Abschlagsfaktoren w_{\max} und w_{standard} zu null angenommen. Da in den beigegebenen Daten der transiente Zustand der Wetterklasse 3 nicht vorhanden war, wurden die Werte w_{\max} und w_{standard} aus den ermittelten Werten der Wetterklasse 1 abgeschätzt. Der Wert für w_{\max} der Wetterklasse 3 wurde gleich dem Wert w_{\max} der Wetterklasse 1 angenommen, und der Wert w_{standard} der Wetterklasse 3 wurde gleich dem minimalen Wert w_{\min} der Stichprobe der Wetterklasse 1 gesetzt, da hier eine größere Streuung der Werte gegenüber der Wetterklasse 1 zu erwarten ist. Ferner ist zu beachten, dass dieser Wetterklasse auch solche Witterungssituationen zugeordnet

sind, die kein Winterwetter repräsentieren (Fahrbahnoberflächentemperatur $> 0\text{ °C}$, trockener Fahrbahnzustand, aber Niederschlag). Auch die Wetterklasse 7 war in den beigegebenen Daten nicht präsent. Die Werte für w_{\max} und w_{standard} wurden für diese Wetterklasse überschlägig zu 30 % und 10 % abgeschätzt. Die Auswertung der Stichprobe der Wetterklasse 5 wies unplausibel hohe Werte auf, welche auf nicht zuordenbare Rand- bzw. Sondereffekte zurückzuführen sind, sodass auch hier die Werte für w_{\max} und w_{standard} für eine initiale Modellbetrachtung zu 30 % und 10 % abgeschätzt wurden. Aufbauend auf den Ergebnissen des Feldversuchs sind eine Überprüfung und Verfeinerung sowohl der Anzahl der Wetterklassen als auch der Abschlagsfaktoren durchgeführt worden, die in den folgenden Kapiteln beschrieben wird.

3.3.2 Prognose des Staurisikos

3.3.2.1 Übernahme von Netzgrunddaten

Zur Bereitstellung der verkehrlichen Grunddaten können abhängig von der Verfügbarkeit verschiedene Quellen herangezogen werden. Neben der Einteilung der Streckenabschnitte sind Angaben zu den verfügbaren Fahrstreifenanzahlen sowie der Streckenlängsneigung erforderlich.

Mit diesen Daten ist die Ermittlung der Kapazität der freien Strecke für jeden Streckenabschnitt getrennt nach Richtungsfahrbahnen möglich. Alternativ können individuelle Kennwerte für die Kapazität der Streckenabschnitte aus Datenanalysen des Netzbetriebs ermittelt und übernommen werden.

Für die Abbildung der erwarteten Verkehrsnachfrage werden aus Messdaten abgeleitete Verkehrsstärkeganglinien herangezogen. Diese sollten eine kontextbezogene Differenzierung aufweisen, also Wochentage oder Sondersituationen berücksichtigen.

3.3.2.2 Berücksichtigung von Arbeitsstellen

Arbeitsstellen können aufgrund von Fahrstreifenreduktionen sowie vereinfachter Verkehrsführungen oder verengter Fahrstreifen eine Verringerung der Kapazität zur Folge haben. Um diese Effekte im Prognosemodell abzubilden, ist die Erfassung der betroffenen Richtungsfahrbahn, d. h. des Streckenabschnitts mit Arbeitsstelle, erforderlich. Hierbei sind Angaben zur zeitlichen Dauer der Einschränkung, der Anzahl der verbleibenden Fahrstreifen sowie

zur vorhandenen Kapazität im Streckenabschnitt notwendig.

Sofern Angaben zu Arbeitsstellen vorhanden sind, werden die entsprechenden Kapazitätswerte des betroffenen Streckenabschnitts anstelle der Werte aus der Grunddatenversorgung für die Prognose verwendet.

3.3.2.3 Berücksichtigung von disponierten Winterdiensttätigkeiten

Wie in Kapitel 2.2 dargestellt, zielen zahlreiche Untersuchungen und Forschungsvorhaben auf Strategien zur optimierten Durchführung des Winterdienstes ab. Eine präventive und frühzeitige Einleitung von Winterdiensttätigkeiten sowie die Bildung von Einsatzschwerpunkten dienen dem Zweck, den Verkehrsraum Straße für den Verkehrsteilnehmer mit möglichst geringen witterungsbedingten Einschränkungen bereitzustellen.

In der Folge ist davon auszugehen, dass die zielgerichtete und optimierte Durchführung des Winterdienstes zu einer Verbesserung der Kapazität auch unter dem Einfluss von Winterwetter führen wird. Gegenüber den zuvor abgeleiteten Werten ist möglicherweise eine Minderung der Kapazitäts-Abschlagsfaktoren zu erwarten. Es bleibt jedoch zu beachten, dass auch die für die Verfahrensentwicklung ausgewerteten Daten auf betrieblichen Situationen beruhen, in denen der Winterdienst durchgeführt wurde. Die Generierung eines Nullfalls komplett ohne Winterdienstesätze ist weder möglich noch zielführend.

Da in der durchgeführten Datenanalyse vorab keine Angaben zu Art, Umfang und Zeitpunkt der Durchführung von Winterdienstaktivitäten verfügbar waren, blieb die Bewertung dieses Einflussfaktors auf die Kapazität der A-posteriori-Auswertung weiterer Daten im Rahmen der durchgeführten Feldversuche vorbehalten. Dabei wurden z. B. Angaben aus Einsatz- und Streuprotokollen in die Betrachtung aufgenommen.

3.3.2.4 Prognostizierende Berechnung von Stauereignissen

Unter der Annahme eines konstanten Verkehrszustands innerhalb jedes untersuchten Zeitintervalls kann ein deterministisches Warteschlangenmodell zur Untersuchung von Stauentwicklungen verwendet werden. Die aktuelle Länge eines Staus lässt

sich zu jedem Zeitpunkt durch die vorzeichenrichtige schrittweise Summation von Zufluss und Abfluss von Fahrzeugen bestimmen. Dabei muss die Staulänge des vorhergehenden Intervallschritts als Startgröße der Berechnung berücksichtigt werden. Der Zufluss wird für das jeweilige Intervall aus der Verkehrsnachfrage zu diesem Zeitpunkt bestimmt. Der Abfluss ergibt sich auf der Grundlage der Kapazität des Netzabschnitts.

Aus der Anzahl der im Netzabschnitt aufgestauten Fahrzeuge ergibt sich unter Berücksichtigung der Kapazität die fahrzeugbezogene durchschnittliche Verlustzeit, die zusätzlich zur Fahrzeit durch den Netzabschnitt bei unbeeinträchtigter Fahrt im betreffenden Zeitintervall aufzuwenden ist. Die Summierung der Anzahl der aufgestauten Fahrzeuge über die Zeit des Stauereignisses liefert die Gesamtverlustzeit aller Fahrzeuge im Stau. Dieser Wert kann zur Abschätzung der volkswirtschaftlichen Verluste im Netzabschnitt genutzt werden.

Das deterministische Warteschlangenmodell stellt einen praxistauglichen, einfach zu handhabenden und robusten Ansatz zur Abschätzung verkehrlicher Abläufe in Netzabschnitten dar. Unter Berücksichtigung der nicht konstanten und nur schwer zu erfassenden Umfeldparameter bietet das Modell eine hinreichende Genauigkeit, sodass auf eine feiner auflösende, aber auch rechenaufwändigere Darstellung von Stauereignissen z. B. durch den Einsatz von fundamentaldiagrammbasierten Verfahren oder Mikrosimulation verzichtet werden kann.

In diesem Modell werden die zuvor beschriebenen Eingangsgrößen, d. h. die streckenabschnittsbezogenen Kapazitäten, für den Standardfall und bei ungünstigem Verlauf mit der kontextspezifisch ausgewählten Ganglinie der Verkehrsstärke zusammengeführt.

3.3.3 Nutzung der Prognoseergebnisse

3.3.3.1 Klassifikation des Staurisikos

Die Prognoseergebnisse liegen abschnittsbezogen und getrennt nach Richtungsfahrbahnen vor. Das Warteschlangenmodell stellt Informationen zu den voraussichtlichen Zeitabschnitten zur Verfügung, in denen ein Stauereignis zu erwarten ist, und erlaubt ferner quantitative Abschätzungen der Stauereigenschaften. Diese Ausgaben des Warteschlangenmodells werden mit dem Ziel einer besseren praktischen Handhabbarkeit aggregiert.

Als Ergebniswerte der Prognose stehen drei Klassifikationen zur Verfügung:

- kein Staurisiko
Die Prognose ergibt für beide Kapazitäts-Abschlagwerte kein Stauereignis
- „Stauwarnung“: Staurisiko vorhanden
Die Prognose ergibt für den Kapazitäts-Abschlagswert, der die verkehrlich ungünstige Situation (Worst Case) beschreibt, ein Stauereignis, während die Prognose der Verkehrssituation unter Berücksichtigung der Eintrittshäufigkeit (Standardfall) keinen Stau ergibt.
- „Stualarm“: hohe Staugefahr
Sowohl die Prognose für die verkehrlich ungünstige Situation (Worst Case) als auch die Prognose der Verkehrssituation unter Berücksichtigung der Eintrittshäufigkeit (Standardfall) ermitteln ein Stauereignis.

Diese Art der Darstellung erlaubt eine gestufte Abschätzung des Risikos und der Eintrittswahrscheinlichkeit witterungsbedingter Verkehrsstörungen auf den einzelnen Streckenabschnitten. Für den Anwender ist somit eine intuitiv handhabbare Darstellung mit den qualitativen Prognosen „kein Stau“, „Stauwarnung“ und „Stualarm“ möglich.

3.3.3.2 Darstellung möglicher operativer Maßnahmen

Aufbauend auf den vorgenannten Klassifikationsergebnissen ist es möglich, ein situations- und prognosebezogenes „Winter-Strategienmanagement“ aufzubauen. Die Klassifikationsergebnisse können als Trigger zur Generierung von Warnmeldungen und Hinweisen für das operative Betriebspersonal in Autobahnmeistereien, Winterdienst- oder Verkehrszentralen genutzt werden.

Neben der Einsatzplanung und Optimierung des Winterdienstes können aus den Klassifikationsergebnissen ebenfalls Handlungsvorgaben für die Abwicklung von Arbeitsstellen abgeleitet werden. Abhängig von der berechneten Staugefahr können Regeln und Hinweise für die Baustellenverantwortlichen hinterlegt sein, die z. B. in der Planungsphase eine zeitliche Verlagerung oder den Verzicht auf die Durchführung der Maßnahme vorsehen. Im laufenden Baustellenbetrieb kann, abhängig von der durch die Art der Maßnahme gegebenen Flexibili-

tät, eine Verschiebung oder vorzeitige Beendigung der Arbeitsstellendurchführung angeraten sein.

Für das Verkehrsmanagement können die Prognoseergebnisse genutzt werden, um strategische verkehrssteuernde oder verkehrsbeeinflussende Maßnahmen vorzubereiten, abzustimmen und einzuleiten. Ferner lassen sich die Abschätzungen der Abwicklung des Verkehrsablaufs für eine frühzeitige Information der Verkehrsteilnehmer über zu erwartende Störungen des Verkehrsablaufs nutzen.

3.3.3.3 Modifikation und Szenarienbewertung

Abhängig von der Art der eingeleiteten, im vorigen Kapitel skizzierten operativen Maßnahmen ergeben sich direkte oder mittelbare Einflüsse auf den Verkehrsablauf. Während ein optimierter Einsatz des Winterdienstes oder die Verschiebung oder das Aussetzen von Arbeitsstellen eine Verbesserung der Kapazität auf den Streckenabschnitten zur Folge haben, führen Maßnahmen des Verkehrsmanagements zu einer Entzerrung oder Verringerung der Inanspruchnahme des Verkehrsraums. In diesen Fällen kann es sinnvoll sein, die Prognosen erneut mit den veränderten Eingangsparametern durchzurechnen, um die Auswirkungen der Maßnahmen quantitativ abschätzen zu können.

Der Verfahrensansatz erlaubt daher die Modifikation der Eingangsgrößen und die Bildung von Szenarien. Dadurch lassen sich abgestimmte Maßnahmenbündel dokumentieren und hinsichtlich ihrer Wirksamkeit dosieren und bewerten.

4 Modellbildung

4.1 Vorgehensweise

Für die Modellbildung wurden mehrere Arbeitsschritte durchgeführt. Diese sind in den nachfolgenden Kapiteln erläutert. Anhand verfügbarer Messdaten und Fallbeispiele aus dem Straßenwinterdienst auf den Bundesautobahnen eines ausgewählten Bundeslandes erfolgte eine Untersuchung, welche Einflussparameter und die Witterung beschreibenden Zustandsgrößen prinzipiell verfügbar sind.

Im zweiten Kapitel werden grundlegende Effekte, die bei der Modellbildung zu berücksichtigen sind, beschrieben und in ihrer Auswirkung abgeschätzt.

Als abschließender Schritt werden darauf aufbauend Wetterklassen definiert. Diesen werden die zugehörigen Kapazitätswerte zugeordnet. Aufgrund des evolutionären Verfahrensansatzes ist es erforderlich, diese Initialwerte durch Versuche und Analysen in der Praxis zu evaluieren und in geeigneter Weise fortzuschreiben.

4.2 Datenanalyse

4.2.1 Identifikation von Fallbeispielen

Anhand der zur Verfügung stehenden Daten von ausgewählten Querschnitten auf Bundesautobahnen in Hessen wurden Fälle identifiziert, bei denen mit hoher Gewissheit witterungsbedingte Verkehrsstörungen vorlagen. Aus der Kenntnis der bisweilen auftretenden messtechnischen Probleme bei Glättemeldeanlagen wurde versucht, aus dem Gesamtbild aller verfügbaren Daten und des zeitlichen Verlaufes der Messwerte den tatsächlichen Wetterzustand zu beurteilen. In Bezug auf den Einfluss auf den Verkehrsfluss kommt es dabei auf den Fahrbahnoberflächen- und den Wetter-Zustand an. Letzterer besteht im Wesentlichen aus den Parametern Niederschlagsart und -intensität.

4.2.1.1 Identifikation von witterungsbedingten Fahrbahnoberflächenzuständen

Der (wetterabhängige) Zustand an der Fahrbahnoberfläche wird im Wesentlichen von folgenden Messparametern bestimmt:

- Fahrbahnoberflächentemperatur,
- Wasserfilmhöhe (oder -dicke),
- Gefrierpunktemperatur,
- Eisanteil.

Alle Glättemeldeanlagen, welche die verfügbaren Daten geliefert haben, können den Eisanteil nicht bestimmen. Außerdem entspricht bei Schneebedeckung der Wert für die Wasserfilmhöhe häufig nicht genau dem Wasseräquivalent der Schneebedeckung.

Daher müssen zur weiteren Beurteilung des Fahrbahnzustandes noch die

- Niederschlagsart und -intensität

herangezogen werden.

Bei der manuellen Verifikation des Zustandes an der Fahrbahnoberfläche wird zweckmäßigerweise die Einteilung verwendet, die im Winterdienst und im SWIS-System definiert ist.

Die Einteilung erfolgte in Anlehnung an die Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen [TLS 2002] und die EN-Norm [EN 15518-3 2011] für Straßenwetterinformationssysteme (s. Tabelle 4-1).

		Wasserfilmdicke	Gefrier-temperatur	Fahrbahn-oberflächen-temperatur	Taupunkt-temperatur	Luft-temperatur	Nieder-schlagsart	Nieder-schlags-intensität
FBZ		WFD	GPT	FBT	TPT	LT	NSA	NSI
Wertebereich	min	0,00	-40,0	-40,0	-30,0	-40,0	kein	0,0
	max	20,00	0,0	80,0	40,0	60,0	enum	200,0
FBZ	Fahrbahnzustände	mm	°C	°C	°C	°C	enum	mm/h
0	Trocken	< 0,01	--	--	< FPT	--	kein	0,0
1	Feucht	> 0,01 < 0,5	--	> 0,5	--	--	--	--
2	Nass	> 0,5		> GPT	--	--	--	--
3	Schneematsch	> 0,2	< = 0,0	< = GPT	--		kein oder Schnee	> = 0,5
4	Schneeglätte	> = 0,00	< = 0,0	<< GPT			kein oder Schnee	> = 0,5
5	Glatteis	> = 0,00	>> FPT	<< GPT			kein	0,0
6	Eisglätte	> = 0,00	>> FPT	<< GPT	< = 0,0	< 0,0 und < TPT + 0,5	Regen	> 0,1
7	Reifglätte	> = 0,00	> = FBT	<< 0,0	= FPT	> = TPT	kein	0,0

Tab. 4-1: Einteilung der Fahrbahnzustände für die Beurteilung und deren Kriterien

4.2.1.1.1 Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur

Die Fahrbahnoberflächentemperatur kann im Prinzip als sehr zuverlässig messbar 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 damit rechnen, dass die Temperatur am Sensor von der Oberflächentemperatur des umgebenden Belages leicht abweicht. Die Abweichung ist stark von der gerade stattfindenden Ab- oder Einstrahlung abhängig und kann ± 1 °C bis ± 2 °C betragen. Trotz allem ist dieser Messwert für die Entscheidung, ob Eisbildung stattfinden kann oder nicht, als am zuverlässigsten anzusehen. Der dazu notwendige Vergleichswert, die Gefrieretemperatur, ist demgegenüber erheblich ungenauer.

4.2.1.1.2 Messung der Gefrierpunkttemperatur

Bei den meisten Glättemeldeanlagen auf hessischen Autobahnen werden so genannte „passive“ Sensoren 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 Bestimmung der chemischen Taumittelzusammensetzung ist im Bereich des Winterdienstes auf Autobahnen kein großes Problem, da unter normalen Einsatzbedingungen jeweils eine in etwa 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 Gefrieretemperatur verwendet wird, ist die Messung dennoch von äußeren Einflüssen und physikalischen Randbedingungen beeinflusst. 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

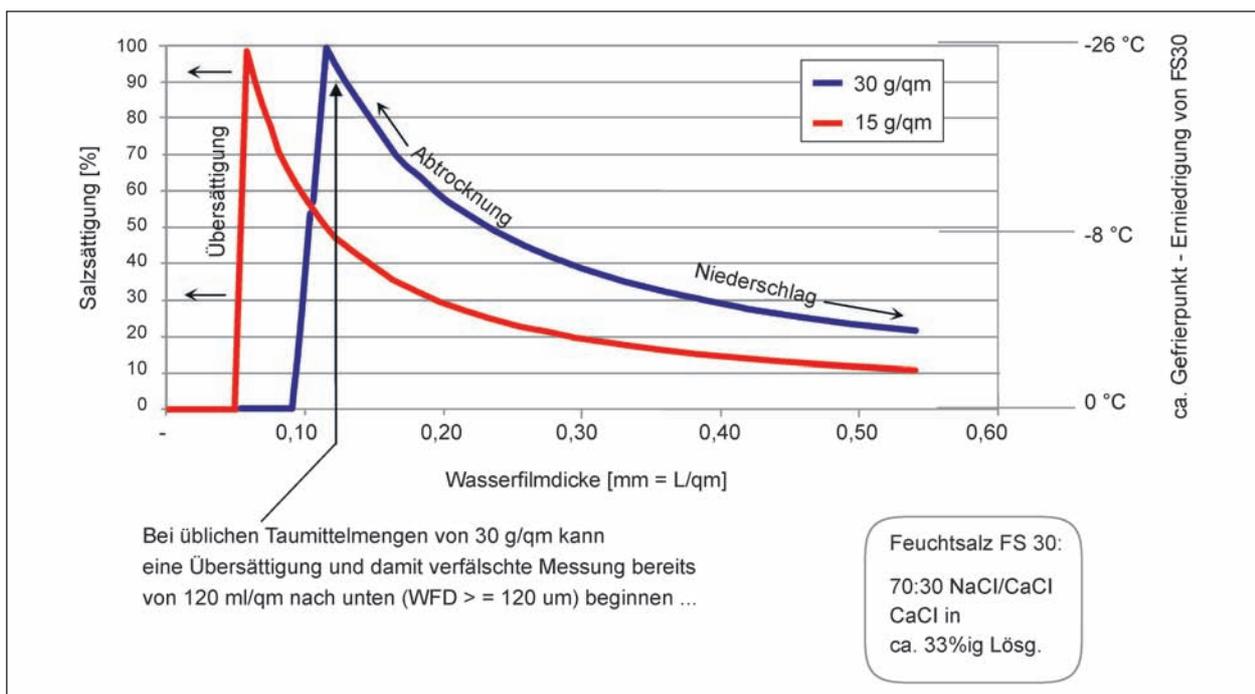


Bild 4-1: Sättigung und Gefrierpunkttemperatur bei Taumittelösung

dazu, dass die Sonden Feuchte bzw. Nässe erkennen. Das gemessene Restsalz entspricht aber nicht dem tatsächlich vorhandenen Taumittel, was infolge von Temperaturen unter dem Gefrierpunkt zu Glättewarnung führt, obwohl tatsächlich keine Glättebildung zu erwarten ist.

Bild 4-1 zeigt den Effekt bei gleicher Taumittelmenge und unterschiedlicher Wassermenge.

Ein weiterer wesentlicher Effekt für die Beurteilung des Fahrbahnzustandes ist die Inhomogenität der Taumittelverteilung und -wirkung über die Fahrbahnoberfläche. Bild 4-2 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 Bild 4-2 erzeugt.

Das zeigt wiederum das Problem der punktförmigen Messung und die Repräsentanz der Messung für die Strecke. Es treten durchaus Unterschiede in der Gefriertemperatur an verschiedenen Stellen der Fahrbahn der Strecke von -3 °C bis -13 °C trotz gleichmäßigen Streueinsatzes auf. Für eine Winterdienstanwendung lassen sich aus dem Verlauf der Gefriertemperatur wertvolle Hinweise für die Streueinsätze gewinnen. Für die Modellanalyse der verkehrlichen Auswirkung können die Gefriertemperaturwerte allerdings nicht direkt verwendet werden. Sie liefern für die Beurteilung der Fahrbahnzustände aber dennoch wichtige Anhaltspunkte,

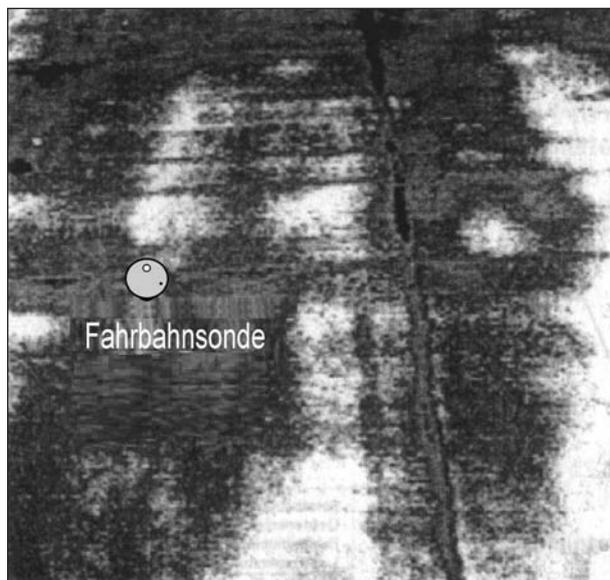


Bild 4-2: UV-Kamerabild – Verteilung von Taumittel auf der Straße

4.2.1.1.3 Messung der Wasserfilmhöhe

Die überwiegende Zahl der Glättemeldeanlagen in Hessen nutzt zwei unterschiedliche Messverfahren für die Wasserfilmhöhe.

Ein Messverfahren des Systemanbieters micKS mit Sensoren des Typs SCAN FP2000 basiert auf der Messung des Leitwerts auf zwei unterschiedlich langen Messstrecken. Da der Leitwert an der Oberfläche bei gleichem Medium von der Wasserfilmdicke abhängt, liefert der Vergleich der beiden Leitwerte die Wasserfilmhöhe. Das andere Messverfahren des Herstellers LUFFT mit Sensoren des Typs IRS21 bzw. IRS31 basiert auf der Messung der Wasserfilmdicke mit Hilfe eines Mikrowellen-Radar-Sensors.

Beide Messverfahren haben die Eigenschaft, dass sie die Wasserfilmdicke in einem Bereich mit sehr geringer Ausdehnung messen. Die zwangsläufig aufgrund des fließenden Verkehrs stark schwankenden Roh-Messwerte beziehen sich praktisch auf einen Punkt und geben für die Modellanalyse bei direktem Vergleich mit aggregierten Verkehrsdaten nur sehr bedingt die für den Einfluss auf den Verkehrsfluss und die Fahrdynamik repräsentative Wasserfilmhöhe wieder.

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

Um den Schwankungen etwas entgegenzuwirken und Messwertverfälschungen auszugleichen, sind die Umfelddaten-Stationen des Systemanbieters 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. Das Modell entspricht weitgehend dem in Kapitel 4.3.2.2.1 beschriebenen Modellansatz.

Allerdings weisen auch die Messwerte der Niederschlagsintensität naturgemäß erhebliche Schwankungen auf.

4.2.1.2 Identifikation von atmosphärischen Wetterzuständen

Der atmosphärische Wetterzustand wird hauptsächlich durch den Niederschlag bestimmt. Folgende Messparameter sind dabei wichtig:

- Niederschlagsart,
- Niederschlagsintensität,
- Sichtweite (Nebel).

Weitere Messparameter sind:

- Lufttemperatur,
- relative Luftfeuchte.

Daraus abgeleitet:

- Taupunkttemperatur,
- Feuchttemperatur.

4.2.1.2.1 Identifikation der Niederschlagsart

Die Niederschlagssensoren der Glättemeldeanlagen im SWIS Hessen bieten die Unterscheidung zwischen Schnee und Regen an. Das bedeutet im Wesentlichen die Unterscheidung zwischen „gefrorenem Niederschlag“ und „flüssigem Niederschlag“. Die meisten Anlagen sind mit Niederschlagsdetektoren ausgerüstet, die den Niederschlag optisch nach dem Lichtschrankenprinzip (Detektortyp: IRSS88 v. Rudolph, Systemanbieter mickS) detektieren.

Durch Auswertung der Impulse, welche durch die Unterbrechung des Lichtstrahls erzeugt werden, kann sehr grob nach Art des Niederschlags unterschieden werden. Ebenso wird dadurch die Intensität ermittelt. Das Verfahren ist naturgemäß stark empfindlich darauf, ob der Niederschlag senkrecht oder durch Wind entsprechend abgelenkt durch den Lichtstrahl trifft. Das kann nicht kompensiert werden. Mit diesen Sensoren kann bestenfalls eine Genauigkeit von höchstens $\pm 30\%$ erreicht werden.

Eine höhere Genauigkeit kann im Prinzip durch die neu entwickelten Niederschlagssensoren des Typs R2S des Herstellers LUFFT erreicht werden. Diese Sensoren arbeiten nach dem Doppler-Radar-Prinzip im Mikrowellenbereich. Dadurch werden die Niederschlagsnuklei nach Größe (bzw. Volumen) und Fallgeschwindigkeit erfasst und daraus die Niederschlagsart und -intensität ermittelt. Hierbei kön-

nen Genauigkeiten im Bereich $\pm 15\%$ erreicht werden. Der Hersteller gibt eine Reproduzierbarkeit von $> 90\%$ an.

In der Datenanalyse wurde ein Querschnitt (A 67, Gernsheim) ausgewählt, der eine mit diesem Verfahren ausgestattete Niederschlagsmessung besitzt. Dort wurden aber offensichtlich unplausibel hohe Niederschlagsintensitäten festgestellt. Die Ursachen dafür dürften aber im individuellen Sensor zu suchen sein und nicht dem Sensortyp oder dem Messprinzip anzulasten sein.

Zur Verifikation und Plausibilisierung der Detektion von Niederschlagsarten kann auch die so genannte Feuchttemperatur herangezogen werden. Darunter ist diejenige Temperatur zu verstehen, die der Niederschlag annimmt, wenn er durch eine Atmosphäre mit einer bestimmten Temperatur und Feuchte fällt. Die Feuchttemperatur stellt sich aufgrund von Verdunstung ein. Sehr vereinfacht, aber für diesen Zweck ausreichend, kann die Feuchttemperatur als Mittelwert zwischen der Lufttemperatur und der Taupunkttemperatur ermittelt werden.

Im Normalfall kommt unterhalb einer Feuchttemperatur von -2 °C nur noch gefrorener Niederschlag vor. Umgekehrt oberhalb $+2\text{ °C}$ kommt nur flüssiger Niederschlag vor. Dazwischen befindet sich ein Übergangsbereich, in dem gemischten Niederschlag oder entweder die eine oder die andere Art vorkommt.

4.2.1.2.2 Messung der Lufttemperatur und der relativen Feuchte

Die Lufttemperatur wird in der Regel bei Glättemeldeanlagen im SWIS Hessen zusammen mit der relativen Luftfeuchte neben der Autobahn in ca. 4 m Höhe in einem Strahlenschutzgehäuse gemessen. Die Genauigkeit der Sensoren sollte im Bereich $\pm 0,2\text{ °C}$ liegen. Die Messfühler sind entweder Messwiderstände PT100 oder Thermilinear (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 elektrischen Eigenschaften (kapazitiv) der feuchten Luft messen, ermittelt. Die Genauigkeit beträgt in etwa $\pm 3\%$. Erfahrungsgemäß sind die Genauigkeiten aber gerade bei hohen Luftfeuchten noch schlechter. Aus beiden Messwerten kann die so genannte Taupunkttemperatur ermittelt werden. Die Berechnung der Taupunkttemperatur, wie sie bei den über-

TAUPUNKT-TEMPERATUR
Näherungsweise Berechnung der Taupunkt-Temperatur aus der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte.
It = Lufttemperatur in °C -30 ... +70 °C
rf = relative Luftfeuchte in %/100 → 0,1 ... 1,0 = RLF/100
Function direkt aus der GMA-Software:
<pre>float taupunkt(float It,float rf) { float C2,C3,a,b; C2 = 17.08085; C3 = 234.175; a = It; if ((C3+a)<=0.0) return -C3; // Relative Luftfeuchte auf gültigen Bereich überprüfen, // sonst gibt's Probleme bei der log-Funktion if (rf < 0.1) return 1000; // Fehlerwert else { b = (C2*a)/(C3+a); if (rf<0.0) a = 0.0; else a = log((double)0.01*rf); return (C3*(a+b)/(C2-a-b)); } }</pre>
Näherung Berechnung Feuchttemperatur:
Feuchttemperatur FT [°C] = (It + taupunkt(It, rf)) / 2

Bild 4-3 : Auszug aus GMA-Software: Berechnungs-Schema von Taupunkt- und Feucht-Temperatur (Quelle: mickS)

wiegend ausgewerteten Stationen des Herstellers mickS verwendet wird, ist in Bild 4-3 wiedergegeben. Die Taupunkttemperatur ist wichtig, um beurteilen zu können, ob Kondensation von Feuchte an der Fahrbahnoberfläche stattfindet. 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. Das Gleiche gilt für die daraus abgeleitete Feuchttemperatur.

4.2.1.2.3 Messung der Sichtweite

Für das Fahrverhalten und den Verkehrsfluss ist die Sichtweite eine sehr entscheidende Größe. Für die Datenanalyse standen jedoch keine Daten von Sichtweitenmessgeräten zur Verfügung.

Im SWIS werden die Glättemeldeanlagen i. d. R. generell nicht mit Sichtweitenmessgeräten ausgestattet. In den Umfelddatenstationen der Verkehrsbeeinflussungsanlagen sind diese Geräte jedoch üblich. Sichtweitenmessgeräte arbeiten überwiegend nach dem Lichtstreuprinzip im infraroten Bereich. 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 bei der Datenerfassung, sodass die Messungen nur bedingt repräsentativ für die Strecke sind.

Die Intensität und die Art des Niederschlages haben einen erheblichen Einfluss auf die Sichtweite und damit das Fahrverhalten. Sichtweiten-Messgeräte 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 (siehe dazu Kapitel 4.3.1.4.5).

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

Bei der Datenanalyse war ein Fall aufgefallen, bei dem die aufgetretene Verkehrsbehinderung möglicherweise durch Nebel verursacht war. Der Verdachtsfall konnte aber mangels Daten leider nicht abgesichert untersucht werden.

Nebel entsteht bei Erreichen des Taupunktes in der Luft, d. h. bei Messwerten für die relative 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 sind ein komplexer Vorgang, der von vielen Einflüssen abhängt.

4.2.2 Analyse des Verkehrsflusses in Abhängigkeit der Fahrbahnzustände im k-v-Diagramm

Die verschiedenen Verkehrssituationen in Abhängigkeit des Fahrbahn- und Wetterzustandes lassen sich deutlich im k-v-Diagramm erkennen (vgl. Bild 4-4). Es wurden hierbei nur die Geschwindigkeiten der Pkw berücksichtigt. Bei der Verkehrsdichte wurden sowohl die Lkw als auch die Pkw berücksichtigt.

Somit kann die Ermittlung der Verkehrsdichte erfolgen. Da nur die auf 15 Minuten aggregierten Verkehrsstärken in Summe über alle Fahrstreifen vorlagen, muss die Verkehrsdichte im Mittel nach der fundamentalen Beziehung berechnet werden:

$$k_{Fz} = \frac{(q_{Fz} - q_{Lkw})}{v_{Pkw}} + \frac{q_{Lkw}}{v_{Lkw}} \quad \text{Formel 1}$$

mit

k = mittlere Verkehrsdichte (Fz = alle Fahrzeuge)
in [Fz/km], 15-min-Intervall

q = mittlere Verkehrsstärke (Fz = alle Fahrzeuge,
Pkw, Lkw) in [Fz/h], 15-min-Intervall

v = mittlere Fahrzeug-Geschwindigkeiten (Pkw,
Lkw) in [km/h], 15-min-Intervall

Die Bilder 4-4 und 4-5 zeigen jeweils einen Querschnitt mit zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung. Im Querschnitt Haigertalbrücke auf der A 45 existiert eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 120 km/h. Beim anderen Querschnitt Gernsheim auf der A 67 gibt es keine Geschwindigkeitsbegrenzung. Die Strecke ist sehr gerade und es besteht keine eingeschränkte Haltesichtweite.

Auch wenn die Datenpunkte trotz der Einteilung in Fahrbahnzustände erhebliche Streuungen aufweisen und sich die Bereiche überlappen, sind dennoch Trends erkennbar.

Grundsätzlich kann der Verkehrsfluss in drei Phasen eingeteilt werden [WU, 2000]:

1. freier, fließender Verkehr,
2. Übergangsphase
(bei Verkehrsstärke $q \rightarrow \max.$ = Kapazität),
3. instabiler, zähfließender Verkehr („Stop & Go“).

Dabei gilt es, folgende Kenngrößen in Abhängigkeit des konkreten Fahrbahn- und Wetterzustandes zu identifizieren:

- maximale freie Geschwindigkeit
(bei $k \rightarrow 0$),
- kritische Geschwindigkeit
(bei $q \rightarrow \max$ = Kapazität),
- kritische Verkehrsdichte
(bei $q \rightarrow \max$ = Kapazität).

Bei zunehmender Verkehrsdichte zeigt sich eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit allein von der Verkehrsdichte. Der Verkehr wird zunehmend gebunden, bis er im Idealfall zur Kolonnenfahrt übergeht im Bereich der maximalen Verkehrsstärke (= Kapazität). Die sich dabei einstellende Geschwindigkeit (kritische Geschwindigkeit) liegt deutlich niedriger als die freie Geschwindigkeit. Hier bricht dann der Verkehrsfluss zusammen und wird zähfließend („Stop & Go“) bis hin zum Stau bzw. stehenden Verkehr.

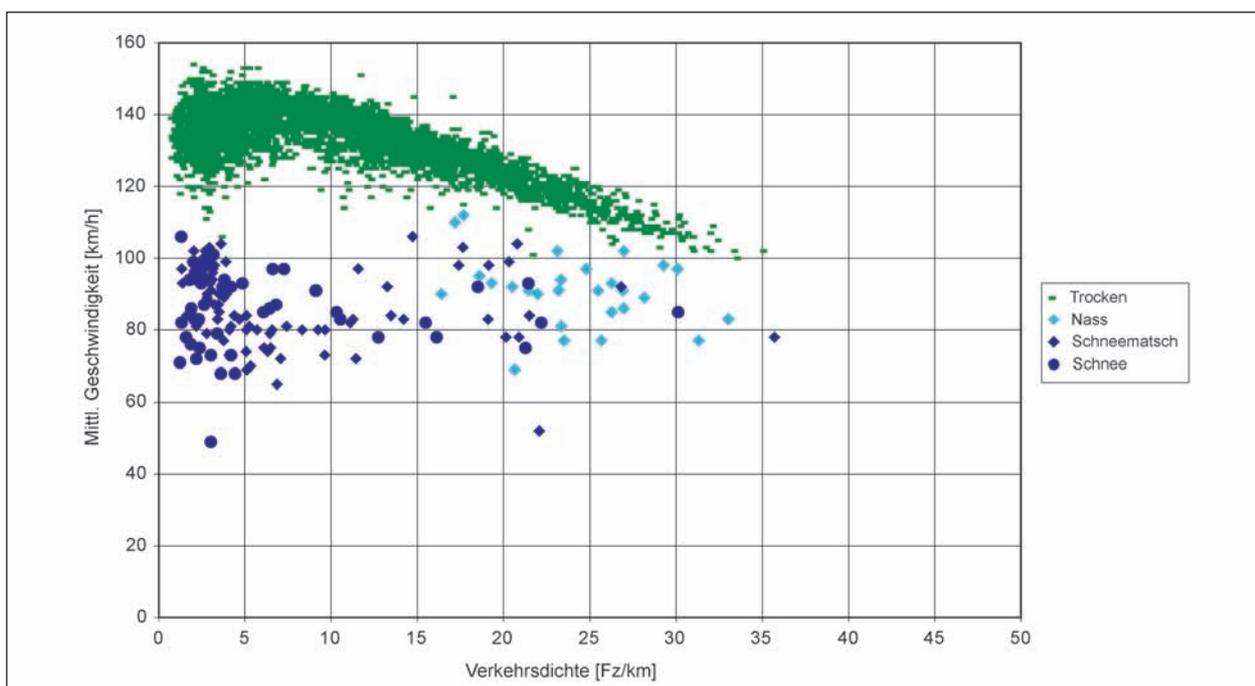


Bild 4-4: k-v-Diagramm nach Fahrbahnzuständen, 2-streifige BAB (A 67 Gernsheim), ohne Geschwindigkeitsbegrenzung

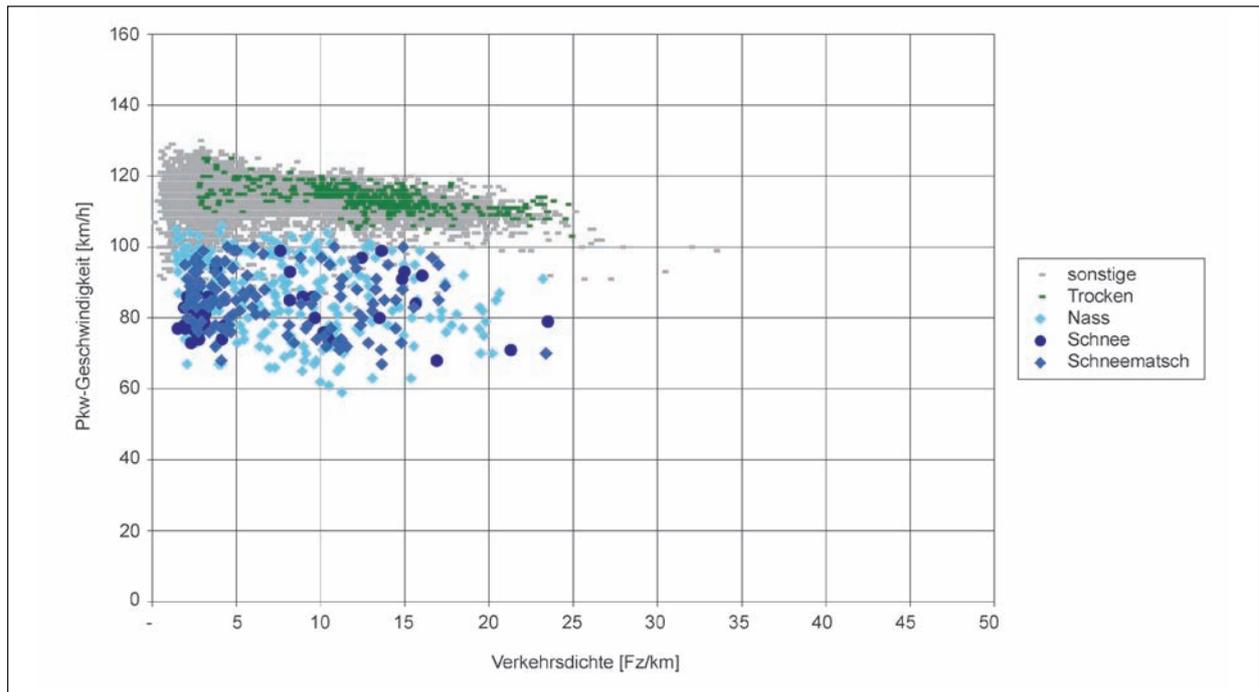


Bild 4-5: k-V-Diagramm nach Fahrbahnzuständen, 2-streifige BAB (A 45 Haigertalbrücke), mit Geschwindigkeitsbegrenzung auf 120 km/h

Aus der Analyse der wetterabhängigen Verkehrsdaten ist zu erkennen, dass die freie Geschwindigkeit der Pkw bei zunehmend kritischem Fahrbahnzustand immer mehr zurückgeht. Solange der Wetterzustand noch eine Geschwindigkeit zulässt, die über der kritischen Geschwindigkeit (Geschwindigkeit bei max. Kapazität) liegt, bleibt die kritische Geschwindigkeit auch bei diesem Wetterzustand in dem Bereich, in dem sie auch bei guten Umfeldbedingungen liegt. Die Kurve im k-V-Diagramm wird, wie in Bild 4-6 dargestellt, bei zunehmend kritischem Wetterzustand und damit geringer werdender freier Geschwindigkeit immer flacher, bis sie schließlich eine Gerade wird und auch den Bereich der kritischen Geschwindigkeit bei guten Umfeldverhältnissen unterschreitet. Das ist dann auch der Bereich, in dem die Kapazität signifikant reduziert wird.

Grundsätzlich kann im so genannten „fließenden“ Verkehr nach [WU, 2000] folgende Trendkurve in der k-v-Beziehung (bei 2-streifiger Richtungsfahrbahn) verwendet werden:

$$v = v_0 - (v_0 - v_{krit}) \cdot \frac{k}{k_{krit}} \quad \text{Formel 2}$$

mit

Bedingung: $v_0 \geq v_{krit}$

v_0 = Geschwindigkeit [km/h] bei $k \rightarrow 0$

v_{krit} = Geschwindigkeit [km/h] bei $q \rightarrow \max$
(Verkehrsstärke \rightarrow Kapazität)

k_{krit} = Verkehrsdichte [Fz/km] bei $q \rightarrow \max$
(Verkehrsstärke \rightarrow Kapazität)

Die Frage, bei welcher Verkehrsdichte die maximale Kapazität bei einem bestimmten Wetterzustand erreicht ist, kann leider in diesem Rahmen und mit den vorliegenden Daten nicht mit letzter Sicherheit geklärt werden. Der Grund liegt hauptsächlich darin, dass bei den identifizierbaren Wetterzuständen zu wenige Daten im Bereich der Kapazität bzw. im Übergang vom fließenden in den zähfließenden Verkehr vorhanden waren, die eine sichere Analyse ermöglicht hätten.

Es scheint sich abzuzeichnen, dass sich die kritische Verkehrsdichte im Bereich der maximalen Verkehrsstärke bei schlechten Wetterverhältnissen wesentlich weniger von der Verkehrsdichte bei guten Umfeldbedingungen unterscheidet, als man dies erwarten würde. Im noch fließenden Kolonnenverkehr scheinen sich die Fahrzeug-Abstände auch bei schlechten Umfeldbedingungen nicht so wesentlich von denen bei guten Umfeldbedingungen zu unterscheiden.

Die Trendkurve für die Beschreibung der v-k Beziehung für den Bereich des zähfließenden Verkehrs

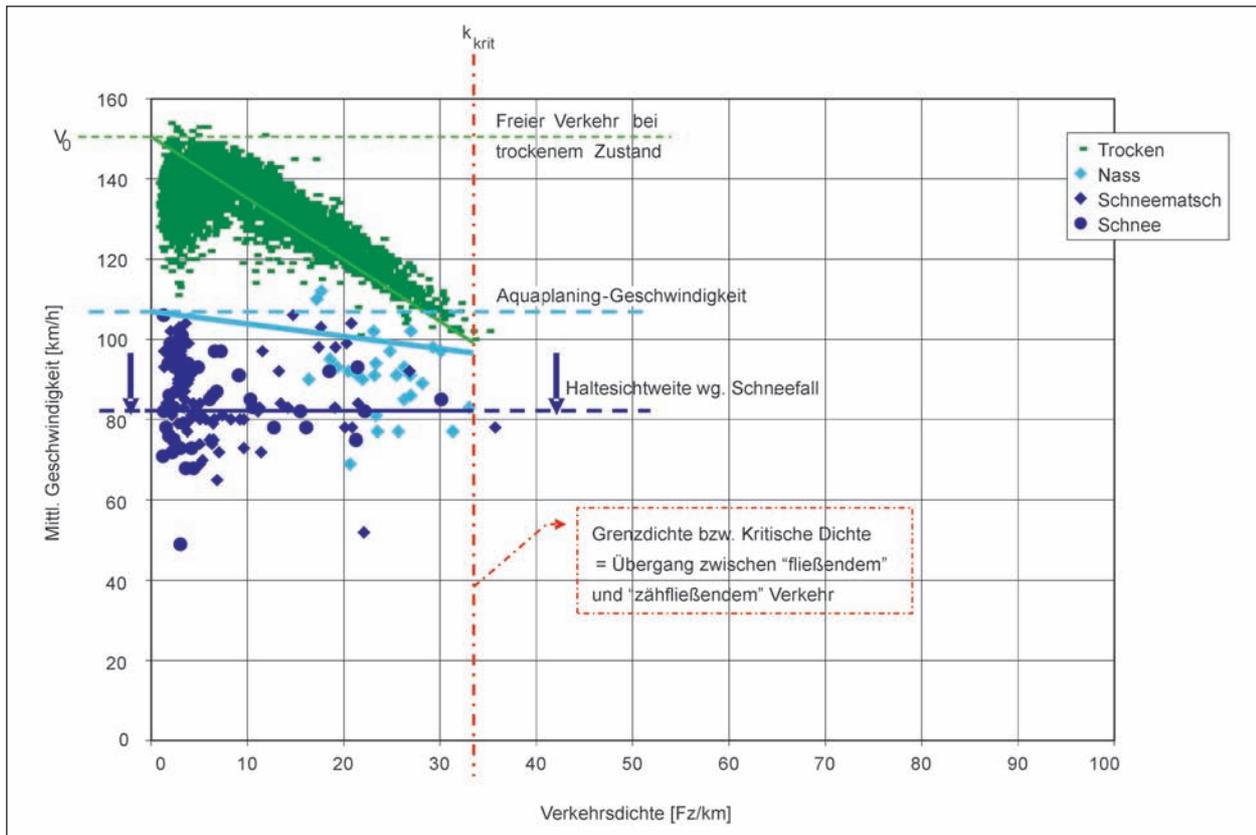


Bild 4-6: Darstellung der Trendlinien bei verschiedenen Wetterzuständen (Beispiel: A 61 Gernsheim FR Süd – Winter 2005)

geht nach [WU, 2000] davon aus, dass die Nettozeitlücke τ im Mittel in etwa konstant bleibt.

$$v = \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{1}{k_{krit}} - \frac{1}{k_{max}} \right) \quad \text{Formel 3}$$

mit

τ = Nettozeitlücke [s] zwischen zwei Fahrzeugen

k_{max} = maximale Verkehrsdichte [Fz/km] →
Kehrwert ist die mittlere Fahrzeuglänge.

Diese Beziehung scheint auch im Wesentlichen durch die wenigen Datenpunkte bei den verschiedenen identifizierten Wetterzuständen bestätigt zu werden.

Ob und wie die kritische Verkehrsdichte bei sehr kritischen Fahrbahnzuständen wie Glatteis reduziert wird, z. B. durch höhere Abstände zum Anfahren und Abbremsen im stockenden Verkehr, kann im Rahmen dieser Untersuchung nicht abschließend quantifiziert werden. Es müssten dabei die Nettozeitlücken für Fahrstreifen getrennt ausgewertet werden.

Es kann aber mit der für das vorliegende Forschungsvorhaben für die Ermittlung der Wetterklassen erforderlichen Genauigkeit von der Arbeitshypothese ausgegangen werden, dass die kritische Verkehrsdichte – zumindest bei den in der Analyse am häufigsten vorkommenden Wetterzuständen – als konstant angenommen werden kann.

4.2.3 Schwerlastverkehr

Der Anteil des Schwerlastverkehrs spielt eine Rolle bei den Verkehrsbedingungen und hat auch einen gewissen Einfluss auf die Wetterabhängigkeit. Der Anteil des Schwerlastverkehrs, zumindest in Bezug auf die zwei zur Verfügung stehenden Fahrzeugklassen Lkw und Pkw, konnte aus den Verkehrsdaten abgeleitet werden.

Bei niedrigen Verkehrsstärken überwiegt der Schwerlastverkehr sogar deutlich. Die Schwerlastverkehrsstärke stellt eher eine über die verschiedenen Verkehrssituationen und auch Tageszeiten mehr oder weniger gleichbleibende Grundlast dar, während der Pkw-Verkehr wesentlich stärker tageszeitlichen Schwankungen unterworfen ist. Hohe Gesamtverkehrsstärken resultieren daher aus dem Pkw-Verkehr (siehe Bild 4-7).

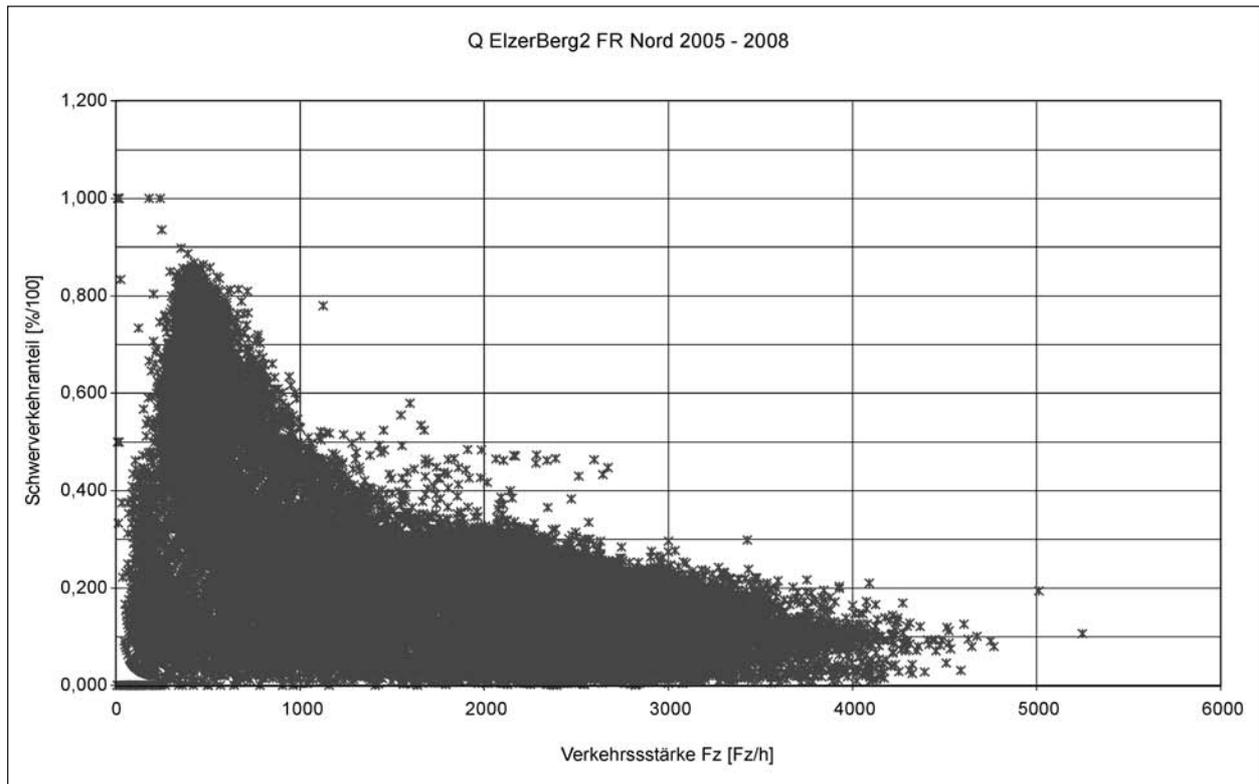


Bild 4-7: Anteil Schwerlastverkehr nach Verkehrsstärke (Beispiel: Elzer Berg FR Nord 2005...2008)

Der Schwerlastverkehrsanteil bewegt sich bei den hier interessierenden hohen Verkehrsstärken (im Bereich der Kapazität) bei den untersuchten Querschnitten zwischen 10 und 15 %.

Bei der Wetterabhängigkeit der Geschwindigkeiten wurden nur die Pkw-Geschwindigkeiten berücksichtigt. Ein signifikanter Einfluss des Schwerlastverkehrsanteils in dieser Abhängigkeit konnte nicht beobachtet werden. Daher wird der Schwerlastverkehrsanteil zunächst nicht in den Modellansätzen und bei der Ermittlung der Kapazitätsabschläge berücksichtigt. Zu berücksichtigen ist aber, dass die Analysen und die Parameter der Modellansätze streng genommen nur im Bereich des oben angegebenen Schwerlastanteils gültig sind.

4.3 Modellansatz

Der Modellansatz gründet sich auf die sich in der vorangegangenen Datenanalyse abzeichnenden Zusammenhänge, auf die in der Literatur gefundenen mikro- und makroskopischen Modelle und auf folgenden grundsätzlichen Überlegungen:

- Ein gegebener witterungsbedingter Fahrbahnzustand verändert den Kraftschluss zwischen Fahrbahnoberfläche und den Reifen des Fahr-

zeuges und damit die fahrdynamischen Eigenschaften.

- Der atmosphärische Wetterzustand verändert einerseits den Fahrbahnzustand (durch Niederschläge) und andererseits die Sichtweite.
- Ein durchschnittlich erfahrener Fahrzeuglenker passt im Mittel seine Geschwindigkeit und seinen Abstand zu anderen Fahrzeugen so an, dass er bei einem gegebenen und für ihn erkennbaren Fahrbahnzustand in keinen fahrdynamisch kritischen Zustand gerät.

4.3.1 Die Modellgrößen

Die Einflussgrößen, die durch die Witterung verändert werden, sind:

- Kraftschlussbeiwert,
- Sichtweite.

4.3.1.1 Kraftschlussbeiwert (friction)

Allgemein wird unter dem Kraftschlussbeiwert beim Bremsen das Verhältnis zwischen tangentialer Bremskraft (Horizontalkraft) und der senkrecht auf die Fahrbahnoberfläche über die Reifen wirkenden

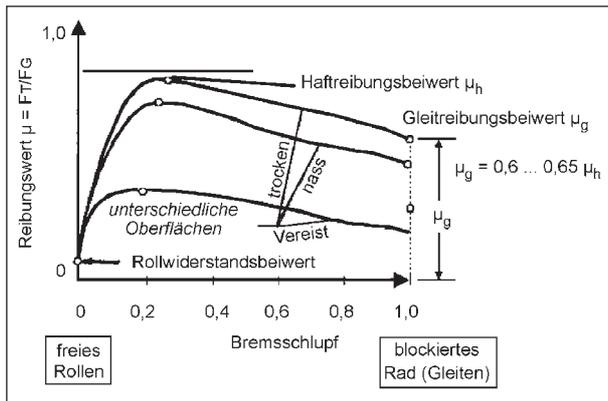


Bild 4-8: Kraftschluss in Abhängigkeit vom Bremschlupf. In: [Straßenverkehrstechnik, 2008]

Gewichtskraft des Fahrzeuges verstanden. Der Beiwert ist als Verhältnis zweier Kraftgrößen dimensionslos.

Der Kraftschlussbeiwert, auch Reibwert genannt, ist streng genommen nach obiger Definition, über den Bremsvorgang nicht gleichbleibend. Es ist zu unterscheiden zwischen dem Haft- und dem Gleitreibungsbeiwert in Abhängigkeit vom Reifenschlupf (siehe Bild 4-8). Bei einer Blockierbremsung ohne ABS ist der Gleitreibungsbeiwert anzusetzen. Bei Blockierbremsung auf nasser Fahrbahn ohne ABS ist der Kraftschlussbeiwert zusätzlich noch von der Geschwindigkeit abhängig (siehe auch [FGSV, 1968], [FACH, 1996]). Bei Bremsung mit ABS dürfte dieser Effekt aber keine Rolle mehr spielen. Nachdem heutzutage fast alle Fahrzeuge mit ABS ausgerüstet sind, kann man daher diesen Effekt im Modellansatz unberücksichtigt lassen.

Im Sinne der Modellansätze soll auch unter dem Kraftschlussbeiwert μ (oder auch engl. „friction“) derjenige effektive Koeffizient verstanden werden, der bei einer Vollbremsung während des gesamten Anhalteweges im Mittel anzusetzen ist.

Bei einer Kurvenfahrt teilt sich der Kraftschluss in den tangentialen und radialen Kraftschlussbeiwert auf.

4.3.1.2 Griffigkeit des Fahrbahnbelags

Der Kraftschlussbeiwert in obigem Sinne darf nicht direkt verwechselt werden mit dem Begriff der Griffigkeit der Fahrbanoberfläche. Die Griffigkeit ist eine Größe, die im Straßenbau verwendet wird und eine Eigenschaft des Fahrbahnbelags beschreibt. Es gibt verschiedene Messverfahren, die teilweise nicht direkt ineinander umgerechnet werden kön-

Straßendecke	trocken	nass	
		sauber	verschmutzt
Beton, Asphaltbeton, Gussasphalt	0,6.....0,9	0,4.....0,6	0,3.....0,4
Kleinsteinpflaster	0,45.....0,55	0,25.....0,35	0,15.....0,2
Erdweg, Ackerboden	0,2		
Glatteis	0,1.....0,15	0,05	

Bild 4-9: Beispiele für Kraftschlussbeiwerte bei verschiedenen Straßenbelägen und -zuständen

nen und aus denen der effektive Kraftschlussbeiwert im Sinne des Modellansatzes auch nicht direkt abgeleitet werden kann. Eine Übersicht der gebräuchlichen Verfahren ist in [CAPREZ, 2001]. Am ehesten vergleichbar mit dem effektiven Kraftschlussbeiwert ist das SCRIM-Verfahren.

4.3.1.3 Abhängigkeit des Kraftschlussbeiwertes vom witterungsbedingtem Fahrbahnzustand

Die Veränderung des effektiven Kraftschlusses ist ein zentrales Thema bei der Modellierung des Weteroneinflusses. Dies wird noch genauer bei der Beschreibung der Teilmodelle beleuchtet. In diesem Kapitel soll das Thema nur allgemein angesprochen werden.

Generell finden sich in der Literatur nur sehr spärlich fundierte Untersuchungen über die Abhängigkeit des Kraftschlussbeiwertes von konkreten Fahrbahnzustands-Größen. Das Thema Aquaplaning und Nässe ist vergleichsweise noch am intensivsten untersucht (siehe z. B. [FACH, 1996], [GANDLER, 1980], [HEINZ, 1981], [HARTZ, 2010], [HERRMANN, 2008]). Allerdings sind die Abhängigkeiten nicht in Form des Kraftschlussbeiwertes, sondern als jeweilige Grenz-Geschwindigkeit ausgedrückt. Dies ist auch beim Teilmodell „Aquaplaning-Geschwindigkeit“ angewandt. Über die Geschwindigkeiten und den Kraftschlussbeiwert bei Schneematsch, Schneebedeckung und Glatteis sind kaum belastbare systematische Untersuchungen zu finden. Einige grobe Angaben sind über Versuche in Finnland, Schweden und England zu finden [RAHJA, 2008]. Diese enthalten aber keine für die Modellbildung auswertbaren Ergebnisse.

Mikroskopische Modellansätze für die Beschreibung des Kraftschlussbeiwertes als Funktion verschiedener Parameter der Oberfläche, der Kontaktfläche zwischen den Reifen, den Reifen etc. sind in [KLEIN, 2007] beschrieben. Diese Modelle eignen

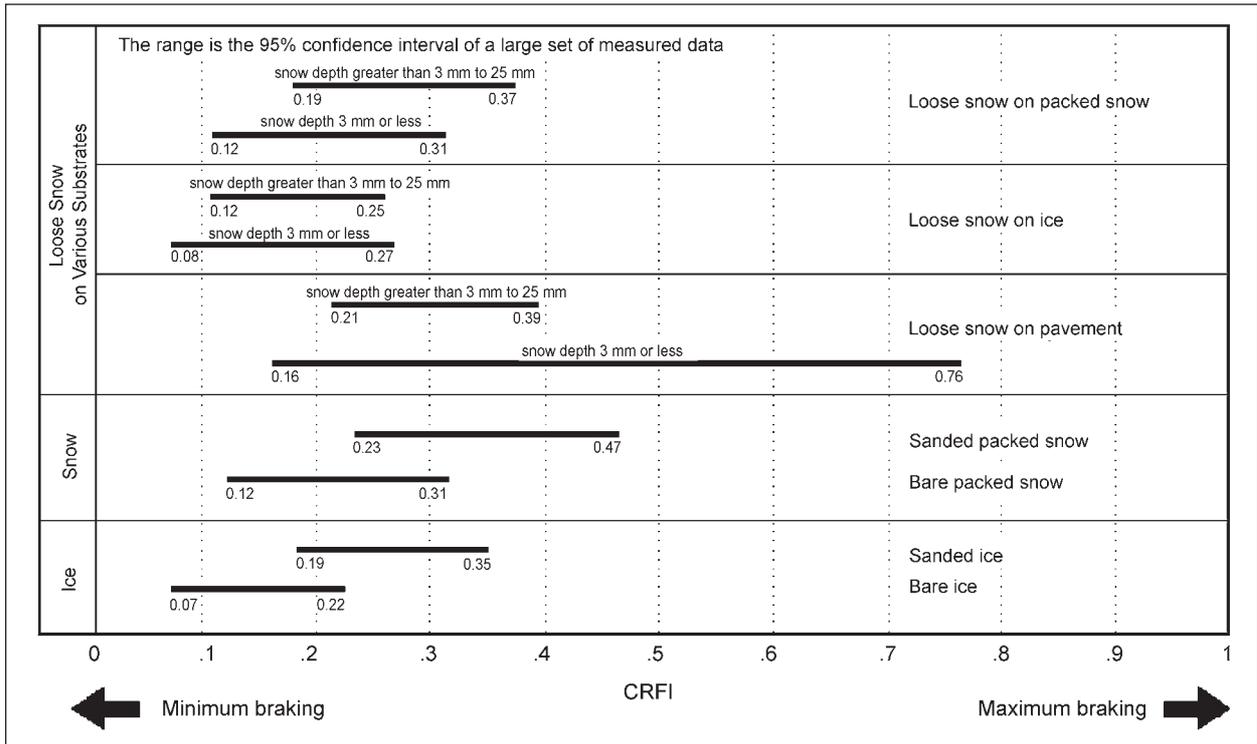


Bild 4-10: Gemessene Friktions-Koeffizienten bei verschiedenen Oberflächenzuständen. Quelle: [RSC CFRI]

sich aber nicht für die hier benötigte makroskopische Anwendung.

Einige Messungen der Friktion in Abhängigkeit des Oberflächenzustandes sind in Kanada auf Flughäfen unternommen worden [RSC CFRI]. Das Messverfahren für den so genannten „Canadian Runway Friction Index“ (DRFI) in Abhängigkeit der „Runway Surface Condition“ (RSC) liefert Ergebnisse, welche mit dem Kraftschlussbeiwert im Sinne des Modellansatzes durchaus vergleichbar sind.

Ein konkreter Modellansatz für die Abhängigkeit der Friktion vom Fahrbahnzustand wurde neuerdings in Finnland im Rahmen des EU-Projektes „ROADIDEA“ aufgestellt [NURMI, 2010], [HIPPI, 2010]. Die Basis waren Messungen des Fahrbahnzustandes mit Hilfe von sog. „non-invasive“ Messgeräten. Dabei wird die Lichtabsorption der Fahrbahnoberfläche an mehreren Stellen des Infrarot-Spektralbereichs gemessen. Dadurch ist es möglich, die Art und Dicke der Bedeckungsschicht an

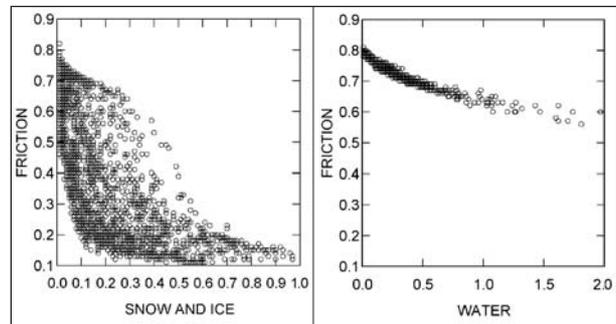


Bild 4-11: Diagramme Abhängigkeit der Friktion (Kraftschlussbeiwert) von Wasser-, Eis- und Schnee-Schichtdicke (mm). Quelle: [HIPPI, 2010]

der Oberfläche zu bestimmen. Eine Unterscheidung zwischen Wasser, Schnee und Eis ist dabei möglich. Zusätzlich kann die Temperatur der Oberfläche mit IR-Sensoren gemessen werden.

Die Diagramme von Bild 4-11 sind Beispiele für die Messergebnisse an bestimmten Standorten.

Der Modellansatz lautet:

$$\text{Friction} = \begin{cases} A \times f(\text{Snow_mm} + \text{ICE_mm}) + B \times T_{\text{road}} + C_0 & \leftrightarrow \text{Snow_mm} + \text{Ice_mm} > 0 \\ D \times f(\text{Water_mm}) + E & \leftrightarrow \text{Snow_mm} + \text{Ice_mm} > 0, \text{Water_mm} > 0 \\ 0.82 & \leftrightarrow \text{Snow_mm} + \text{Ice_mm} > 0, \text{Water_mm} > 0 \end{cases}$$

Bild 4-12: Prinzipieller Modellansatz für die Friktion in Abhängigkeit vom Oberflächenzustand der Fahrbahn. Quelle: [HIPPI, 2010]

4.3.1.4 Sichtweite

Neben dem Kraftschluss zwischen Reifen und Fahrbahn ist die Sichtweite der entscheidende Faktor, welcher das Fahrverhalten beeinflussen kann. Die Sichtweite spielt eine zentrale Rolle bei der Geschwindigkeitswahl. Der Modellansatz geht davon aus, dass ein durchschnittlich erfahrener Fahrzeuglenker unter dem gegebenen Fahrbahnzustand (Kraftschluss) – vorausgesetzt, dass dieser für den Fahrer erkennbar ist – die Geschwindigkeit seines Fahrzeuges so anpasst, dass er innerhalb seiner Sichtweite vollständig anhalten könnte. Diese Überlegung lässt sich jedoch nicht auf jeden Querschnitt entlang der Fahrstrecke streng anwenden. Auf der Autobahn, zum Beispiel bei Kurvenstrecken, kann die Sichtweite kurzzeitig geringer sein, als es dem jeweiligen Anhalteweg entspricht. Der Fahrer wird deshalb nicht sofort seine Geschwindigkeit anpassen. Ist die Sichtweite jedoch über eine längere Strecke reduziert, ist zu erwarten, dass er die Geschwindigkeit anpassen wird. Das bedeutet, dass man für die Festlegung der Sichtweite über die Strecke einen Mittelwert ansetzen muss.

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 [FGSV HBS 2005] oder [FGSV RAS-L 1995]),
- durch die Beleuchtung bedingte Sichtweite (Nacht/Tag-Unterschiede),
- durch den atmosphärischen Wetterzustand bedingte Sichtweite (Nebel, Niederschlag).

Die für den Anhalteweg im Modell anzusetzende effektive Sichtweite ist dann das Minimum der genannten Größen. Grundsätzlich gilt für die Sichtweite im Straßenverkehr eine Kontrastschwelle von 5 %.

4.3.1.4.1 Bauliche Haltesichtweite

Die so genannte Haltesichtweite ist eine Größe, die beim Straßenentwurf eine Rolle spielt. Die Ermittlung der Haltesichtweite ist in den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) ausführlich beschrieben. Dazu kommt, dass die rein konstruktive Haltesichtweite von der tatsächlich für den Anhalteweg relevanten Sichtweite, auch bei unkritischen

Wetterzuständen, in der Realität und auch im Laufe der Zeit durch die bauliche Entwicklung der Umgebung, Bewuchs etc. abweichen kann. Leider waren für die untersuchten Querschnitte keine Haltesichtweiten bekannt. Es wurden daher Haltesichtweiten bei ungestörter Atmosphäre für die untersuchten Querschnitte aus Karten und Satellitenbildern geschätzt und dann dadurch, soweit möglich, verifiziert, dass die sich daraus ergebenden Geschwindigkeiten aus dem Modell mit den tatsächlichen Geschwindigkeiten verglichen wurden. Da die Verkehrsdaten erheblich streuen, sind der Genauigkeit bei dieser Abschätzung Grenzen gesetzt.

4.3.1.4.2 Beleuchtungsabhängige Sichtweite

In der Nacht ist die Sichtweite, je nach vorhandenem Restlicht, aufgrund der fehlenden Beleuchtung geringer als bei Tageslicht. Über die für den Anhalteweg relevanten Sichtweiten in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke sind in der Literatur keine detaillierten Untersuchungen zu finden. Die Auswertung der Geschwindigkeitsdaten nach Verkehrsstärkeklassen und bei Tages- und Nachtzeiten ergaben keine signifikanten Unterschiede. Dies kann auch daran liegen, dass auf Autobahnen durch den Verkehr mit beleuchteten Fahrzeugen die subjektive Anhaltesichtweite nicht wesentlich beeinträchtigt erscheint. Bei kritischen Wetterzuständen überwiegen ohnehin andere Störfaktoren, sodass der Einfluss der natürlichen Lichtverhältnisse nicht ins Gewicht fällt.

Deshalb wurde zunächst entschieden, keine zusätzlichen Wetterklassen mit Unterscheidung von Tages- und Nachtlicht einzuführen. Die Relevanz der Beleuchtungsabhängigkeit konnte jedoch nicht mit letzter Sicherheit in diesem Rahmen abgeklärt werden und lässt es ggf. sinnvoll erscheinen, weiterführende Untersuchungen durchzuführen.

4.3.1.4.3 Wetterbedingte Sichtweite

Bei der wetterbedingten Sichtweite sind wieder grundsätzlich zwei Phänomene zu unterscheiden: die Sichtweite durch Nebel – im Prinzip ein Aerosol, fein verteilte Wassertropfen in der Atmosphäre – und durch Niederschlag.

4.3.1.4.4 Sichtweite bei Nebel

Dunst und Nebel entstehen in der Atmosphäre und in Bodennähe. Es handelt sich um feinstverteilte

Wassertröpfchen, die durch Kondensation in der mit Feuchte gesättigten Luft entstehen. Dies ist physikalisch als Aerosol zu bezeichnen. Rauchentwicklung hat grundsätzlich die gleiche Wirkung bezüglich der Sichtweite. Der Vorgang der Bildung von Nebel ist sehr komplex und von so genannten Kondensationskeimen in der Luft abhängig. Die Nebelbildung findet oberhalb 97 % relativer Luftfeuchte statt. Nebel ist zudem sehr instabil und kann daher keinesfalls nur aus den meteorologischen Daten Feuchte und Lufttemperatur bestimmt oder vorhergesagt werden, somit auch nicht einer konkreten Sichtweite zugeordnet werden.

Wie zuvor beschrieben, kann das Phänomen durch Sichtweitenmessgeräte gemessen werden. Die Sichtweite durch Nebel bzw. Aerosol kann nur durch aktuelle Messdaten an den Querschnitten berücksichtigt werden, sofern diese damit ausgerüstet sind. Eine Berücksichtigung der nebelbedingten Sichtweite aus den Wettervorhersagen ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht möglich.

4.3.1.4.5 Sichtweite bei Niederschlag

Starke Niederschläge, insbesondere Schneefälle, können die Sichtweite erheblich herabsetzen. Es konnten bei der Analyse der Daten Fälle identifiziert werden, bei denen die Geschwindigkeit offensichtlich rein durch einsetzende starke Niederschläge eingebrochen ist. Dabei muss man zwei Phänomene auseinanderhalten: einmal die Geschwindigkeitsanpassung durch die reduzierte Anhaltesichtweite und die Geschwindigkeitsanpassung durch die Fahrbahnoberflächenverhältnisse (z. B. Aquaplaning, verminderter Kraftschluss). Eine aktuelle Untersuchung [HARTZ, 2010] zeigt die gefahrenen Geschwindigkeiten bei starkem Regen. Dabei wird aber keine Differenzierung vorgenommen zwischen Geschwindigkeitsanpassung durch Sichtreduktion oder durch den Fahrbahnzustand. Im Wesentlichen wird dabei der Aquaplaning-Effekt als Ursache angenommen. Bei flüssigen Niederschlägen, zumindest durch den fallenden Niederschlag in der Atmosphäre, ist die Sichtweite nicht so stark eingeschränkt. In diesem Zusammenhang können für einen dichten Straßenverkehr die sich durch vorausfahrende und überholende Fahrzeuge erzeugte Gischt bzw. Sprühhahnen für die Sichtweite von Bedeutung sein. Darüber sind aber keine Untersuchungen zu finden. Aus den vorliegenden Daten lässt sich dieser Effekt auch in keiner Weise quantitativ fassen. Der Effekt von Gischt und Sprühhahnen kann daher im Modellansatz nicht berücksichtigt werden.

Hingegen ist bei starkem Schneefall die Sichtweite teilweise erheblich reduziert.

Der Modellansatz für die Berücksichtigung der Sichtweite durch Niederschlag baut auf der optischen Extinktion auf. Diesen Zusammenhang machen sich auch einige optische Niederschlagsmessgeräte (Distrometer) zunutze (siehe auch [MAHLKE, 2007], [LEMPPIO, 2006]).

Der optische Extinktionskoeffizient σ ist abhängig von der Dichteverteilung der Niederschlagspartikel und vom volumenäquivalenten Durchmesser und kann wie folgt ermittelt werden [LOEFFLER], [GUNN, 1957]:

$$\sigma = \frac{\pi}{2} \cdot \int D^2 \cdot n_D \cdot dD \quad \text{Formel 4}$$

mit

D = volumenäquivalenter Durchmesser in [mm]

n_D = Anzahldichteverteilung der Niederschlagspartikel in [$\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}$]

π = Kreiszahl 3,1415...

Die Sichtweite SW in [m] bei einer Kontrastschwelle von 5 % ergibt sich dann aus:

$$SW = \ln 0,05 / \sigma = 3 / \sigma \quad \text{Formel 5}$$

4.3.1.4.6 Durchmesser und Fallgeschwindigkeit bei verschiedenen Niederschlagsarten

Niederschlagsphänomene sind sehr mannigfaltig. Die Dichteverteilung ist von der Fallgeschwindigkeit [m/s] abhängig. Distrometer und neuerdings verfügbare Niederschlagsmessgeräte mit Doppler-Radar messen die Fallgeschwindigkeit und Größe (volumenäquivalenter Durchmesser) der Partikel. Bild 4-13 zeigt die Fallgeschwindigkeiten für einige typische, häufig vorkommende Niederschlagsarten.

Je niedriger die Fallgeschwindigkeit (= hohe Anzahldichteverteilung) und je größer der Durchmesser, desto höher ist der Einfluss auf die Sichtbehinderung.

Die Häufigkeitsverteilung der Fallgeschwindigkeit und des volumenäquivalenten Durchmessers ist abhängig von der Form der Partikel. Speziell bei Schnee oder allgemein gefrorenem Niederschlag gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten. In [HOGAN, 1992] und [GUNN, 1957] finden sich darüber detaillierte Untersuchungen.

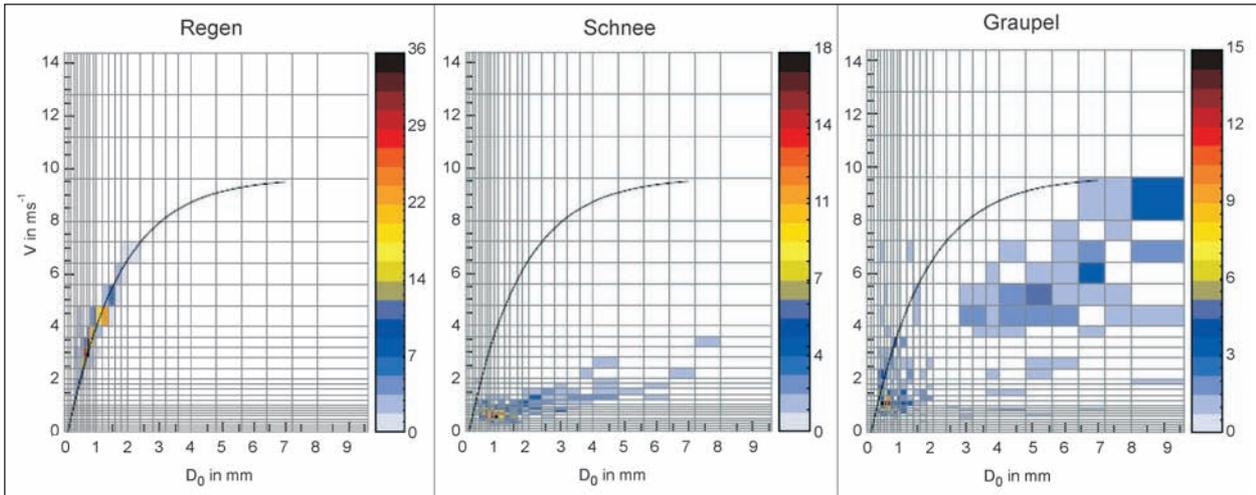


Bild 4-13: Beispiele für Häufigkeitsverteilungen von Fallgeschwindigkeit und Durchmesser typischer Niederschlagsarten.
Quelle: [MAHLKE, 2007]

	N1a Elementary needle		C1f Hollow column		P2b Stellar crystal with sectorlike ends		P6b Plate with spatial dendrites		CP3d Plate with scrolls at ends		R3c Graupel-like snow with nonrimed extensions
	N1b Bundle of elementary needles		C1g Solid thick plate		P2c Dendritic crystal with plate at ends		P6c Stellar crystal with spatial plate		S1 Side planes		R4a Hexagonal graupel
	N1c Elementary sheath		C1h Thick plate of skelton form		P2d Dendritic crystal with sectorlike ends		P6d Stellar crystal with spatial dendrites		S2 Scalelike side planes		R4b Lump graupel
	N1d Bundle of elementary sheaths		C1i Scroll		P2e Plate with simple extensions		P7a Radiating assemblage of plates		S3 Combination of side planes, bullets and columns		R4c Conelike graupel
	N1e Long solid column		C2a Combination of bullets		P2f Plate with dendritic extensions		P7b Radiating assemblage of dendrites		R1a Rimmed needle crystal		I1 Ice particle
	N2a Combination of needles		C2b Combination of columns		P3a Two-branched crystal		CP1a Column with plates		R1b Rimmed columnar crystal		I2 Rimmed particle
	N2b Combination of sheaths		P1a Hexagonal plate		P3b Three branched crystal		CP1b Column with dendrites		R1c Rimmed plate or sector		I3a Broken branch
	N2c Combination long solid columns		P1b Crystal with sectorlike branches		P3c Four-branched crystal		CP1c Multiple capped column		R1d Rimmed stellar crystal		I3b Rimmed broken branch
	C1a Pyramid		P1c Crystal with broad branches		P4a Broad branch crystal with 12 branches		CP2a Bullet with plates		R2a Densely rimmed stellar crystal		I4 Miscellaneous
	C1b Cup		P1d Stellar crystal		P4b Dendritic crystal with 12 branches		CP2b Bullet with dendrites		R2b Densely rimmed stellar crystal		G1 Minute column
	C1c Solid bullet		P1e Ordinary dendritic crystal		P5 Malformed crystal		CP3a Stellar crystal with needles		R2c Stellar crystal with rimmed spatial branches		G2 Germ of skelton form
	C1d Solid bullet		P1f Fernlike crystal		C1d Solid bullet		CP3b Stellar crystal with columns		R3a Graupel-like snow of hexagonal type		G3 Minute hexagonal plate
	C1e Solid column		P2a Stellar crystal with plates at ends		P6e Plate with spatial plates		CP3c Stellar crystal with scrolls at ends		R3b Graupel-like snow of lump type		G4 Minute stellar crystal
											G5 Minute assemblage of plates
											G6 Irregular germ.

Bild 4-14: Meteorologische Klassifikation von Schneekristallen nach MAGONO und LEE. Quelle: [RASMUSSEN, 1998]

Die Form der Kristalle wird zu einem wesentlichen Teil von den atmosphärischen Bedingungen, insbesondere von der Lufttemperatur, bei ihrer Entstehung bestimmt. Eine detaillierte Unterscheidung zu treffen ist in der Praxis nicht möglich und auch angesichts der übrigen Modellgenauigkeiten nicht sinnvoll. Es genügt für die Anwendung, zwei typische Klassen für die Niederschlagsarten Regen und Schnee zu verwenden.

4.3.1.4.7 Modellansatz Sichtweite aus Niederschlagsintensität

Die Anzahldichteverteilung n_D ist wiederum durch Formel 6 ausgedrückt.

$$n_D = n_0 \cdot e^{-\Lambda \cdot D} \tag{Formel 6}$$

Die Dichteverteilung n_D wird durch die Parameter Λ (von Niederschlagsintensität abhängiger Koeffizient

für den volumenäquivalenten Durchmesser – siehe Formel 6) und n_0 (Anzahldichteverteilung bei $D \rightarrow 0$) ausgedrückt und führt, in die Lösung der Formel 4 und in Formel 5 eingesetzt, zu folgendem Sichtweiten-Modell mit zwei Parametern:

$$SW = 0,955 \cdot \frac{\Lambda^3}{n_0} \quad \text{Formel 7}$$

Die Parameter Λ und n_0 sind in der Literatur [MIERS, 1983 und RASMUSSEN, 1998] teilweise empirisch als Funktionen der Niederschlagsintensität und für einzelne Niederschlagsklassen ermittelt worden.

Für diesen Modellansatz genügt eine Auswahl bzw. Zusammenfassung der Parameterfunktionen für die zwei Hauptklassen (siehe Bild 4.15).

Die Niederschlagsintensität NSI wird immer in mm/h (entspricht Liter pro m² pro h) ausgedrückt. Bei Schnee bzw. gefrorenem Niederschlag ist das Wasseräquivalent gemeint.

Bild 4-16 zeigt im logarithmischen Maßstab die sich aus dem Modell ergebenden Sichtweiten in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität.

Niederschlagsart – Klasse	$n_0 = [\text{m}^{-3} \text{mm}^{-1}]$	$\Lambda = [\text{mm}^{-1}]$
Regen (flüssiger Niederschlag)	0,008	$4,1 * \text{NSI}^{-0,21}$
Schnee (gefrorener Niederschlag)	$3,8 * \text{NSI}^{-0,87}$	$25,5 * \text{NSI}^{-0,87}$

Bild 4-15: Modell-Parameter für die Sichtweite versus Niederschlag. Quelle: [MIERS, 1983]

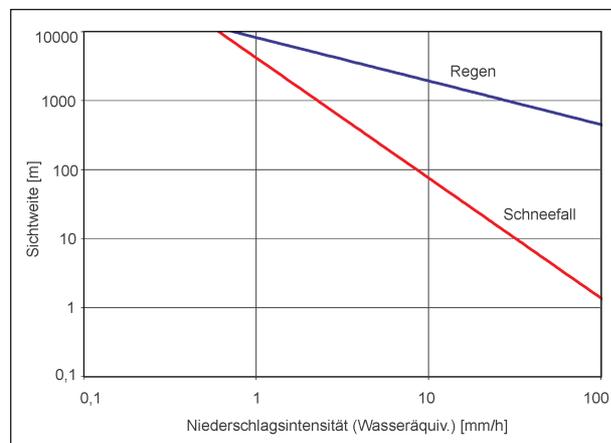


Bild 4-16: Model Sichtweite aus Niederschlagsintensität (logarithmisch)

4.3.2 Modelle für die freie Geschwindigkeit

Die wesentliche Beschreibungsgröße für den Verkehrsfluss bei bestimmten Wetterzuständen ist die so genannte freie Geschwindigkeit bei geringer Verkehrsdichte ($k \rightarrow 0$). Im Fall von kritischen Wetterzuständen ist damit die Geschwindigkeit gemeint, die ein durchschnittlich vorsichtiger und erfahrener Fahrer bei Erkennen des Wetter- und Fahrbahnzustandes fahren würde (oder sollte), um nicht in einen fahrdynamisch kritischen Zustand zu kommen, vgl. hierzu Kapitel 4.2.2.

Die freie Geschwindigkeit v_0 bei guten Umfeldbedingungen kann aus der Analyse der Verkehrsdaten oder aus dem HBS [FGSV HBS, 2005] oder [BRILON et al., 2010] entnommen werden. Zunächst kann aber für die Ermittlung der wetterabhängigen maximalen Verkehrsstärken davon ausgegangen werden, dass der Übergangsbereich aus den Verkehrsdaten bei guten Umfeldbedingungen oder dem HBS entnommen werden kann (kritische Geschwindigkeit).

Damit kommt es auf die Feststellung der freien Geschwindigkeit bzw. der maximalen sicheren Geschwindigkeit bei gegebenen Wetterverhältnissen an.

Diese anzusetzende Geschwindigkeit ist dann das Minimum, welches sich aus der Anwendung der folgenden Teilmodelle ergibt:

- Geschwindigkeit aus Anhaltesichtweite,
- Aquaplaning-Geschwindigkeit,
- Schleuder-Geschwindigkeit (bei Kurvenfahrt).

4.3.2.1 Modell für die maximale Geschwindigkeit aus Anhaltesichtweite

Der Modellansatz geht davon aus, dass die (freie) Geschwindigkeit bei gegebenem Fahrbahnzustand so gewählt wird (bzw. werden sollte), dass innerhalb der effektiven Sichtweite das Fahrzeug angehalten werden kann.

Die effektive Sichtweite in [m] ergibt sich aus den vorgenannten Ansätzen.

Aus der Umkehrung der Näherungsformel für den Anhalteweg auf gerader Strecke, wie sie in der Literatur [FGSV 1968] [ROOS et al., 2005] [Straßenverkehrstechnik 2008] beschrieben ist, errechnet sich die Geschwindigkeit V_{\max} bei gegebener effek-

tiver Sichtweite SW und dem effektiven Kraftschlussbeiwert (friction) μ , welcher sich aus dem herrschenden Fahrbahnzustand ergibt:

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

Formel 8

mit

- μ = effektiver tangentialer Kraftschlussbeiwert (friction coefficient) [-]
- s = Längsneigung der Strecke [-]
- SW = effektive anzusetzende Anhaltesichtweite in [m]
- g = Erdbeschleunigung in [m/s²] (= 9,806 m/s²)
- t_g = Gesamtverlustzeit in [s]
- V_{\max} = maximale Fahrgeschwindigkeit in [km/h] aufgrund der Sichtweite

Beim Ansatz des effektiven Kraftschlussbeiwertes müssen Annahmen über die durchschnittliche Beschaffenheit der Fahrzeugreifen getroffen werden.

Das Geschwindigkeitsmodell kommt zum Ansatz bei Schneebedeckung und Glatteis (über den Kraftschlussbeiwert). Bei Nässe sollte das Aquaplaning-Modell verwendet werden.

Im Folgenden sind noch die Parameter Verlustzeit und Längsneigung beschrieben.

4.3.2.1.1 Gesamtverlustzeit

Die Gesamtverlustzeit ist diejenige Zeit, welche effektiv verstreicht zwischen dem Auftauchen des die Vollbremsung auslösenden Hindernisses in Sichtweite und dem Einsetzen der vollen Bremswirkung. Im Detail besteht die Verlustzeit aus der reinen Reaktionszeit des Fahrers (Zeit, in der die Bremsung noch nicht eingeleitet ist, also das Fahrzeug mit unverminderter Geschwindigkeit weiterfährt) und der Schwellen- bzw. Ansprechzeit der Bremsung selbst (die Zeit zwischen dem Einleiten der Bremsung und der vollen Bremswirkung), siehe dazu auch [ROOS et al., 2005].

Die Reaktionszeit des Fahrers geht voll in die Gesamtverlustzeit ein, während die Schwellenzeit zur Hälfte in die Gesamtverlustzeit eingeht.

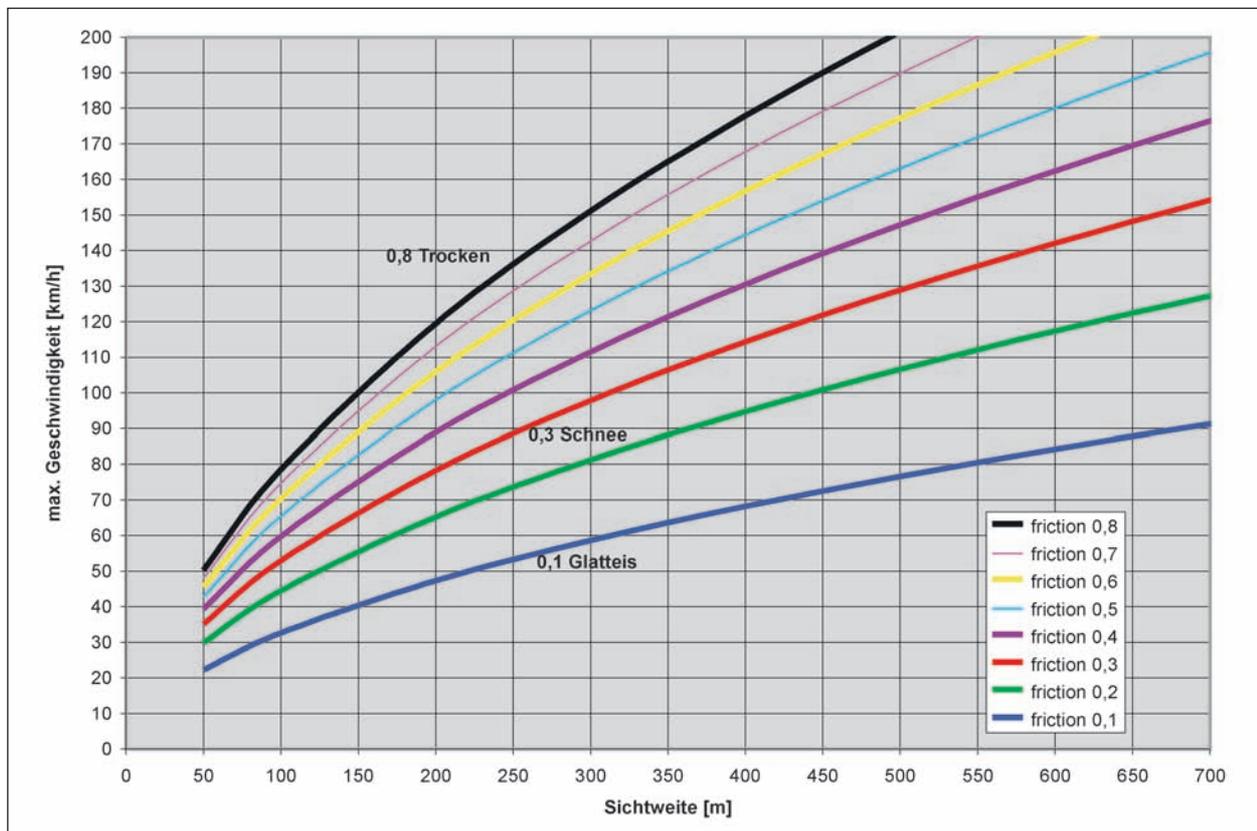


Bild 4-17: Modellergebnisse: maximale Geschwindigkeit aufgrund der Anhaltesichtweite

Für diese Modellansätze kann mit einer Gesamtverlustzeit von ca. 1,8 s gearbeitet werden.

$s > 0 \rightarrow$ Steigung
(= Erhöhung der Bremswirkung)

4.3.2.1.2 Längsneigung der Strecke

Die positive und negative Längsneigung (Steigung oder Gefälle) der Fahrbahnoberfläche in Fahrtrichtung geht mit derselben Gewichtung in den Anhalteweg ein, wie der Kraftschlussbeiwert.

s = Längsneigung (dimensionslos)

h = Höhenunterschied der Strecke

l = Länge der Strecke

$s < 0 \rightarrow$ Gefälle

(= Verminderung der Bremswirkung)

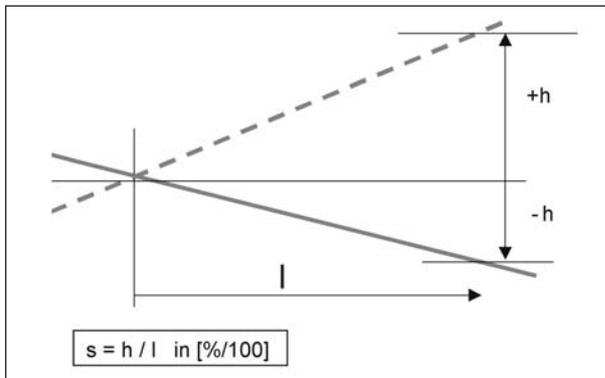


Bild 4-18: Definition der Längsneigung einer Strecke

4.3.2.2 Modell für die Aquaplaning-Geschwindigkeit

Auch im Winter sind die Fälle mit Nässe auf der Fahrbahn im Prinzip häufiger als die Fälle mit Schnee oder Glatteis, Letztere kommen im Autobahnbereich, wie schon erwähnt, äußerst selten vor.

Die wesentlichen theoretischen Grundlagen zu Aquaplaning finden sich in [HERRMANN, 2008], dort wurde auch ein Simulationsmodell PLANUS entwickelt. Ebenso sind in [ROOS et al., 2005] einige Grundlagen zu finden.

Unter der Aquaplaning-Geschwindigkeit sei diejenige Geschwindigkeit verstanden, bei der das Aufgleiten des Reifens auf den Wasserfilm beginnt. Durch das Aufgleiten geht die Haftung verloren, und es entsteht ein fahrdynamisch kritischer Zustand.

Der bestimmende Einflussfaktor des Fahrbahnzustandes auf den Aquaplaning-Effekt ist die Wasserfilmdicke (WFD) oder auch Wasserfilmhöhe (WFH). Der Aquaplaning-Effekt ist zudem von einer Vielzahl an weiteren Einflussfaktoren abhängig (s. Bild 4-19). Die wesentlichen sind dabei die Textur bzw.

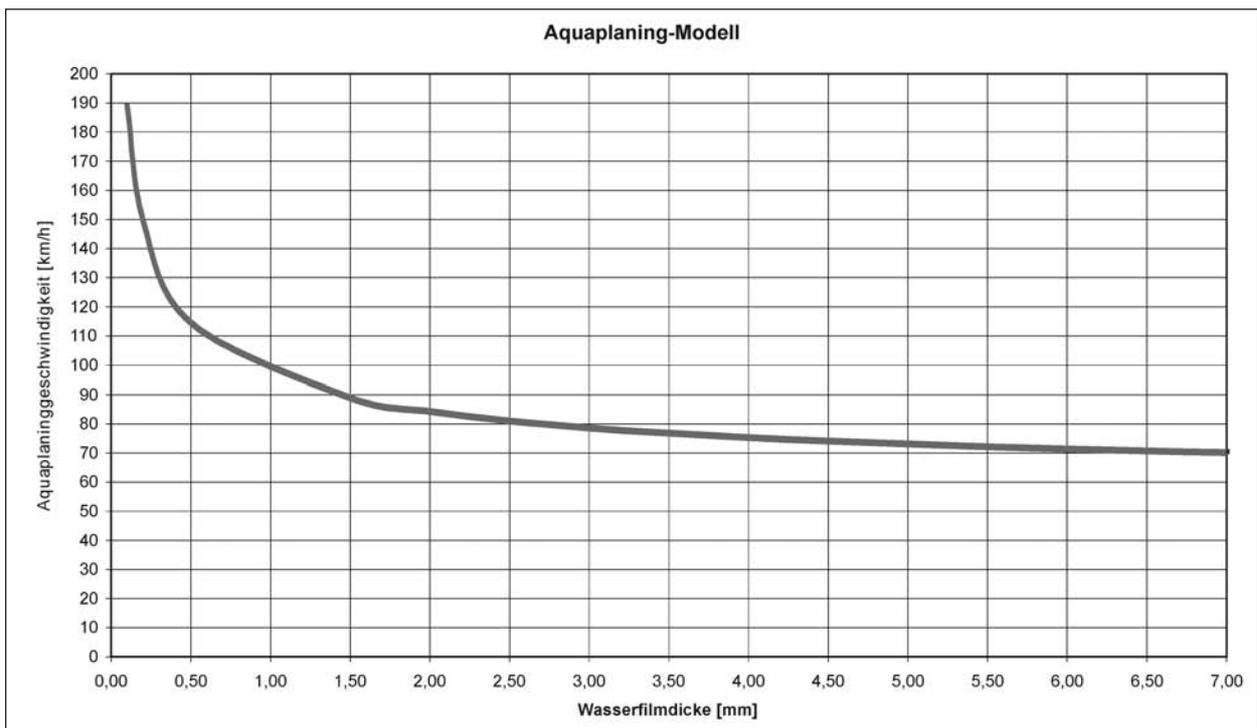


Bild 4-19: Modell: Aquaplaning-Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Wasserfilmdicke

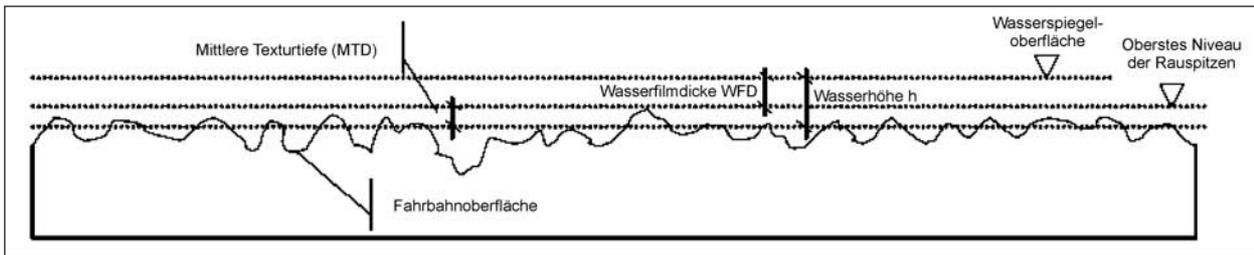


Bild 4-20: Darstellung der Wasserfilmdicke und der mittleren Textur-Rautiefe

Rautiefe des Fahrbahnbelages und die Beschaffenheit der Reifen und deren Profiltiefe. Allerdings spielt auch die Beschaffenheit der Fahrzeuge eine gewisse Rolle. Über diese Einflussfaktoren müssen im Modellansatz notgedrungen Annahmen getroffen werden, welche die durchschnittlichen Verhältnisse in der Praxis widerspiegeln. Der folgende empirisch gefundene „makroskopische“ Modellansatz [GALLAWAY et al., 1972], [GENGENBACH, 1967] ist für dieses Projekt und die in der Praxis häufig vorkommenden Wasserfilmdicken und Fahrbahnverhältnisse am besten anwendbar und stimmt auch relativ gut mit den analysierten Verkehrs- und Umfelddaten überein:

$$V_{aq} = 54,26 + \frac{42,84}{\sqrt{WFD}} \quad \text{Formel 9}$$

mit

WFD = Wasserfilmdicke in [mm]

V_{aq} = Aquaplaning-Geschwindigkeit in [km/h]

4.3.2.2.1 Wasserfilmdicke und Niederschlag

Die von Fahrbahnsonden in Umfelddatenstationen messtechnisch ermittelte Wasserfilmdicke WFD wird in der Einheit mm gemessen. Dies entspricht der Größe Liter/m² flüssige Benetzung. 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 durchgeführt werden kann.

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

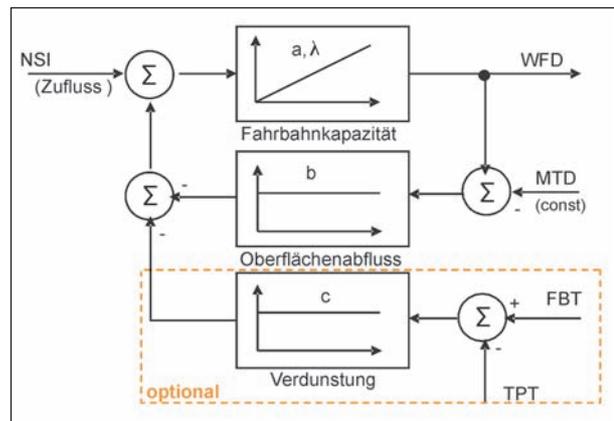


Bild 4-21: Systemdiagramm des Wasserfilmhöhen-Modells

Für die Anwendung des Aquaplaning-Modells wird die bereits durch die mittlere Textur-Rautiefe bereinigte Wasserfilmdicke verstanden. Wenn gemessene Wasserfilmhöhen verwendet werden, müsste streng genommen die Textur-Rautiefe des Querschnitts bekannt sein und entsprechend berücksichtigt werden.

Von den analysierten Querschnitten sind leider keine Textur-Rautiefen bekannt. Bei den Straßenwetterstationen des Systemanbieters micks MSR GmbH wurden die Wasserfilmhöhen zum Teil durch Anwendung des Wasserfilmhöhen-Modells aus dem Niederschlag ermittelt. Dadurch wurde auch eine durchschnittliche Texturtiefe berücksichtigt.

Das Wasserfilmhöhen-Modell ist in Bild 4-21 dargestellt.

Das Modell [SCHEDLER, 1998] 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 At-

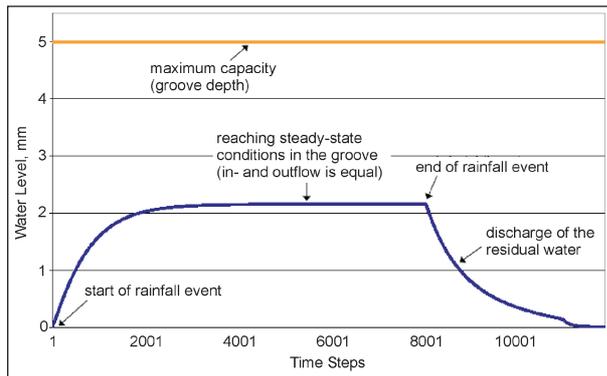


Bild 4-22: Phasen des Oberflächenabflusses.
Quelle: [RESSEL, 2008]

mosphäre mit dem Koeffizienten c . Das Verhalten entspricht auch ziemlich genau dem in [RESSEL, 2008] beschriebenen Verlauf der Wasserfilmhöhe (Bild 4-22).

Da bei den Umfelddaten-Stationen die Verkehrsdaten nicht berücksichtigt werden können, fehlt streng genommen auch ein Term für den Abtrag des Wasserfilms aufgrund der herrschenden Verkehrsstärke.

4.3.2.3 Modell für die Schleuder-Geschwindigkeit

Grundsätzlich gilt das zuvor beschriebene Modell für die maximale Geschwindigkeit aufgrund des Anhalteweges nur bei gerader Strecke. Bei Kurvenfahrt teilt sich der Kraftschluss in tangentialen und radialen Kraftschluss auf. Für den Anhalteweg in Fahrtrichtung steht nicht mehr der volle Kraftschluss zur Verfügung. Diese Aufteilung ist geschwindigkeitsabhängig. Beim beschriebenen Modell wurde aber bewusst auf die Berücksichtigung des Kurvenradius des Querschnittes verzichtet. Stattdessen wird bei Kurvenstrecken die so genannte Schleuder-Geschwindigkeit bei einem gegebenen Fahrbahnzustand berücksichtigt.

Unter Schleuder-Geschwindigkeit soll diejenige Fahrgeschwindigkeit verstanden werden, bei der das Fahrzeug gerade noch nicht ins Schleudern gerät.

Ein Fahrzeug gerät bei Kurvenfahrt ins Schleudern, wenn die parallel zur Fahrbahnebene wirkende Komponente aus Fliehkraft und Fahrzeuggewicht die zwischen Reifen und Fahrbahn wirkende Reibungskraft erreicht bzw. übersteigt [Straßenverkehrstechnik, 2008].

Im Detail betrachtet ist natürlich der Schleudervorgang je nach Beschaffenheit und Ausstattung des Fahrzeuges sehr komplex. Für diesen Modellansatz genügen einige Vereinfachungen (z. B. wird das Fahrzeug als ein Massepunkt betrachtet). Für die Schleudergrenze kann folgender Ansatz für die maximale Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom gerade herrschenden effektiven Kraftschlussbeiwert (der sich aus dem Fahrbahnzustand ergibt) gewählt werden:

$$V_{schl} = \sqrt{g \cdot R \cdot (\mu + q)} \quad \text{Formel 10}$$

mit

g = Gravitationsbeschleunigung in $[m/s^2]$
(= 9,81)

R = Kurvenradius in $[m]$

μ = Kraftschlussbeiwert (friction coefficient)
(Haftreibung)

q = Querneigung der Fahrbahn

4.3.2.3.1 Querneigung der Fahrbahn

Wie bei der Längsneigung wirkt die Querneigung auf die Fahrdynamik wie der Kraftschlussbeiwert.

Die Querneigung ist im Sinne des Modellansatzes wie folgt definiert:

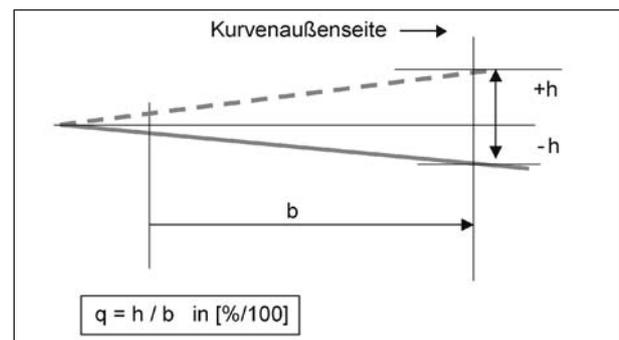


Bild 4-23: Definition der Querneigung

q = Querneigung

h = Erhöhung oder Erniedrigung der Fahrbahn

b = Breite der Fahrbahn

$q < 0$ Neigung zur Außenseite

(= Verminderung der Querhaftung)

$q > 0$ Kurverhöhung

(= Verbesserung der Querhaftung)

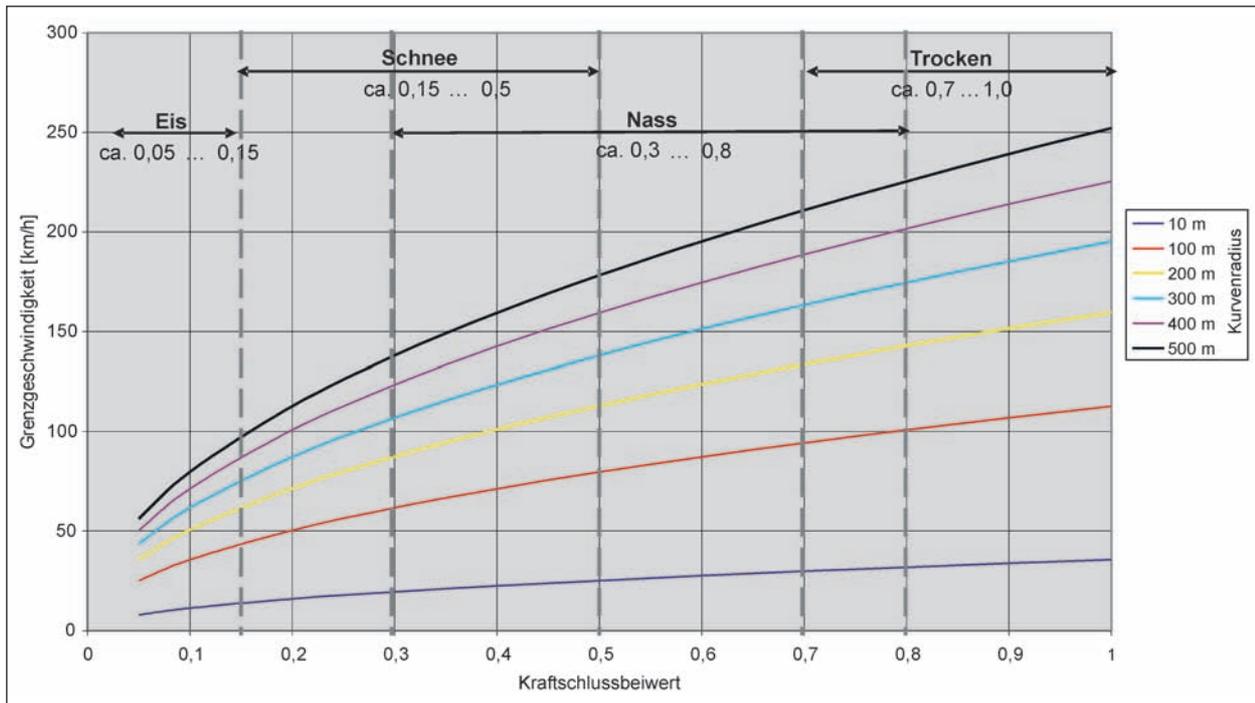


Bild 4-24: Modellergebnisse: Schleuder-Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom radialen Kraftschlussbeiwert (Reibungsbeiwert) und dem Kurvenradius ohne Berücksichtigung der Querneigung

Auch bei gerader Strecke wirkt sich eine vorhandene Querneigung auf die Fahrdynamik aus. Diese kann aber bei den im Autobahnbereich vorkommenden Querneigungen außerhalb Kurven (siehe Kapitel 4.3.2.1) und bei der Schleudergrenze außer Acht gelassen werden.

Bild 4-24 zeigt die Schleuder-Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Kraftschlussbeiwertes (im Sinne des Modellansatzes und in Abhängigkeit des witterungsbedingten Fahrbahnzustandes) und bei verschiedenen Kurvenradien.

4.4 Wetterklassen und deren Kapazitäten für den Pilotbetrieb

Die Ergebnisse der Analyse und des Modellansatzes sind für den Pilotbetrieb nach folgenden Vorgaben aufzubereiten:

- Aus den zur Verfügung stehenden Wetterdaten, insbesondere aus der Wetterprognose des DWD, sind so wenige Wetterklassen wie möglich und so viele wie nötig zu bilden.
- Die Kapazität einer Strecke bei einer Wetterklasse ist in Form eines prozentualen Abschlagfaktors, ausgehend von den Kapazitäten in der aktuellen HBS bei unkritischen Wetterbedingungen, auszudrücken.

- Ausgehend vom häufigsten Fall einer 2-streifigen Autobahn sind die Kapazitäten für die übrigen Arten und Parameter von Autobahnstrecken (3- bis 4-streifig, Lkw-Anteil, Geschwindigkeitsbegrenzung etc.) von der jeweiligen HBS-Kapazität mit gleichem Abschlagsfaktor abzuleiten.

4.4.1 Einfacher Modellansatz für die Kapazität

Bild 4-25 soll den vereinfachten Modellansatz für die Kapazität verdeutlichen.

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 ausgeführt, gilt die Arbeitshypothese, dass die Verkehrsdichte k_{krit} im Bereich der Kapazität (= maximale Verkehrsstärke) bei allen Wetterzuständen in etwa gleich angesetzt werden kann. Dazu gehört eine zur HBS-Kapazität passende Geschwindigkeit V_{krit} .

Die beiden Referenzwerte V_{krit} und k_{krit} sind diejenige Geschwindigkeit und diejenige Verkehrsdichte, bei denen der fließende Verkehr in gestörten Verkehr übergeht. Sie sind in Kapitel 4.4.3.1 näher erläutert. Die in Abhängigkeit der jeweiligen Fahrbahnzustands-Klasse (FBZ_i) anzusetzende Geschwindigkeit bei geringer Verkehrsdichte wird mit $V_0(\text{FBZ}_i)$ bezeichnet. Die nach HBS anzusetzende freie Geschwindigkeit der Strecke bzw. des Querschnittes wird mit V_0 bezeichnet.

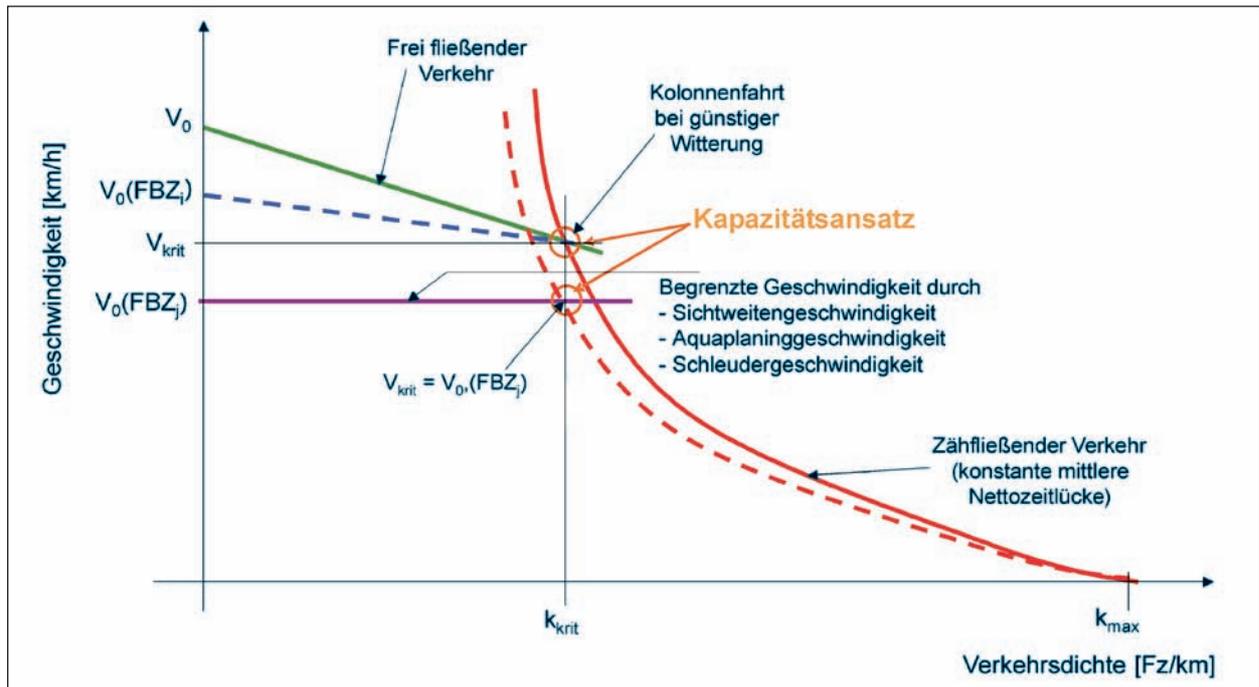


Bild 4-25: Modellansatz zur Ermittlung der Kapazität nach Wetterklassen. Darstellung im k-v-Diagramm [WU, 2000]

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Kapazität und des Kapazitätsabschlagsfaktors für einen repräsentativen Querschnitt und die verschiedenen Wetterklassen kann Bild 4-26 entnommen werden und ist im Folgenden beispielhaft erläutert.

Zuerst (im Ablaufdiagramm A) werden gemäß Kapitel 4.4.2 die Klassenkriterien und Grenzwerte festgelegt. Die Grenzwerte können Tabelle 4-7 entnommen werden. Nachfolgend werden für die Klasse repräsentative Referenzwerte (im Ablaufdiagramm B) gesucht. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 4-8 zu finden.

Folgende Beispielrechnung für die relativ selten auftretende Wetterklasse 9 soll die weitere Vorgehensweise bei der Ermittlung der Kapazitätsabschlagswerte verdeutlichen. Dabei werden bereits die zuletzt überarbeiteten Wetterklassen (siehe Kapitel 4.4.4) zugrunde gelegt.

Zunächst wird mit den Referenzwerten für die Klasse 9 die Sichtweite berechnet (im Ablaufdiagramm C). Im Modell über die Sichtbehinderung bei Niederschlag werden die verkehrlich wirksamen kurzzeitigen Intensitäten (NSI) auf Basis 15 min verwendet. Dabei wird in der Klasse 9 mit einem Referenzwert für die Intensität für Schneefall in Höhe von ca. 2,7 mm/15 min (NSI = 10,7 mm/h – siehe Tabelle 4-8) gearbeitet. Nach Anwendung des Modells (siehe Kapitel 4.3.1.4.7) ergibt sich eine Sicht-

weite von ca. 67 m. Im Vergleich zur durchschnittlich angenommenen konstruktiven Haltesichtweite (siehe Tabelle 4-6) stellt dieser Wert eindeutig das Minimum dar.

Danach werden die drei Modelle für die maximale freie Geschwindigkeit angewendet. Für die maximale Geschwindigkeit wegen Sichtweite (im Ablaufdiagramm: D – nähere Erläuterung zum Modell in Kapitel 4.3.2.1) kommt bei 67 m und dem Referenzwert für den Kraftschlussbeiwert von 0,35 (siehe Tabelle 4-8) eine Geschwindigkeit von 46 km/h heraus. Für den Aquaplaning-Effekt bei Schneematsch kommt eine Grenzgeschwindigkeit (im Ablaufdiagramm: E – nähere Erläuterung zum Modell in Kapitel 4.3.2.2) von ca. 79 km/h heraus. Für die Schleudergeschwindigkeit (im Ablaufdiagramm: F – nähere Erläuterung zum Modell in Kapitel 4.3.2.3) ergibt sich 149 km/h bei dem für überwiegend gerader Strecke angenommenen relativ großen Kurvenradius (siehe Tabelle 4-6).

Als Minimum für die freie Geschwindigkeit in dieser Klasse bleibt somit ein Wert von 46 km/h übrig. Zusammen mit der kritischen Verkehrsdichte von 36 Fz/km (siehe auch Kapitel 4.4.3.1) führt dies zu einer Kapazität von 1.656 Fz/h. Im Vergleich zur HBS-Kapazität für 2-streifige freie Autobahnstrecken in Höhe von 3.600 Fz/h ergibt dies einen Kapazitätsabschlagswert von 54 %.

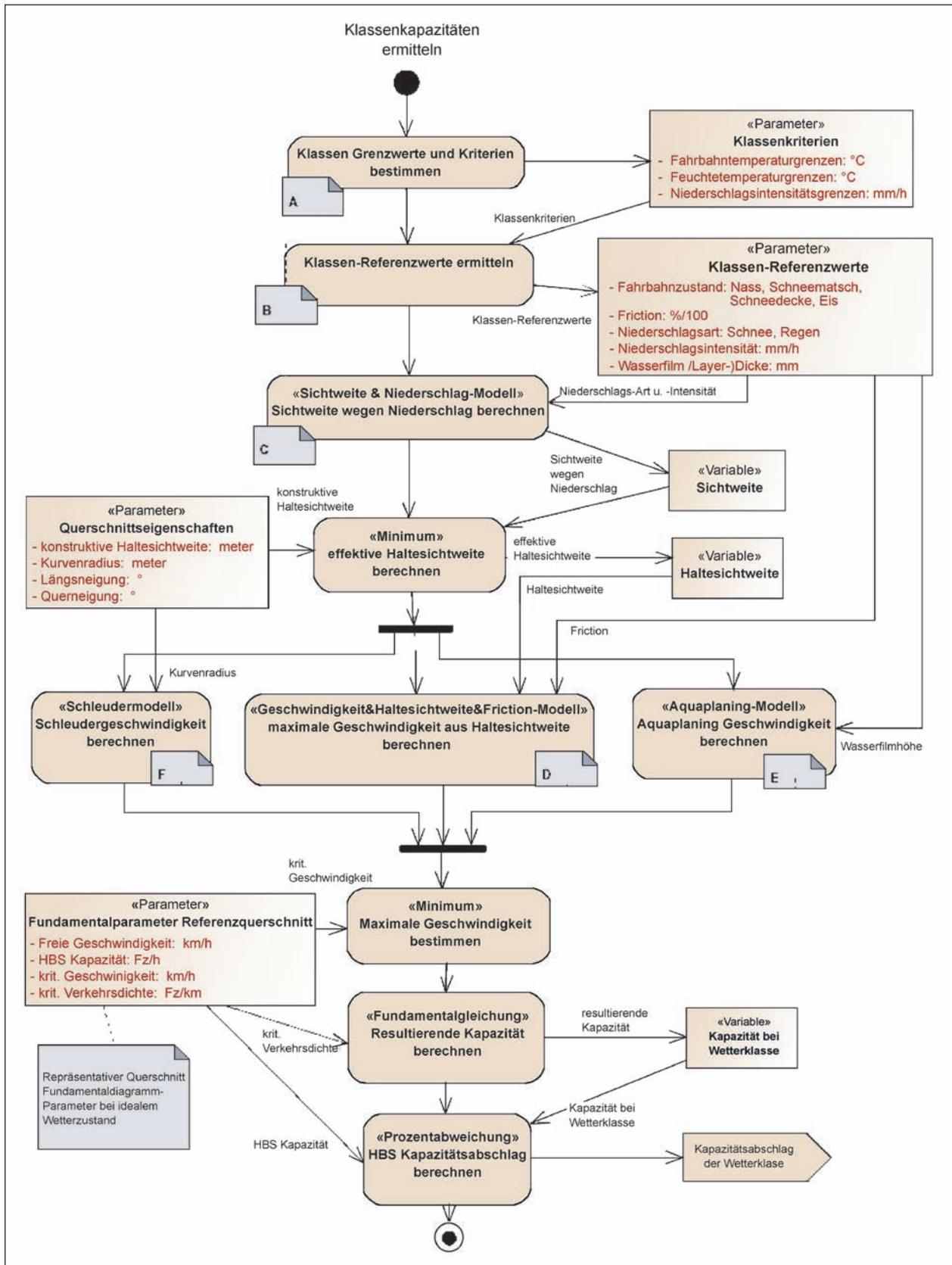


Bild 4-26: Ablaufdiagramm Bestimmung der Wetterklassen-Kapazitäten für einen repräsentativen Querschnitt

4.4.2 Wetterklassen

Bei der Festlegung der Wetterklassen gilt der Grundsatz: so wenige Klassen wie möglich, aber so viele wie nötig. Zu den Klassierungskriterien werden die in Tabelle 4-2 genannten Datentypen herangezogen.

Zu Beginn des zweiten Validierungsabschnitts der Pilotstudie im Winterhalbjahr 2009/2010 sind die in Tabelle 4-3 dargestellten Klasseneinteilungen gewählt worden.

Zeichen	Datentyp	Bemerkung
NSA	Niederschlagsart [Regen, Schnee, kein]	Art des Niederschlags. Unterscheidung in Regen oder Schnee bzw. kein Niederschlag. Die Niederschlagsart kann in Messdaten oder Prognosen auch fehlen. Dann wird hilfsweise die Feuchttemperatur herangezogen.
NSI	Niederschlagsintensität [mm/h]	Eine zumindest grobe Unterscheidung in mäßigen und starken Niederschlag ist notwendig. Insbesondere bei starkem Schneefall kommt Sichtbehinderung dazu.
FT	Feuchttemperatur [°C]	Diejenige Temperatur, welche ein Niederschlagspartikel annimmt, wenn es durch die Atmosphäre fällt. Die Feuchttemperatur ist näherungsweise der Mittelwert zwischen Lufttemperatur und Taupunkttemperatur. Liegt die Feuchttemperatur unter dem Gefrierpunkt, ist näherungsweise von gefrorenem Niederschlag, hauptsächlich Schnee, auszugehen.
FBT	Temperatur der Oberfläche der Fahrbahn [°C]	Eisbildungsgefahr setzt erfahrungsgemäß in der Praxis auf Autobahnen (bei ständig stattfindendem Winterdienst) erst bei deutlicher Unterschreitung der Gefrieretemperatur ein (< -2 °C). Da die tatsächliche Gefrieretemperatur in den Datenanalysen und in der Prognose nicht bekannt ist, muss von unterhalb -2 °C ausgegangen werden (siehe Bild 4-27).

Tab. 4-2: Für die Wetterklassifizierung verwendbare Datentypen

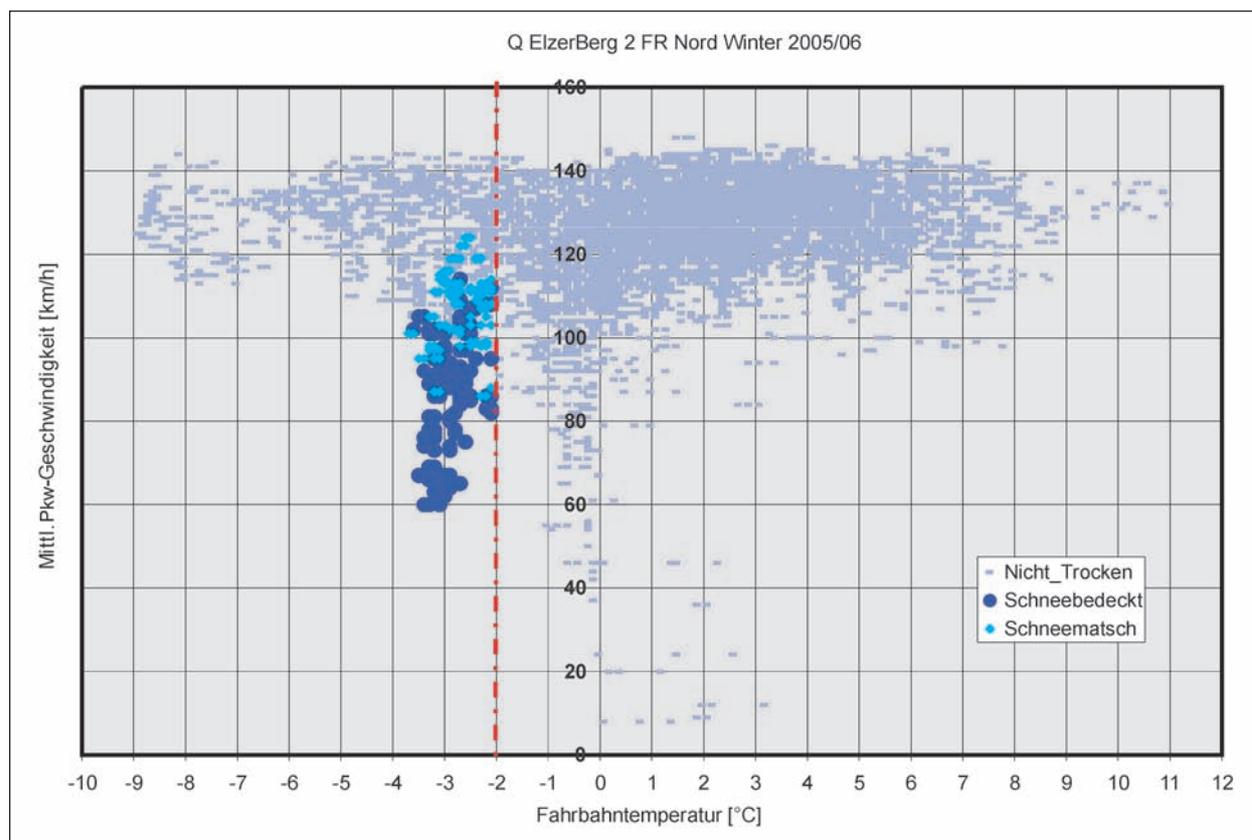


Bild 4-27: Beispiel für eine Verteilung der mittleren Pkw-Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der FBT

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

Tab. 4-3: Einteilung nach Wetterklassen und deren Kriterien

Wetterklasse		Referenzwerte für Modellansatz				
Klasse	Kurzbezeichnung	NSI [mm/h]	WFD [mm]	FC [-]	Kapazität 2-streifig [Fz/h]	Abschlag 2-streifig
1	Trocken	0	0	0,8	3.600	0 %
2	Nass_mRE	4	1	0,7	3.492	-3 %
3	Glaette_mRE	4	0,6	0,2	2.340	-35 %
4	Nass_sRE	10	2	0,5	3.060	-15 %
5	Matsch_mSCH	4	1	0,4	3.492	-3 %
6	Schnee_mSCH	4	2	0,35	3.060	-15 %
7	Matsch_sSCHm	10	2	0,4	2.160	-40 %
8	Schnee_sSCHm	10	2	0,35	1.656	-54 %

Legende:
 NSI = Niederschlagsintensität in [mm/h]
 WFD = Wasserfilmdicke in [mm]
 FC = Friction Coefficient = Kraftschlussbeiwert [-]
 Kapazität = maximale Verkehrsstärke in [Fz/h] in der Wetterklasse (SV-Anteile 10-15 %)

Tab. 4-4: Kapazitätsabschlagsfaktoren für die Wetterklassen und deren Referenzwerte

4.4.3 Ermittlung der Kapazitätsminderungsfaktoren

Unter Anwendung der in Kapitel 4.4.1 beschriebenen Vorgehensweise und der Modellansätze können für einen repräsentativen Querschnitt die in Tabelle 4-4 dargestellten Abschlagsfaktoren in Abhängigkeit der Wetterklasse ermittelt werden. Die Referenzwerte für die einzelnen Klassen (siehe auch Kapitel 4.4.3.1) werden in der Legende genannt.

Die gleichen Faktoren werden dann ausgehend von der jeweiligen im HBS definierten Kapazität für 3- und 4-streifige BAB-Richtungsfahrbahnen und für die übrigen Bedingungen angewendet. Diese Werte sind in Tabelle 4-5 zusammengestellt.

Klasse	Kurzbezeichnung	Abschlag	Kapazität	
			3-streifige AB	4-streifige AB
1	Trocken (= HBS)	0 %	5.200	7.100
2	Nass_mRE	-3 %	5.044	6.887
3	Glaette_mRE	-35 %	3.380	4.615
4	Nass_sRE	-15 %	4.420	6.035
5	Matsch_mSCH	-3 %	5.044	6.887
6	Schnee_mSCH	-15 %	4.420	6.035
7	Matsch_sSCHm	-40 %	3.120	4.260
8	Schnee_sSCHm	-54 %	2.392	3.266

Tab. 4-5: Kapazitäten für 3- und 4-streifige BAB nach Abschlagsfaktoren (SV-Anteile 10-15 %)

4.4.3.1 Erläuterungen zu den Referenzwerten der Klassen

Um mit Hilfe der Modellansätze die für die jeweilige Wetterzustands-Klasse repräsentativen Kapazitätswerte zu ermitteln, müssen für die Eingangsgrößen Niederschlagsintensität, Wasserfilmdicke und Kraftschlussbeiwert der Modelle entsprechende Referenzwerte gewählt werden.

Der jeweils innerhalb der Klassengrenzen liegende Referenzwert wurde zunächst aus Erfahrungswerten abgeschätzt und danach durch Anwendung der Modelle dahingehend optimiert, dass die Ergebnisse der am häufigsten in den ausgewerteten Verkehrsdaten zu beobachtenden Verkehrssituation innerhalb der jeweiligen Wetterzustands-Klasse entsprechen. Die gewählten (bzw. ausgewerteten) Referenzwerte für den Wetterzustand sind in der Tabelle 4-4 wiedergegeben.

Für die baulichen Eigenschaften des für die Ermittlung der Abschlagsfaktoren repräsentativen Querschnitts wurden die in Tabelle 4-6 genannten abgeschätzten Parameter verwendet.

Aus der Auswertung der 15-min-Werte für mittlere Pkw-Geschwindigkeiten und Verkehrsdichte der

ausgewählten Standorte bei ungestörten Witterungsverhältnissen können die verkehrlichen Referenzparameter V_{krit} und k_{krit} für das vereinfachte Kapazitätsmodell und den repräsentativen Querschnitt ermittelt werden.

Für den repräsentativen 2-streifigen Querschnitt ergibt sich folgender Referenzpunkt im v-k-Diagramm (Bild 4-28) für die maximale Verkehrsstärke (Kapazität) bei ungestörter Witterung:

Kritische Geschwindigkeit: 100 km/h,
 Kritische Verkehrsdichte: 36 Fz/km,
 (HBS-)Kapazität: 3.600 Fz/h.

Alle Referenzwerte gelten streng genommen für einen Schwerlastanteil von ca. 10 ... 15 %.

Parameter	Einheit	Wert
Bauliche Haltesichtweite	Meter	300
Kurvenradius	Meter	> = 500
Längsneigung	°	< 2
Querneigung	°	< 2

Tab. 4-6: Referenzwerte für die baulichen Eigenschaften des repräsentativen Querschnittes

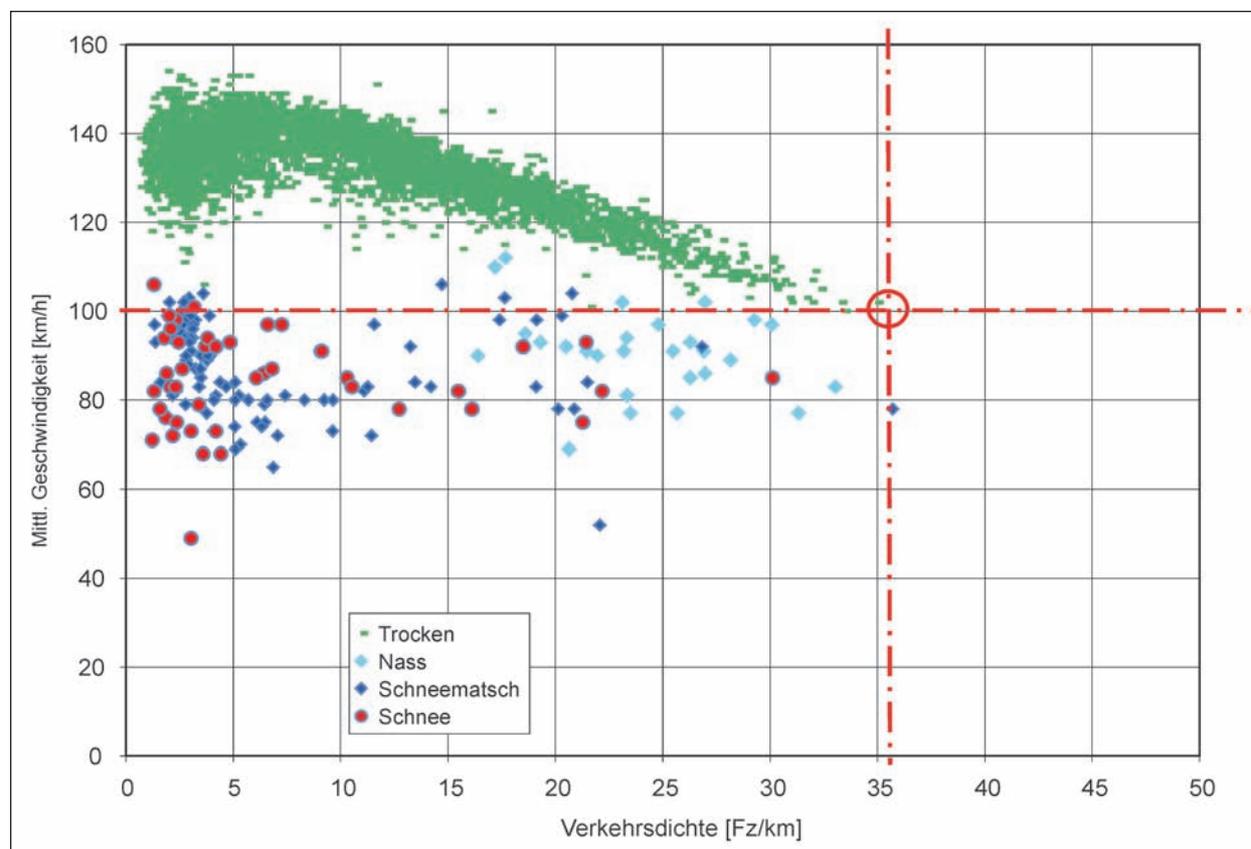


Bild 2-28: Referenzpunkt für kritische Geschwindigkeit und Verkehrsdichte im v-k-Diagramm (2-streifig) (SV-Anteile 10-15 %)

4.4.4 Überarbeitete Wetterklassen

Die während des Pilotversuches aufgetretenen Prognosewerte für die Niederschlagsintensität hatten zur Folge, dass die Wetterklassen für starke Niederschläge so gut wie nie erreicht worden sind.

Dazu wurde zusammen mit dem Deutschen Wetterdienst und den zur Verfügung gestellten Wetterdaten einer synoptischen Wetterstation mit genaueren Niederschlagsmessgeräten eine zusätzlich Auswertung durchgeführt und nachfolgend geänderte Klassenkriterien festgelegt (siehe Tabelle 4-7).

Die Kriterien für die überarbeiteten Wetterklassen ergeben sich aus Tabelle 4-7.

4.4.4.1 Kapazitätsabschlagsfaktoren für die neuen Wetterklassen

Aus den überarbeiteten Klassenkriterien ergeben sich in einigen Wetterklassen geänderte Referenzwerte für die repräsentativen Wetterzustände. Diese sind in Tabelle 4-8 aufgeführt.

Die gleichen Faktoren werden dann ausgehend von der jeweiligen im HBS definierten Kapazität für 3- und 4-streifige BAB-Richtungsfahrbahnen und für die übrigen Bedingungen angewendet (siehe Tabelle 4-9).

Wetterklasse		Klassenkriterien			
Klasse	Kurzbezeichnung	NSA	NSI mm/h	FT °C	FBT °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

Tab. 4-7: Überarbeitete Wetterklassen und deren Kriterien

Klasse	Kurzbez.	NSI	WFD	FC	v(0)	v(krit.)	k(krit)	Kapazität	Abschlag
		mm/h	mm	--		2-streifig	2-streifig	2-streifig	2-streifig
1	Trocken	0	0	0,8	140	100	36	3.600	0 %
2	Nass_mRE	0,4	0,7	0,7	97	97	36	3.600	0 %
3	Glaette_mRE	0,4	0,7	0,2	65	65	36	2.952	-18 %
4	Nass_sRE	4	2	0,5	85	85	36	3.060	-15 %
5	Matsch_mSCH	0,4	1	0,4	97	97	36	3.492	-3 %
6	Schnee_mSCH	0,4	2	0,35	85	85	36	3.060	-15 %
7	Matsch_sSCHm	3	2	0,4	60	60	36	2.160	-40 %
8	Schnee_sSCHm	3	2	0,3	46	46	36	3.060	-15 %
9	Matsch_ssSCHm	10,7	2	0,35	46	46	36	1.656	-54 %
10	Schnee_ssSCHm	10,7	2	0,3	43	43	36	1.548	-57 %

Tab. 4-8: Kapazitätsabschlagsfaktoren für die überarbeiteten Wetterklassen und deren Referenzwerte sowie die sich ergebenden kritischen Geschwindigkeiten (SV-Anteile 10-15 %)

Klasse	Kurzbezeichnung	Abschlag	Kapazität	
		2-streifige	3-streifige AB	4-streifige AB
1	Trocken	0 %	5.200	7.100
2	Nass_mRE	0 %	5.200	7.100
3	Glaette_mRE	-18 %	4.264	5.822
4	Nass_sRE	-15 %	4.420	6.035
5	Matsch_mSCH	-3 %	5.044	6.887
6	Schnee_mSCH	-15 %	4.420	6.035
7	Matsch_sSCHm	-40 %	3.120	4.260
8	Schnee_sSCHm	-15 %	4.420	6.035
9	Matsch_ssSCHm	-54 %	2.392	3.266
10	Schnee_ssSCHm	-57 %	2.236	3.053

Tab. 4-9: Kapazitäten für überarbeitete Wetterklassen für 3- und 4-streifige BAB (SV-Anteile 10-15 %)

4.4.4.2 Erläuterungen zu den überarbeiteten Niederschlagsintensitätsgrenzen der Klasseneinteilung

Grundsätzlich ist bekannt, dass Niederschlagsintensitäten in der Realität sehr starke kurzfristige Schwankungen (Streuungen) aufweisen. In der Regel werden Niederschlagsintensitäten bei Straßenwetterstationen zwar auf die Stunde bezogen angegeben, aber in einem Messintervall von teilweise nur einer Minute gemessen bzw. innerhalb von maximal 10 Minuten ermittelt. Die in einem Intervall von einer Minute gemessenen Niederschlagsintensitäten (in mm/h) können auf Stundenbasis umgerechnet erheblich höher ausfallen als die in einer Stunde tatsächlich niedergehende Niederschlagsmenge im selben Zeitraum.

Die im Bereich der Umfelddatenstationen in der Verkehrsbeeinflussung und auch bei Glättemeldeanlagen üblichen kurzen Messintervalle (1 bis 10 Minuten) haben jedoch ihre Berechtigung, da auch kurzzeitig hohe Intensitäten der Niederschläge durchaus erhebliche verkehrliche Auswirkungen haben können.

Die Einteilung der Wetterklassen ging somit zunächst von den kurzen Messintervallen (5 ... 15 Minuten) aus. Die Prognosewerte des DWD, welche für die Pilotstudie verwendet werden, geben jedoch die während einer Stunde voraussichtlich anfallenden Niederschlagsmengen an. Durch die unterschiedliche Zeitauflösung sind die Werte und damit die Klassengrenzen nicht unmittelbar vergleichbar.

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Bezugsintervalle zu analysieren, wurden auf 10 min genaue Niederschlagsdaten von Wetterstationen des DWD ausgewertet.

Zudem wurden diese Werte noch mit der GMA Gernsheim 1 (ID 145) (DWD Kennung L917) verglichen.

Es ist davon auszugehen, dass die Niederschlagsmengen der DWD-Station an diesem Standort relativ genau sind. Diese stehen mit 10-min-Intervallen zur Verfügung. Diese auf Basis eines 10-min-Intervalls gemessenen Daten sind über eine Stunde zu integrieren. In diesem Fall waren die Niederschlagsmengen in mm pro h interessant. Allerdings waren keine Informationen über die Niederschlagsart und keine Temperaturen verfügbar.

Grundsätzlich ist zu erwarten, dass die Verteilung der Niederschlagsintensitäten bzw. -mengen einer Exponentialverteilung entspricht. D. h., kleine Intensitäten kommen grundsätzlich wesentlich häufiger vor als große. Weiter kann man davon ausgehen, dass Niederschlagsintensitäten, die in einem Intervall von 10 min gemessen werden, durchaus eine verkehrliche Auswirkung haben können.

Um die Frage zu beantworten, welche Intensitäten bei einer 1-h-Niederschlagsprognose mit verkehrlicher Auswirkung tatsächlich vorkommen können, kann man Streuungen nicht mit Hilfe der Standardabweichung bestimmen, da dies eine Normalverteilung voraussetzen würde. Die Mittelwerte müssten im Prinzip ohnehin nahezu gleich sein, was sich grundsätzlich auch in den Daten bestätigt. Daher kann man am ehesten die Maximalwerte vergleichen.

Bei den Werten, die im 10-min-Intervall gemessen wurden, kommen Niederschlagsintensitäten von maximal 11,9 mm/h vor, während bei den Niederschlagsmengen, die über 1 h aggregiert wurden, maximal 5,2 mm auftreten. Das entspricht einem Faktor von ca. 2,3. Mit anderen Worten kann man bei einer Prognose von Niederschlagsmengen, die für einen Zeitraum von einer Stunde gerechnet werden, davon ausgehen, dass kurzzeitig mehr als das Doppelte an Niederschlagsintensität mit verkehrlicher Auswirkung auftreten kann.

Der Vergleich mit der GMA-Station Gernsheim erscheint allerdings aus folgenden Gründen leicht problematisch:

- Die Standorte sind nicht uneingeschränkt vergleichbar,
- die GMA liefert Niederschlagsintensitäten in 5-min-Intervallen – es ist aber nicht sicher, ob diese wirklich aus einem 5-min-Messzyklus stammen. Es könnte sich dabei um 2- oder sogar 1-Minuten-Werte handeln.

Trotzdem wurde versucht, einen Vergleich der Erwartungswerte aus den vergleichbaren Niederschlagsintensitäten der GMA und der DWD-Station im gleichen Zeitraum (Jan. 2010) durchzuführen. Dabei ergibt sich ein Vergleichswert von DWD 0,7 mm/h und GMA 7,6 mm/h. Legt man zugrunde, dass es sich wirklich um 5-min-Werte handelt,

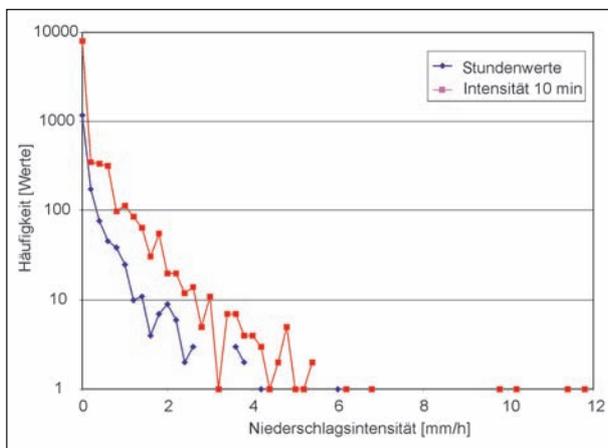


Bild 4-29: Verteilung der Niederschlagsintensitäten bei Messintervallen von 10 min und 1h

würde man bei der GMA hochgerechnet für einen ganzen Monat eine Niederschlagsmenge von 1.359 mm ermitteln, während die DWD-Station auf 78,5 mm Wasseräquivalent kommt. Die Summenwerte sollte man wegen der unsicheren Messzeitbasis aus der GMA nicht vergleichen. Unter Nutzung der beiden Mittelwerte ergibt sich ein Faktor von ungefähr 1:10. Die GMA Gernsheim würde also zehnmal zu hoch messen.

Im Januar dürfte es sich wegen der herrschenden Temperaturen überwiegend um Niederschlag in Form von Schnee gehandelt haben.

Die Verteilungen der Messwerte für Niederschlagsintensität der übrigen GMA (z. B. Haigertalbrücke, Elzer Berge) liegen eher im plausiblen Bereich und sind vergleichbar mit der DWD-Station in Bezug auf die Häufigkeitsverteilung der Intensitäten – weniger der direkte Vergleich im selben Zeitraum, da die geografische Entfernung dies nicht zulässt.

Neue Klassenfestlegung

Der Erwartungswert der Verteilung bietet sich als Klassengrenze an. Der Mittelwert aus allen Niederschlagsereignissen der zur Verfügung gestellten Daten liegt bei 0,55 mm Niederschlagsmenge in einer Stunde.

Setzt man dies als Klassengrenze an, können die Referenzwerte (siehe auch Kapitel 4.4.3.1) für das

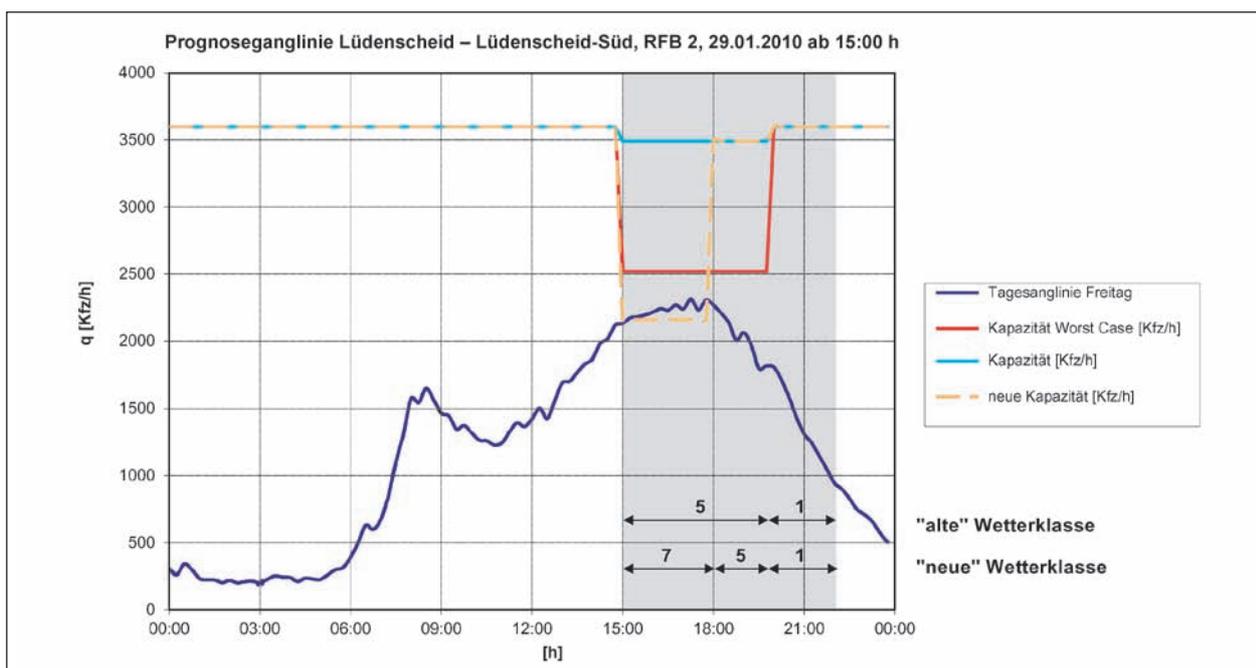


Bild 4-30: Nachträglicher Test der neuen Wetterklassen

Modell am ehesten dadurch festgelegt werden, dass man die Erwartungswerte innerhalb der Klasse verwendet und dann den oben ermittelten Faktor für die verkehrlich sich auswirkenden Niederschlagsintensitäten ansetzt.

Der Erwartungswert liegt bei der unteren Klasse bei 0,2 mm/h, das ergäbe dann einen Referenzwert von 0,46 mm/h.

Bei der hohen Klasse liegt der Mittelwert bei 1,0 mm/h mit Referenzwert 2,3 mm/h.

Die nach weiterer Diskussion endgültig festgelegten Klassenkriterien sind in Tabelle 4-7 aufgeführt.

Die vorgenannten neu definierten Wetterklassen mit ihren zugehörigen Abschlagsfaktoren erlauben eine feinere Differenzierung der Wetterprognose und somit auch der Kapazitätsprognose. Bild 4-30 zeigt einen beispielhaften A-posteriori-Test der neuen Wetterklassen. Bei Verwendung der neuen Wetterklassen hätte es eine Stauwarnung zwischen 15 h und 18 h gegeben, was auf eine differenziertere Auswertung prognostizierter Niederschlagsintensitäten zurückzuführen ist.

4.4.5 Fallbeispiele

4.4.5.1 Schneefall mit Schneematsch (26.12.2007, A 45 Haigertalbrücke 1)

Nachfolgend werden charakteristische Wettersituationen mit Auswirkungen auf den Verkehrsablauf anhand gemessener Daten analysiert.

Am 26.12.2007 um 8:00 h setzt Niederschlag in Form von Schneefall ein (NSA = 70 = Schneefall). Die Werte für Lufttemperatur und Taupunkt lassen auch auf gefrorenen Niederschlag schließen.

Die Wasserfilmdicke nimmt zu und schwankt. Die Fahrbahn hat durch Streueinsätze einen hohen Restsalzgehalt von 99 bis 100 %, was darauf hindeutet, dass der Schnee an der Oberfläche angetaut ist (leitfähige wässrige Lösung). Die Wasserfilmdicke nimmt zu, und der Restsalzwert ist nach wie vor hoch. Bei hohen Wasserfilmwerten kann der Restsalzmessung einigermaßen vertraut werden. Da der Wasserfilmwert nach Ende des Niederschlags relativ schnell zurückgeht, ist auch weniger von einer festgefahrenen Schneedecke auszugehen. Daher wird es sich wohl eher um Schneematsch gehandelt haben, teilweise mit Schneebedeckung.

Ein zweiter kurzer Niederschlag gegen 20:00 h unbestimmter Art hat keine signifikante verkehrliche

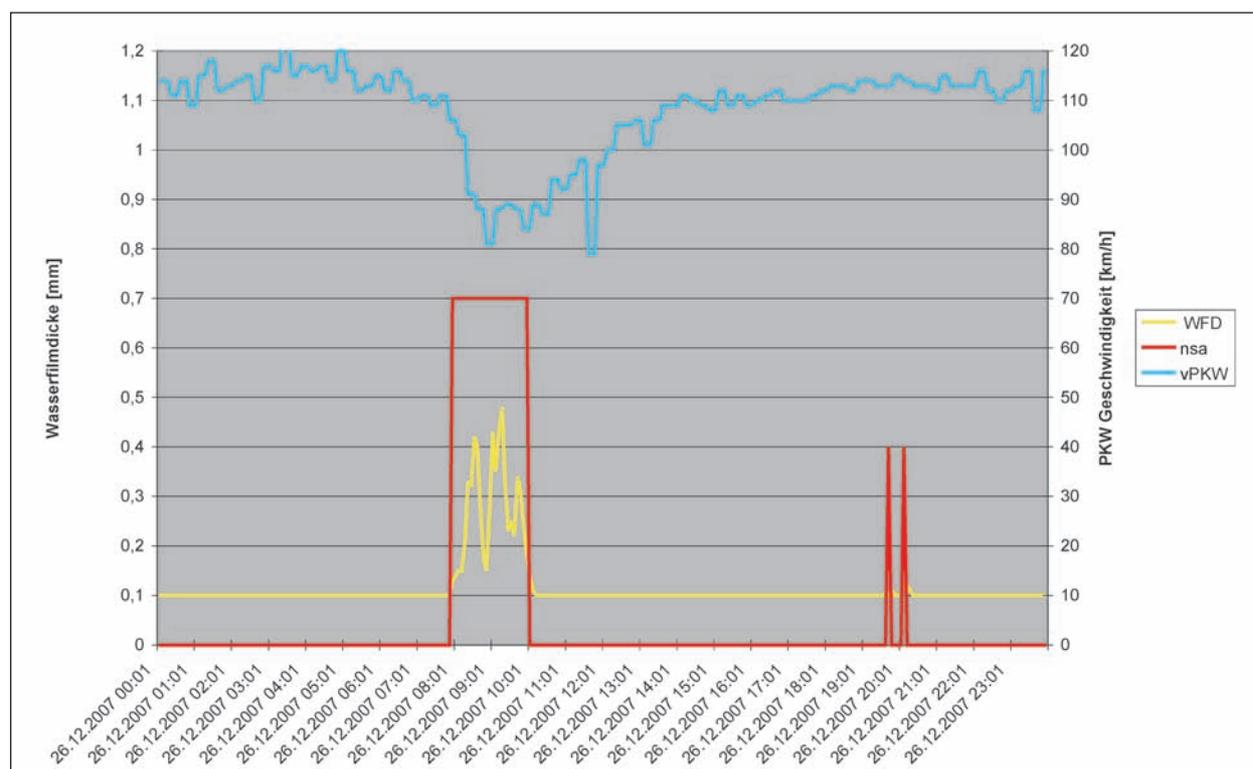


Bild 4-31: Verlauf Wasserfilmdicke (WFD), Niederschlagsart (nsa) und Pkw-Geschwindigkeit (v_{PKW}) am Fallbeispiel A 45 Haigertalbrücke, 26.12.2007

Auswirkungen. Dabei kann es sich um Regen oder allenfalls Schneeregen gehandelt haben. Die Fahrbahn war nass, keine Schneebedeckung.

Die Messung der Niederschlagsintensitäten in mm/h Wasseräquivalent ist nicht sehr genau. Insbesondere bei Schneefall sind die Intensitäten zu niedrig.

Es wurde im Durchschnitt mit hohen Schwankungen ca. 0,5 bis 0,6 mm/h gemessen. Insgesamt würde das einer Menge summiert von 1,2 mm (= Wassermenge in Liter/m²) entsprechen. Nach einer sehr groben Faustregel kann man bei 1 mm Wasseräquivalent von ca. 1 cm Schnee normaler Konsistenz ausgehen. Danach wären dies 1,2 cm Neuschnee. Es dürfte sich aber wahrscheinlich um mehr gehandelt haben – eventuell bis max. 5 cm. Ebenso liegt der WFD-Wert in diesem Fall bei Schneebedeckung erfahrungsgemäß zu niedrig, da nur der reine Wasseranteil bei der Messung berücksichtigt wird. Eine geschlossene festgefahrene Schneedecke mit geringem wässrigem Anteil würde von der WFD-Messung ohnehin nicht richtig erkannt.

Es ist während des Niederschlages und des entsprechenden Fahrbahnzustandes zu einer Verringerung der Geschwindigkeit gekommen. Die Ver-

kehrstärke lag vor dem Ereignis um 500 Fz/h und nahm auch während des Schneefalls kontinuierlich zu. Man kann daher davon ausgehen, dass die verringerten Geschwindigkeiten nicht der Verkehrslage, sondern allein dem Wetter geschuldet sind. Bei den Niederschlagsintensitäten ist noch keine sehr signifikante Sichtbehinderung zu erwarten, sodass im Wesentlichen der Fahrbahnoberflächenzustand die Fahrgeschwindigkeit bestimmt.

Damit kann während des Fahrbahnzustands „Schneebedeckt“ bis „Schneematsch“ eine durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit von ca. 85 km/h ausgemacht werden. Vor dem Ereignis wurden bei relativ niedriger Verkehrsstärke im Schnitt 115 km/h gefahren.

Nachdem der Niederschlag aufgehört hat, geht die WFD relativ schnell zurück, und die Fahrgeschwindigkeiten nehmen langsam zu. Es nimmt aber die Verkehrsstärke (gegen Mittag) erheblich zu, sodass diese wohl den Einfluss des besser werdenden Fahrbahnzustandes überlagert. Gegen ca. 11:30 h bricht die Geschwindigkeit kurzzeitig ein, die Verkehrsstärke ist hier auch am höchsten, und es sind an den Straßenwetterwerten keine signifikanten Veränderungen zu erkennen. Die Geschwindigkeiten gehen erst wieder hoch, als die Verkehrsstärke abnimmt.

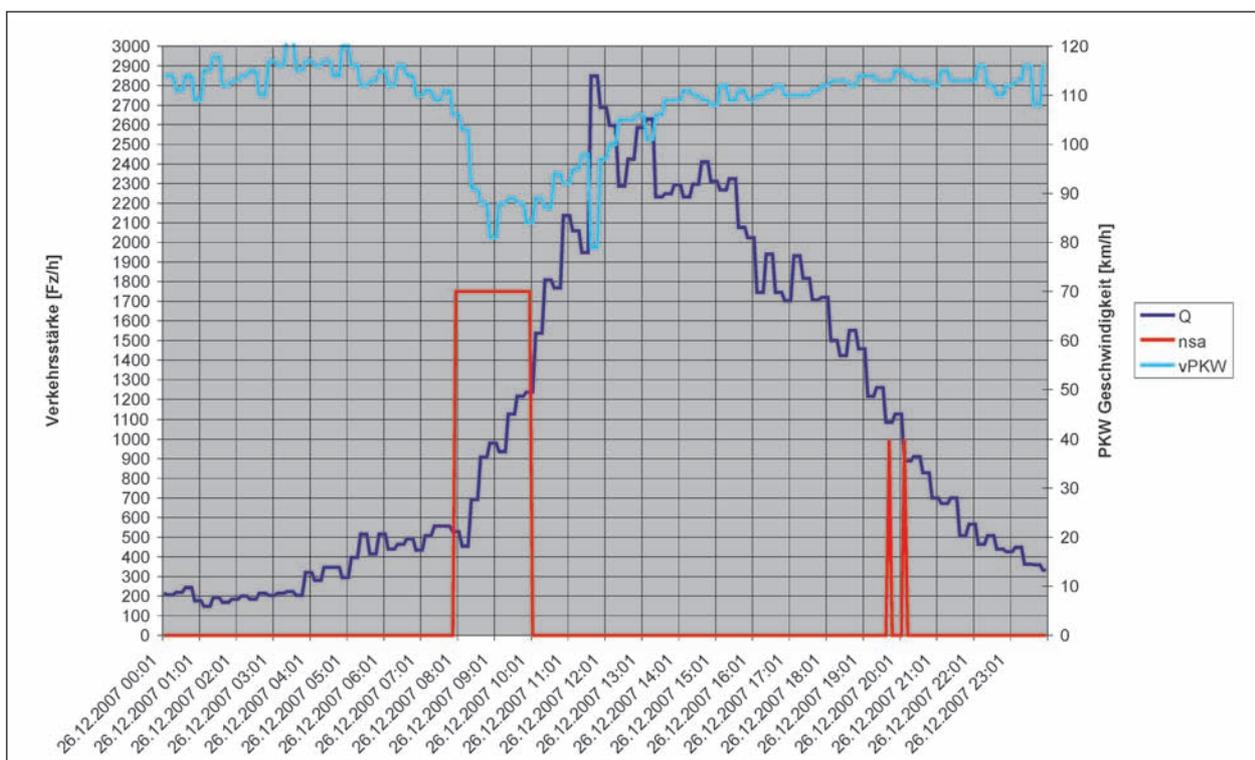


Bild 4-32: Verlauf Verkehrsstärke (Q), Niederschlagsart (nsa) und Pkw-Geschwindigkeiten (v_{PKW}) am Fallbeispiel A 45 Haigertalbrücke, 26.12.2007

4.4.5.2 Starker Regen (25.11.2007, A 45 Haigertalbrücke 1)

Das Fallbeispiel am 25.11.2007 zeigt den ganzen Tag mehr oder weniger starke Niederschläge. Temperaturen und Niederschlagsarten-Detektion ($n_{sa} = 60$) weisen eindeutig auf Regen hin. Der Fahrbahn-

zustand ist nass. Die Wasserfilmdicken erreichen hohe Werte. Im Wesentlichen folgt die WFD dem Integral der Niederschlagsintensität mit entsprechendem Abfluss. Trotz WFD von bis zu 1,7 mm und Niederschlagsintensitäten bis zu 5 mm/h sind bei niedriger Verkehrsstärke keine signifikanten Geschwin-

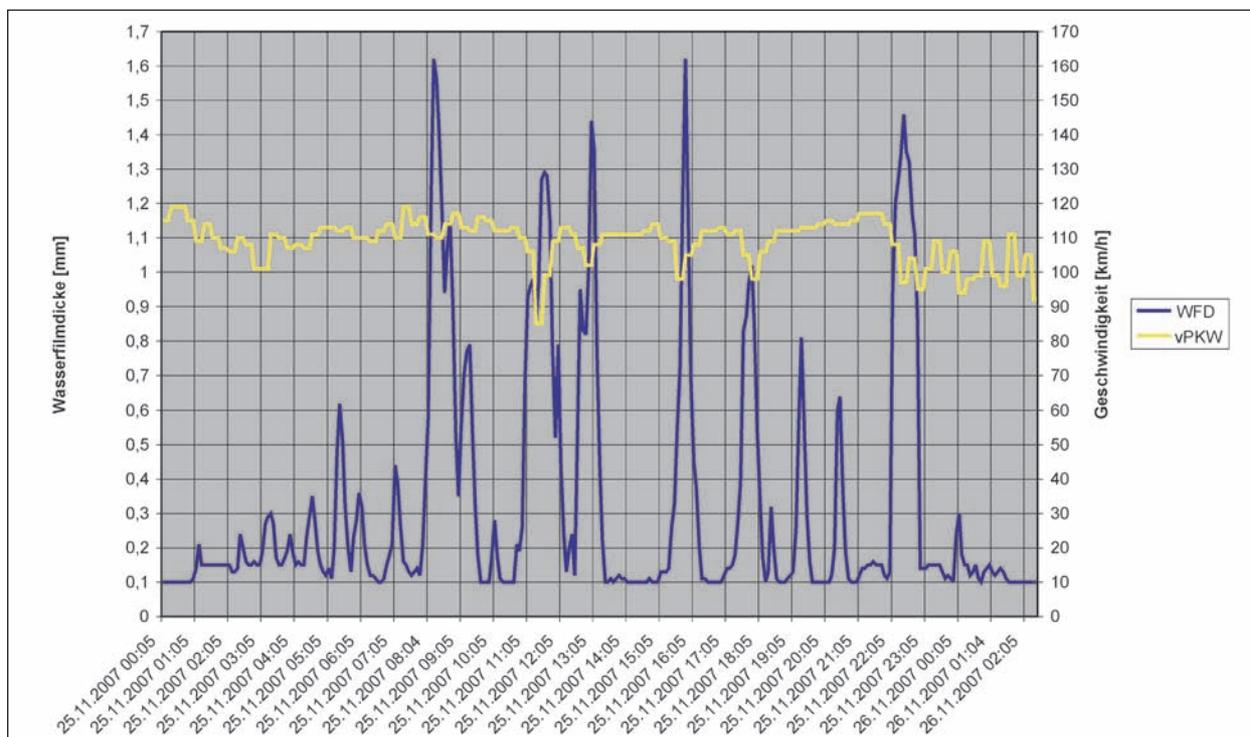


Bild 4-33: Verlauf Wasserfilmdicke (WFD) und Geschwindigkeiten (v_{PKW}) am Fallbeispiel A 45 Haigertalbrücke, 25.11.2007

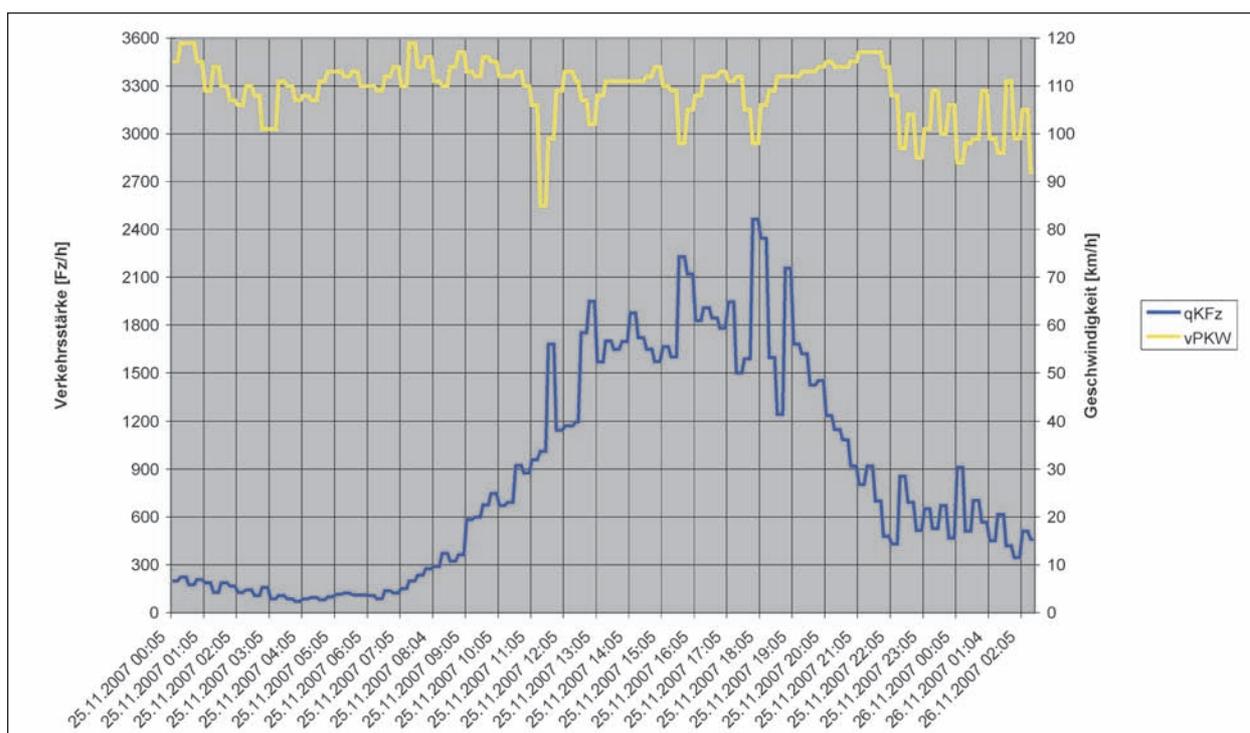


Bild 4-34: Verlauf Verkehrsstärke (q_{KFz}) und Geschwindigkeiten (v_{PKW}) am Fallbeispiel A 45 Haigertalbrücke, 25.11.2007

digkeitseinbrüche zu verzeichnen, obwohl Aquaplaning nicht ausgeschlossen ist. Erst bei Zunahme der Verkehrsstärke und in einer Phase von hoher Niederschlagsintensität (= stark ansteigende WFD) gibt es kurzzeitige Einbrüche. Da die absolute Verkehrsstärke im Bereich von 1.000 bis 1.600 Fz/h noch alleine wohl nicht geeignet ist, zu Verkehrsstörung zu führen, kann dies aber bei gleichzeitigen starken Niederschlägen zu Geschwindigkeitsreduzierungen führen (Bild 4-33), weniger wegen Fahrbahnzustand (die absoluten WFD sind nicht wesentlich mehr als zu anderen Zeiten), sondern vermutlich über die Sichtverhältnisse, die aber erst bei viel Verkehr zum Problem werden (Sprühfahnen etc.). Gegen 11:30 h wird es daher wahrscheinlich wegen der Sichtverhältnisse bei zunehmendem Verkehrsaufkommen zu einer kurzzeitigen Verkehrsstörung gekommen sein, die Durchschnittsgeschwindigkeit sank dabei auf 85 km/h (Bild 4-34).

Einige kleine Geschwindigkeitseinbrüche sind wieder bei relativ hohen Verkehrsstärken und temporären Niederschlagsintensitätszunahmen erkennbar, ebenfalls wieder auf unter 100 km/h jeweils bei hohem Verkehrsaufkommen. Die Verkehrsstärke bleibt aber noch deutlich unterhalb der Kapazität der Strecke.

Nachts ab 22:00 h könnte es sich aufgrund der Lufttemperaturen um leichten bis mäßigen Schneefall

bzw. Schneeregen gehandelt haben. Der Niederschlagsdetektor gibt unbestimmte Niederschlagsart an. Die Geschwindigkeiten bleiben leicht unter den sonst üblichen Durchschnittsgeschwindigkeiten.

4.4.5.3 Schneefall – festgefahrene Schneedecke (30.12.05, 21:30 h bis 31.12.05, 11:00 h, A 45 Haigerbrücke 1)

Beim Beispiel in Bild 4-35 handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um starken Schneefall mit Schneeglätte auf der Fahrbahn. Die Lufttemperatur und Feuchttemperatur sind eindeutig im Bereich für gefrorenen Niederschlag. Die Fahrbahnoberfläche ist ebenfalls relativ kalt (-5 ... -4 °C). Die Restsalzkonzentration geht zurück. Die Tauwirkung wird allmählich geringer. Inzwischen ist deutlich zu erkennen, dass die Fahrzeuge langsamer fahren, da Schneeglätte auftritt, zusätzlich wird auch die Sichtverminderung durch starken Schneefall einen Einfluss haben. Aufgrund des Verkehrsflusses können wohl andere Ursachen für den Rückgang ausgeschlossen werden. Ab ca. 03:34 h meldet die Restsalzmessung „unbestimmbar“. Daraus kann aus der Kenntnis des Messverfahrens der verwendeten Sonden geschlossen werden, dass sich eine festgefahrene Schneedecke gebildet hat. Der Niederschlag hört gegen 05:14 Uhr ganz auf, trotzdem bleibt die Schneeglätte auf der Fahrbahn erhalten.

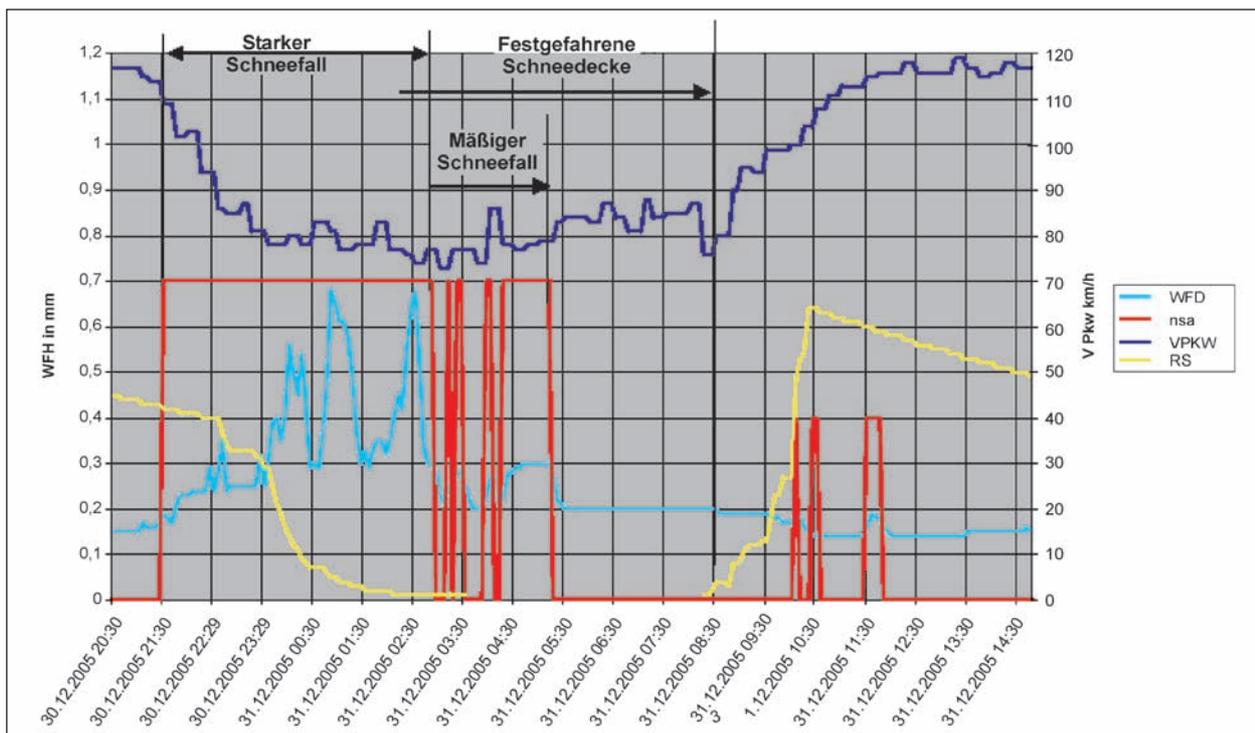


Bild 4-35: Verlauf der Wasserfilmdicke (WFD), Niederschlagsart (nsa), Pkw-Geschwindigkeiten (v_{Pkw}) und des Restsatzwertes (RS) am Fallbeispiel A 45 Haigertalbrücke vom 30.12. bis 31.12.2005

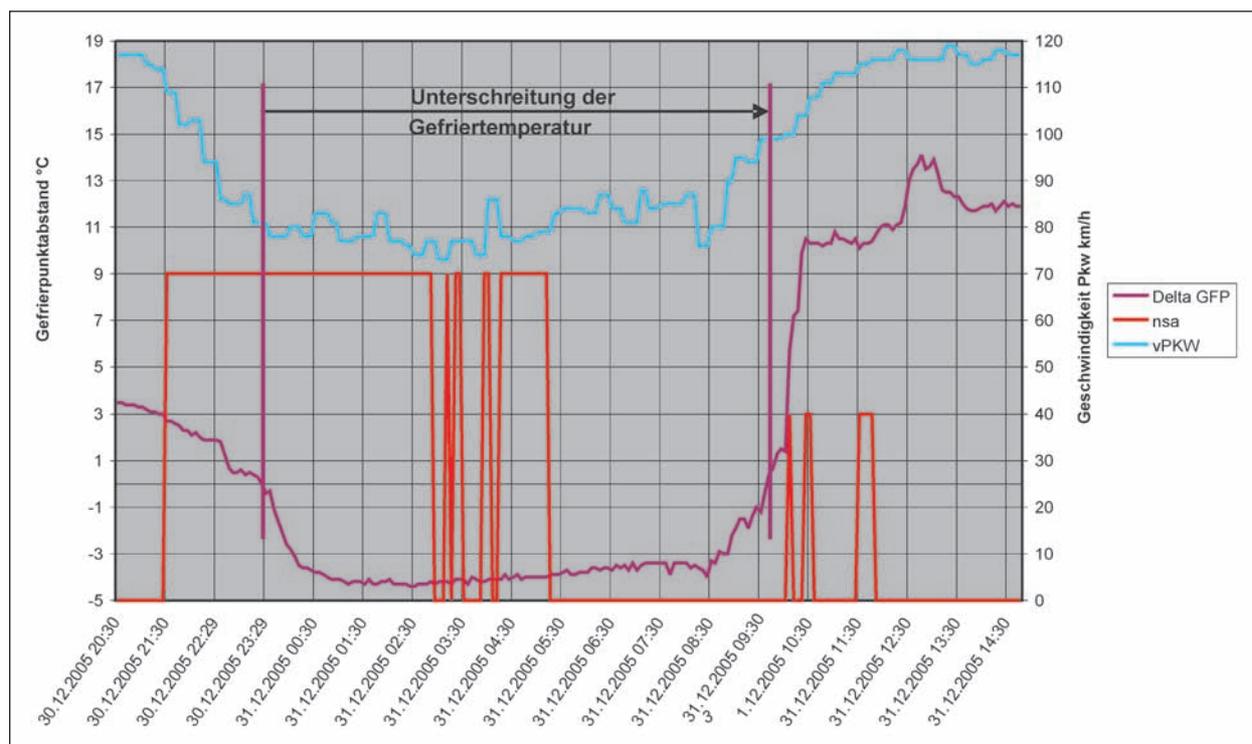


Bild 4-36: Verlauf des Gefrierpunkt-Abstands (Delta-GFP) zur Fahrbahntemperatur, der Niederschlagsart (nsa) und der Geschwindigkeiten für das Fallbeispiel A 45 Haigertalbrücke vom 30.12. bis 31.12.2005

Das Festhalten der Wasserfilmhöhe auf genau 0,2 mm deutet auch auf eine festgefahrene Schneedecke hin. Die kapazitive Messeinrichtung sieht eine Bedeckung, die ein verändertes Dielektrikum bewirkt (Höchstwert entspricht 0,2 mm), die Leitwertmessung spricht infolge des geringen flüssigen Anteils nicht an (unbestimmter WFD-Wert). Die mittlere Pkw-Geschwindigkeit ist jetzt bei ca. 82 km/h.

Ab ca. 8:00 h setzt die Wirkung von Winterdienstmaßnahmen ein. Der Restsalzwert steigt wieder, was sich auch in einen Anstieg der gefahrenen Geschwindigkeit niederschlägt. Der zunehmende Verkehr führt auch dazu, dass die Schneebedeckung sich auflöst. Die steigenden Restsalzkonzentrationen deuten auch darauf hin, dass die Salzwirkung wieder einsetzt und der Schnee in Nässe übergeht. Die Wasserfilmhöhen sinken auch wieder. Gegen 08:30 h beginnt sich der Schneeglätte-Zustand aufzulösen. Aus den weiteren Daten (nicht im Diagramm dargestellt) lässt sich ableiten, dass die Fahrbahntemperaturen allmählich ansteigen.

Bild 4-36 zeigt den relativ deutlichen Zusammenhang der gefahrenen Geschwindigkeit zum Gefrierpunkt-Abstand der Oberflächentemperatur. Die absolute Fahrbahnoberflächentemperatur war während der gesamten Betrachtungszeit deutlich unter

0 °C, jedoch der Abstand zur gemessenen Gefriertemperatur des Taumittels ändert sich. Spätestens wenn die Oberflächentemperatur den Gefrierpunkt unterschreitet (ca. 30.12.2005, 23:25 h) sind die Geschwindigkeiten deutlich verringert. In diesem Fall handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit um eine festgefahrene Schneedecke. Umgekehrt gehen die gefahrenen Geschwindigkeiten wieder auf das Normalmaß hoch, sobald die Oberflächentemperatur wieder über dem Gefrierpunkt liegt (bzw. sinkt der Gefrierpunkt schnell ab, infolge der zunehmenden Salzwirkung) (31.12.2005, ca. 9:40 h).

4.4.5.4 Schneefall – Schneebedeckung, Schneematsch (27.12.2005, 7:49 h bis 28.12.2005, 03:34 h, A 45, Haigertalbrücke 1)

Im folgenden Fall (Bild 4-37) handelt es sich mit hoher Sicherheit um mäßigen bis starken Schneefall. Es bildete sich höchstwahrscheinlich eine Schneebedeckung auf der Fahrbahn. Die Messwerte deuten allerdings darauf hin, dass es sich nicht um eine festgefahrene Schneedecke wie im Beispiel 31.12. handelt. Es kommt an der Oberfläche noch wesentlich mehr flüssiger Anteil vor. Dies bedeutet, dass es sich um Schneematsch handelt.

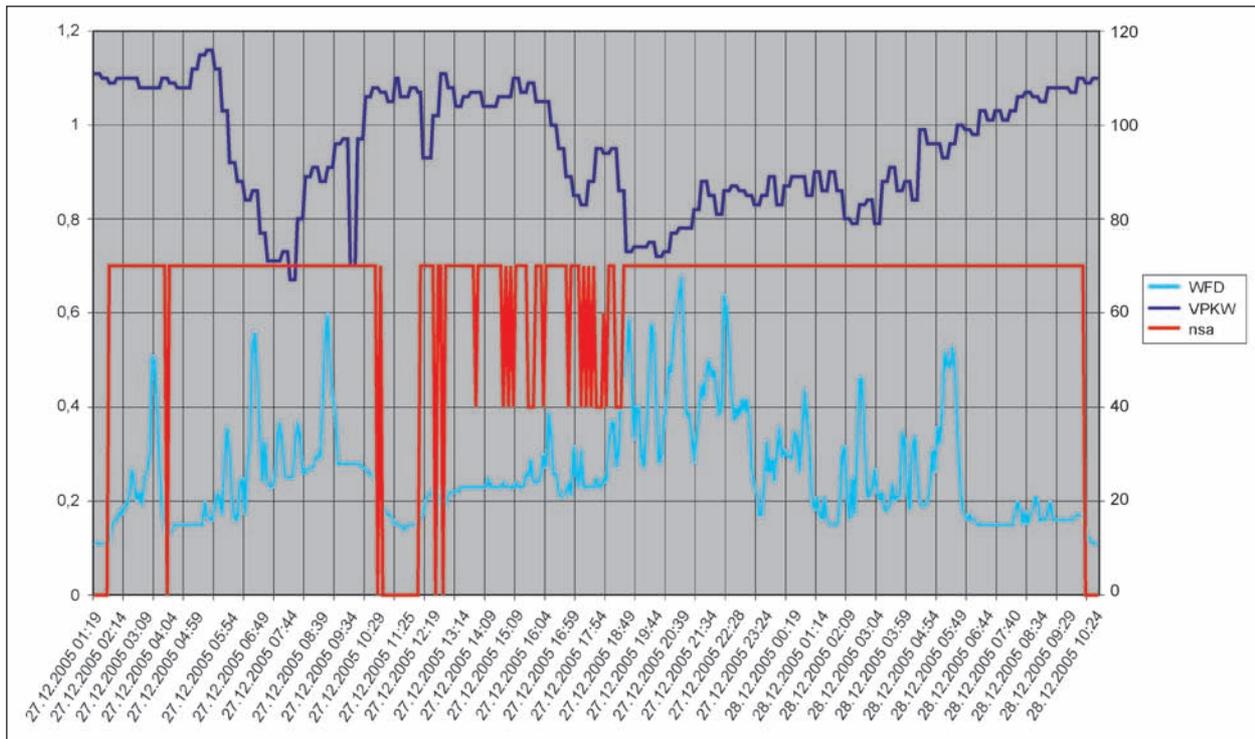


Bild 4-37: Verlauf der Wasserfilmdicke (WFD), der Niederschlagsart (nsa) und der Pkw-Geschwindigkeit (v_{PKW}) am Fallbeispiel A 45 Haigertalbrücke, 27.12. bis 28.12.2005

Am 27.12.05 gegen 02:00 h beginnt leichter Schneefall, um 03:00 h nimmt die Intensität kurzzeitig zu, man erkennt ca. 1 h danach eine Zunahme der Taumittelkonzentration, was auf einen Winterdienstinsatz schließen lässt. Danach ist nur noch leichter Schneefall erkennbar, und die Fahrbahn ist nur leicht nass. Ab 05:20 h steigen die Schneefall-Intensitäten ständig an, die WFH (= proportional der Niederschlagsmenge) nimmt ebenfalls zu. Durch die verminderte Sicht und die Schneebedeckung gehen die gefahrenen Geschwindigkeiten herunter. Gegen 10:20 h lässt der Schneefall nach, und um 11:00 h hört er vorübergehend ganz auf. Die gefahrenen Geschwindigkeiten liegen wieder über 100 km/h. Auch durch den zunehmenden Verkehr (> 1.600 Fz/h) wird der Schneematsch abgetragen, die Fahrbahn ist nur noch feuchtnass. Der Verkehr fließt relativ gut. Zwischen 12:00 h und 17:00 h vereinzelt fällt leichter bis mäßiger Schneeschauer, in Schneeregen übergehend mit geringem Einfluss auf den Verkehr. Gegen 18:00 h fallen die Temperaturen wieder und der Schneefall wird stärker. Der Schnee bleibt wieder auf der Fahrbahn liegen, es bildet sich Schneematsch. Die gefahrenen Geschwindigkeiten sinken wieder teilweise unter 80 km/h. Der Schneefall mit Schneematsch hält bis ca. 28.12.05, 06:00 h an mit fallender Intensität. Ab ca. 06:00 h ist nur noch

leichter Schneefall, der Einfluss auf den Verkehr lässt nach. Gegen 10:20 h hört der Schneefall ganz auf, der Verkehr fließt wieder relativ normal.

4.4.5.5 Schneefall, Schneematsch (31.12.2005, 00:29 bis 05:44, A 61, Gernsheim)

In diesem Fall (Bild 4-38) setzt aus vorher trockener Witterung um Mitternacht ein starker Niederschlag ein. Aufgrund der niedrigen Feuchttemperatur (Lufttemperatur und Taupunkttemperatur < -3 °C) ist von Schneefall auszugehen. Der Wert von über 40 mm/h (ca. 40 cm/h) erscheint unplausibel hoch – wie alle Niederschlagswerte an dieser Station. Es ist dennoch von starkem Schneefall auszugehen. Es ist Nacht, das plötzliche Einsetzen des starken Niederschlags erzeugt umgehend einen Einbruch der gefahrenen Geschwindigkeiten von frei über 135 km/h auf unter 80 km/h (wahrscheinlich wegen der verminderten Sichtweite), kurzzeitig auch bis auf 50 km/h (ggf. verursacht durch Winterdienstfahrzeuge?!). Die Fahrbahntemperatur ist deutlich unter 0 °C. Es sind keine plausiblen Gefrieretemperatur-Werte vorhanden. Es ist aber davon auszugehen, dass sich zunächst Schneebedeckung bildet, aber keine festgefahrene Schneedecke entsteht, eher Schneematsch.

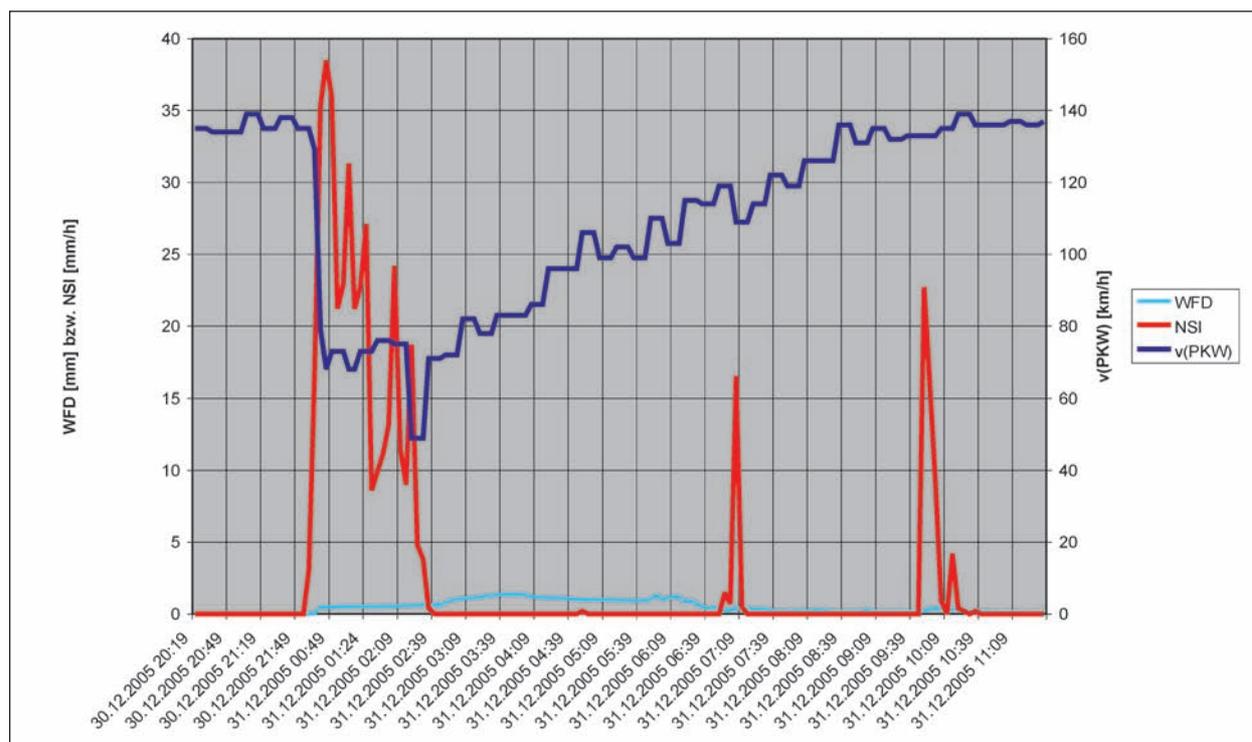


Bild 4-38: Verlauf der Wasserfilmdicke (WFD), Niederschlagsintensität (NSI) und der Pkw-Geschwindigkeit (v_{PKW}) am Fallbeispiel A 61 Gernsheim am 31.12.2005

Nach ca. 03:00 h Uhr lässt der Niederschlag nach, die Erhöhung der Wasserfilmwerte, trotz geringen Niederschlags deutet auf Winterdienstaktivitäten hin und dass sich die Wasserlösung erhöht (Räumen und Streuen mit Tauwirkung). Es geht in Schneematsch und Nässe über. Die gefahrenen Geschwindigkeiten nehmen allmählich wieder zu.

5 Praktische Erprobung des gewählten Konzepts

5.1 Konzeption und Umsetzung der Pilotphasen

Als Grundlage der Verfahrensentwicklung erfolgte die Analyse beigelegter Verkehrs- und Wetterdaten für das Bundesland Hessen. Darauf aufbauend wurde ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Kapazität von BAB-Strecken unter dem Einfluss von winterlichen Wetterbedingungen entwickelt. Der Ansatz basiert auf der Zuordnung von prognostizierten oder gemessenen Wetterdaten zu Wetterklassen. Der Einfluss dieser Wetterklassen auf die verkehrliche Kapazität von Streckenabschnitten findet seine Berücksichtigung durch die Zuordnung von entsprechenden Abschlagsfaktoren auf die Grundkapazitäten der freien Strecke.

Die Wetterdaten werden unter Referenzierung auf Glättemeldeanlagen in Form einer 6-Stunden-Prognose inklusive der Werte für die aktuelle Stunde durch den Deutschen Wetterdienst bereitgestellt.

Für die praktische Erprobung erfolgte die Implementierung des Verfahrensansatzes in Form eines webbasierten Feldversuchs-Prototypen. Dieser erstellt stündlich eine Stauprognose für die aktuelle Stunde und den 6-stündigen Prognosehorizont für jeden Abschnitt im Testgebiet. Das Ablaufdiagramm der Informationsbereitstellung ist in Bild 5-1 dargestellt. Der Feldversuchsprototyp stellt die abschnittsbezogenen Ergebnisse tabellarisch im Internet dar. Ergänzend werden neben den Ergebnissen die zugrunde liegenden Berechnungen in Form einer Excel-Datei als Download zur Verfügung gestellt.

Die Berücksichtigung von geplanten und aktiven Arbeitsstellen ist durch ein ebenfalls Excel-basiertes Frontend zur Erfassung der relevanten Baustellen-daten möglich.

Für die Grunddatenversorgung wurden durch den Landesbetrieb Straßenbau NRW, die Verkehrszentrale Hessen und die Autobahndirektion Südbayern beigelegte Verkehrsdaten zu Tagesganglinien durch die momatec GmbH aufbereitet. Somit standen für jeden Wochentag und Streckenabschnitt im

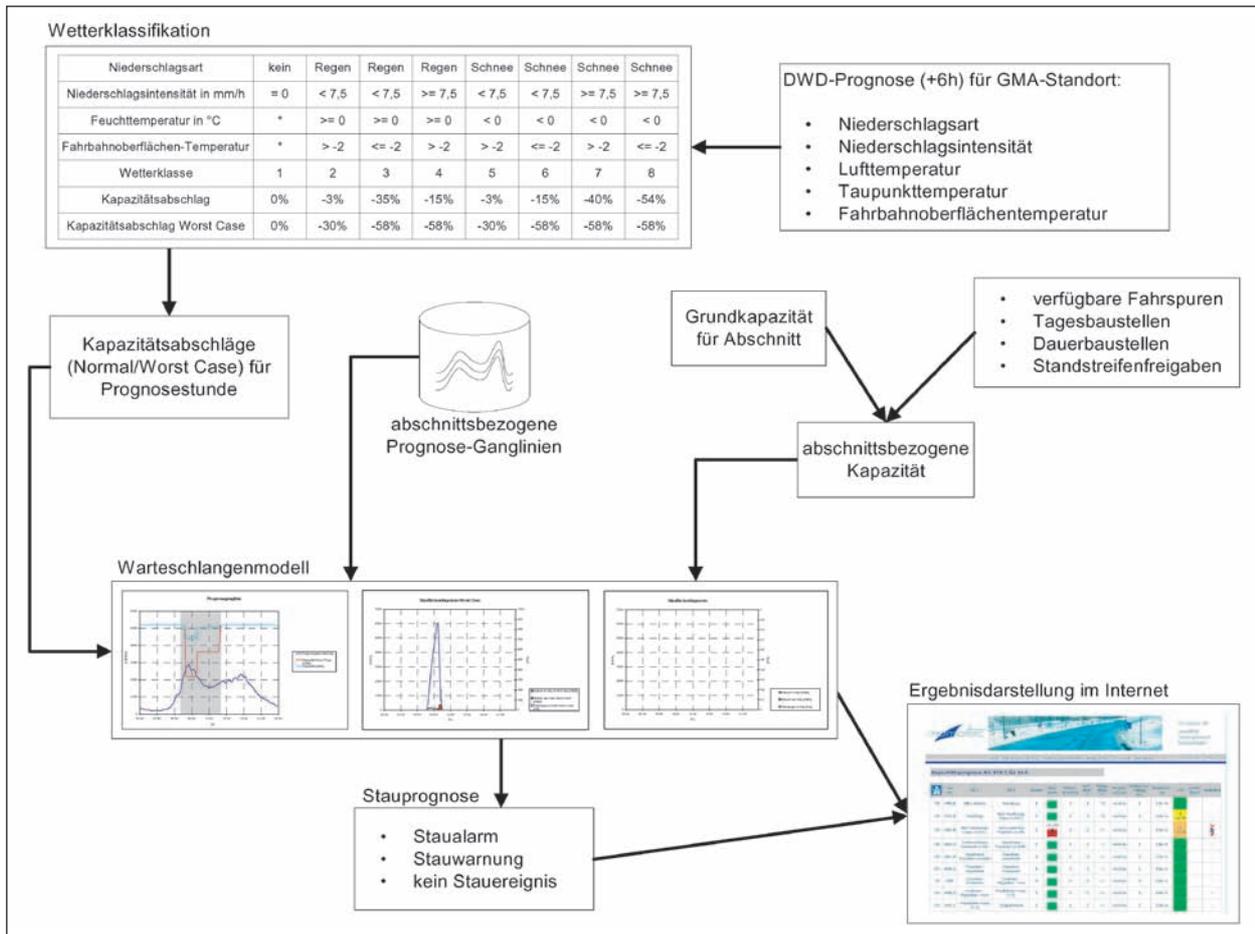


Bild 5-1: Ablaufdiagramm der abschnittsbezogenen stündlichen Stauprognose des Feldversuchsprototypen

Testgebiet Verkehrsstärke-Ganglinien für die Prognose zur Verfügung.

Eine Kurzdokumentation erläutert die Nutzung des Feldversuchsprototypen.

Die Pilotphase wurde in zwei Zeiträume aufgeteilt: Der erste Teil des Feldversuchs wurde im Winter 2008/2009 und der zweite Teil im Winter 2009/2010 durchgeführt.

Die Freischaltung des Feldversuchsprototypen in der ersten Pilotphase und die Bereitstellung der Zugangsdaten erfolgten am 23.01.2009. Die erste Pilotphase endete am 31.03.2009.

Die zweite Pilotphase startete im Dezember 2009 und endete am 27.03.2010.

5.2 Ziele der Pilotphase 1

Die erste Pilotphase diente vorrangig der Bearbeitung nachfolgender Aufgaben:

- Implementierung einer Schnittstelle für die stündliche Übernahme der DWD-Wetterprognose und deren Weiterverarbeitung,
- Implementierung einer Schnittstelle zur Verarbeitung der bereitgestellten Baustelleninformationen,
- Implementierung des Web-Frontends für die grafische Ergebnisdarstellung der Stauprognose im Internet,
- Entwicklung und Implementierung des Verfahrens zur Stauprognose mit Initialwerten für die Wetterklassifikation und der zugehörigen Kapazitätsabschläge,
- Schulung der Anwender,
- Erprobung der grundsätzlichen Praxistauglichkeit des gewählten Ansatzes,
- Dokumentation des Verfahrens,
- Aufsetzen einer Auswertumgebung unter Entwicklung und Nutzung einer grafischen Darstel-

lung der Ergebnisse eines Tages für die Ergebnisanalyse (Tagesband).

5.3 Ziele der Pilotphase 2

Im zweiten Teil des Feldversuchs wurden aufbauend auf den Erkenntnissen der vorausgegangenen Evaluierung die nachstehenden Fragestellungen bearbeitet:

- Sind die Ergebnisse der Verkehrslage-Prognose unter winterlichen Fahrbahnverhältnissen von der Tendenz der Aussage her zutreffend und trendstabil?
- Treten Widersprüche zwischen den Prognosen und den vor Ort anzutreffenden realen Witterungssituationen auf?
- Können praktische Hinweise aus dem laufenden Betrieb in der Winterdienstzentrale für die Auswertung und zur Verfeinerung der Prognosen gegeben werden?
- Werden zeitliche Schwankungen der Ergebnisse der verkehrlichen Prognose beobachtet, z. B. durch wechselnde oder variierende Eingangsdaten?
- Sind die in der Prognose berücksichtigten Rahmendaten wie z. B. eingerichtete, aktive oder auch zwar geplante, aber nicht durchgeführte Arbeitsstellen in den Daten vollständig erfasst?
- Entsprechen die verkehrlichen Grunddaten (Verkehrsstärke-Ganglinien) den tatsächlichen Verhältnissen, oder liegen Sondersituationen z. B. aufgrund von Veranstaltungs- oder Umlenkungsverkehren vor?

Nach Ablauf des Winterquartals und damit des zweiten Feldversuchsabschnitts wurde durch den Forschungsnehmer erneut eine umfassende Datenanalyse durchgeführt. Hinweise durch die Nutzer der prototypischen Implementierung haben zur zielgerichteten Interpretation der Mess- und Prognosedaten auf der Grundlage des vorgenannten Fragenkatalogs beigetragen. Hinzu wurden erste Rückmeldungen und Erfahrungen zur praktischen Nutzbarkeit des Ansatzes gesammelt. Dies umfasst die Aspekte:

- Sind die Ergebnisse der Prognosen und die webbasierte Aufbereitung in der Nutzeroberfläche für die Abwicklung der betrieblichen Aufgaben hilfreich und nützlich?

- Gibt es Hinweise zur Vervollständigung und Verbesserung der Bedienoberfläche und der hinterlegten (auszulösenden) betrieblichen Maßnahmen?

Die gewonnenen Erkenntnisse sind in die abschließende Verfeinerung des Modellansatzes (siehe Kapitel 4.4.4) und in die Hinweise zur Optimierung der Nutzerschnittstelle eingegangen.

5.4 Voraussetzungen für die Umsetzung der Pilotphasen

5.4.1 Organisatorische Voraussetzungen für die Umsetzung der Pilotphasen

Für die Aufnahme des Pilotbetriebs waren die organisatorischen Zuständigkeiten festzulegen. In Abstimmung mit dem Landesbetrieb Straßenbau NRW wurde die Applikation durch Mitarbeiter der Winterdienstzentrale am Dienstsitz Hamm genutzt. Die Erfassung und Eingabe von Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer erfolgten ebenfalls durch Personal des Landesbetriebs am Dienstort Hamm. Mit der Erweiterung des Testgebiets um die BAB 45 in der Pilotphase 2 wurde die Feldversuchsapplikation auch von den Mitarbeitern der Autobahnmeisterei Lüdenscheid genutzt.

In Abstimmung mit der Verkehrszentrale Hessen wurde die Applikation durch Mitarbeiter der Straßen- und Autobahnmeisterei Frankfurt genutzt, die auch Informationen zu Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer bereitgestellt haben.

In Bayern wurde der Feldversuchsprototyp nicht operativ genutzt, allerdings wurden Informationen zu Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer von der AM Holzkirchen zur Verfügung gestellt.

Das Feldversuchsgebiet in der Pilotphase 1 umfasst die Abschnitte der Bundesautobahn A 44 zwischen dem Autobahnkreuz Dortmund/Unna bis zur Anschlussstelle Soest-Ost und die Abschnitte der Bundesautobahn A 46 zwischen der Anschlussstelle Neheim (A 445) und der Anschlussstelle Velmede-Bestwig.

In der Pilotphase 2 wurde das Testgebiet erweitert. In NRW wurde die BAB 45 zwischen der Anschlussstelle Hagen-Süd und der Anschlussstelle Wilnsdorf in das Testgebiet aufgenommen. Des Weiteren wurde in Hessen die BAB 5 zwischen der Anschlussstelle Ober-Mörlen bis zur Anschlussstelle

le Zeppelinheim in die Betrachtungen einbezogen. Das Testfeld wurde im Bundesland Bayern um die BAB 8 zwischen den Anschlussstellen München-Perlach und Bad Aibling erweitert. Das Testgebiet in der Pilotphase 2 umfasste 43 BAB-Abschnitte, denen 23 GMA-Standorte zugeordnet wurden.

5.4.2 Technische Voraussetzungen für die Umsetzung der Pilotphase

Das Hosting der Web-Applikation in den beiden Probetriebsphasen erfolgte durch den Forschungsnehmer. Während der Bürozeiten standen Ansprechpartner für die technische und fachliche Unterstützung zur Verfügung.

Die vom Deutschen Wetterdienst übernommenen Eingangsdaten sowie die Informationen zu Arbeitsstellen im Feldversuchsgebiet wurden zusammen mit den berechneten Prognose-Ergebnissen fortlaufend archiviert und gesichert. Somit war gewährleistet, dass die für die nachfolgenden Auswertungen der Versuchsphasen erforderlichen Daten zur Verfügung standen.

5.5 Implementierung des Pilotbetriebs

Die in Kapitel 3.3 beschriebenen Komponenten des Prognosemodells wurden für die Evaluierung im Rahmen eines Pilotbetriebs prototypisch implementiert. Dabei stand der Aspekt der Überprüfung des Verfahrens anhand der tatsächlich eingetretenen Witterungssituation und der daraus resultierenden Verkehrsabwicklung im Vordergrund. Zudem sollte zugleich die Nützlichkeit des Ansatzes für die Zwecke des Betriebs und des Verkehrsmanage-

ments überprüft werden, um wertvolle Hinweise für eine Überführung des Verfahrensansatzes in den Regelbetrieb zu erhalten.

Der Betrieb der Prognosebausteine erfolgte auf einem Server des Forschungsnehmers. In beiden Versuchszeiträumen wurden die Vorhersagen entsprechend dem Aktualisierungszyklus der Eingangsgrößen der Witterungsprognose stündlich zwischen 01:00 h und 17:00 h neu berechnet. Auf diese Weise wurden die Verkehrszeiten mit zu erwartenden Spitzenbelastungen abgedeckt. Durch die Archivierung der Ein- und Ausgabedaten wurde sichergestellt, dass nach Ablauf der Versuchsphase eine Auswertung der Berechnungsergebnisse erfolgen konnte und somit eine gezielte Optimierung des Ansatzes möglich war.

Vor jedem stündlichem Berechnungslauf wurden die beigestellten Informationen zu Arbeitsstellen kürzerer und längerer Dauer ausgewertet, um die Aktualität der Prognosen auch bei kurzfristig durchgeführten Änderungen im Bauablauf zu gewährleisten.

5.5.1 Web-Darstellung der Prognose-Ergebnisse

Über eine im Internet zugänglichen Startseite wurden die Streckenabschnitte des Testfeldes für die Feldversuchsteilnehmer dargestellt. Neben signifikanten Kenngrößen waren mittels Piktogrammen und Einfärbungen Hinweise auf staugefährdete Streckenabschnitte gegeben. Über die hinterlegten Links waren die dynamisch generierten Kapazitätsprognosen abrufbar. Ferner wurden weitere ergänzende statische Informationen zum Testfeld hinterlegt (siehe Bilder 5-2 und 5-3).

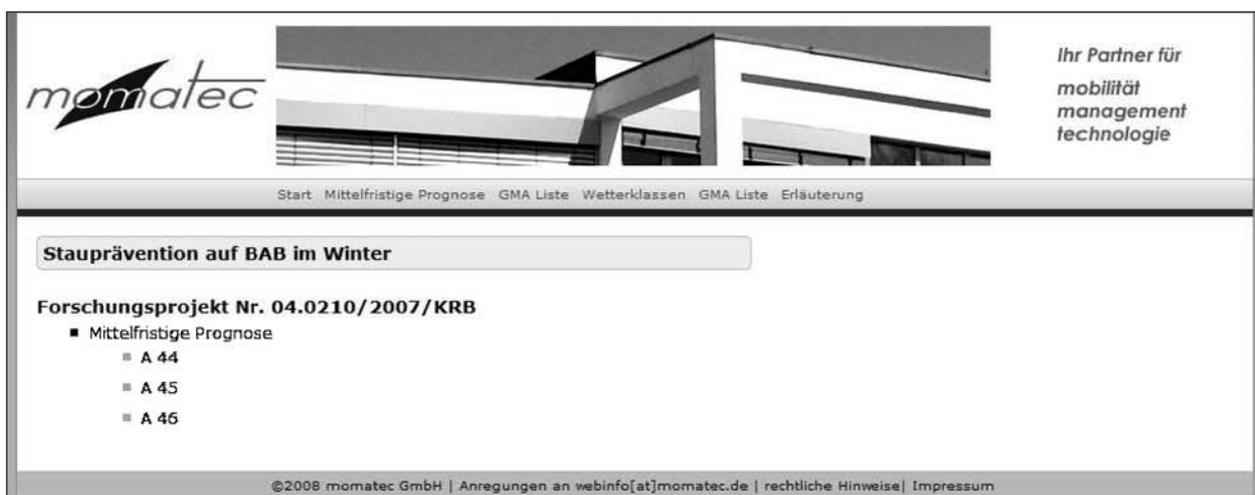


Bild 5-2: Startbildschirm der Web-Applikation

Bei der Gestaltung der Bedienoberfläche wurde darauf geachtet, die Informationen übersichtlich und intuitiv interpretierbar darzustellen. Die schnelle Erfassbarkeit von Streckenabschnitten mit potenziellen Verkehrsstörungen war durch eine klare optische Abgrenzung gewährleistet. Gleichzeitig erlaubte die Vorbereitung der kontextabhängigen Ausgabe von Handlungshinweisen und Vorgaben

für die Operatoren eine erste Einbindung der Anwendung in die betrieblichen Abläufe.

Über die Weboberfläche wurden ergänzende Informationen zur Verfügung gestellt. Sie dienten als Erklärungskomponente der besseren Nachvollziehbarkeit der Prognose und erleichterten die Interpretation der Ergebnisse. Es wurden statische Infor-

	von km	von AS	bis AS	bis km	Länge [km]	Spuren	Wetterprognose	Kapazitätsminimum	Stau-Alarm	Datei-download	GMA	Baustelle	Maßnahmenvorschläge
A 46	53	Neheim (A 445)	Neheim-Süd	55,5	2,50	2	5-5-5-5-5-5-5	400	!	📄	H459	🚧	➡
A 46	55,5	Neheim-Süd	Hüsten	57,1	1,60	2	5-5-5-5-5-5-5	1.464	🟢	📄	H459	-	-
A 46	57,1	Hüsten	Arnsberg-Altstadt	62,3	5,20	2	5-5-5-5-5-5-5	1.464	🟢	📄	H571	-	-
A 46	62,3	Arnsberg-Altstadt	Arnsberg-Ost	65	2,70	2	5-5-5-5-5-5-5	1.464	🟢	📄	H571	-	-
A 46	65	Arnsberg-Ost	Freienohl	71,2	6,20	2	5-5-5-5-5-5-5	716	!	📄	H571	🚧	➡
A 46	71,2	Freienohl	Wennemen	75,7	4,50	2	5-5-5-5-5-5-5	1.464	🟢	📄	H580	-	-
A 46	75,7	Wennemen	Enste	79,3	3,60	2	5-5-5-5-5-5-5	1.464	🟢	📄	H580	-	-
A 46	79,3	Enste	Meschede	82,4	3,10	2	5-5-5-5-5-5-5	716	🟢	📄	H580	🚧	-
A 46	82,4	Meschede	Bestwig	87,6	5,20	2	5-5-5-5-5-5-5	480	!	📄	H580	🚧	➡

Bild 5-3: Übersichtsdarstellung der Streckenabschnitte (Feldversuchsphase 1)

		Wettersituation							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Fahrbahnoberflächentemperatur	[-]	<= 0	<= 0	<= 0	<= 0	> 0	> 0	> 0	> 0
Fahrbahnzustand	-	Fahrbahn ist feucht/nass, bzw. schnee- oder eisbedeckt	Fahrbahn ist feucht/nass, bzw. schnee- oder eisbedeckt	trocken	trocken	Fahrbahn ist feucht/nass, bzw. schnee- oder eisbedeckt	Fahrbahn ist feucht/nass, bzw. schnee- oder eisbedeckt	trocken	trocken
Niederschlagsart	-	Niederschlag aller Art	kein Niederschlag	Niederschlag aller Art	kein Niederschlag	Niederschlag aller Art	kein Niederschlag	Niederschlag aller Art	kein Niederschlag

Bild 5-4: Wetterklassen (Feldversuchsphase 1 mit vorläufiger Wetterklasseneinteilung)

momatec Ihr Partner für mobilität management technologie

Start Mittelfristige Prognose GMA Liste Wetterklassen 23.01.2009, 11:37 h

GMA Liste

Kennung	GMA-Name	Land	Firma	Auto- bahn	Streckenkilometer	Streckentyp	Breite	Länge	Höhe	Vorhersage- raum
H454	Luener Bach TB	LWL	Boschung	A044W	1413	213	5152	775	135	3360
H456	Ostoennerbach TB	LWL	Boschung	A044W	1241	213	5154	799	135	3360
H458	Blumenthaler Graben	LWL	Boschung	A044x	1384	100	5153	792	130	3360
H459	Neheim (Moehne)	LWL	Boschung	A046N	147	255	5145	796	165	3360
H571	Wannebach TB	LWL	Boschung	A046N	617	215	5142	806	230	3332
H580	Fulmecke TB	LWL	Boschung	A046E	813	213	5136	827	430	3334

©2008 momatec GmbH | Anregungen an [webinfo\[at\]momatec.de](mailto:webinfo[at]momatec.de) | rechtliche Hinweise | Impressum

Bild 5-5: Örtliche Lage der Glättemeldeanlagen

Erläuterungen

Allgemeines

Autobahn	Name der Autobahn
von km	Anfangskilometrierung des Abschnitts
von AS	Bezeichnung des Anschlussstellennamens am Abschnittsbeginn
bis AS	Bezeichnung des Anschlussstellennamens am Abschnittsende
bis km	Kilometrierung am Abschnittsende
Länge [km]	Abschnittslänge
Spuren	Anzahl der verfügbaren Fahrspuren
Wetterprognose	den DWD-Prognosen zugeordneten Wetterklassen für den Prognosezeitraum
Kapazitätsminimum	Minimum der Kapazität im Prognosezeitraum
Stau-Alarm	Anzeige prognostizierter Staus
Dateidownload	Link für den Datei-Download der Prognosedatei (Exel)
GMA	Kennung der dem Abschnitt zugeordneten GMA
Baustelle	 = Dauerbaustelle im Tagesverlauf  = Tagesbaustelle im Tagesverlauf
Maßnahmenvorschläge	

Level of Service (LOS)

LOS 1 (freier Verkehr)	
LOS 2 (lebhafter Verkehr)	
LOS 3 (dichter Verkehr)	
LOS 4 (zähfließender Verkehr)	
LOS 5 (Stau)	

Bild 5-6: Legende der Webapplikation

mationen wie die Aufbereitung der Eigenschaften der einzelnen Wetterklassen (siehe Bild 5-4) und die Zuordnung der Standorte von Glättemeldeanlagen zu den Streckenabschnitten des Feldversuchsgebiets (siehe Bild 5-5) angeboten. Eine Legende beschreibt die angebotenen Inhalte der Prognose-Zusammenstellung (siehe Bild 5-6). Die Definition der Wetterklassen in Feldversuchsphase 1 entsprach noch nicht der endgültigen Einteilung.

Die vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellten Informationen wurden unter Ortsreferenzierung auf die Glättemeldeanlagen in einer Tabellenübersicht dargestellt (siehe Bild 5-7). Wesentliche Informatio-

nen für den Straßenbetrieb wie die prognostizierten Werte für Luft- und Taupunkttemperatur, die Temperatur des Fahrbahnbelags, der klassifizierte Straßenzustand sowie witterungsbezogene Größen wie die Niederschlagsmenge und der Niederschlagstyp sind aufgeführt. Dabei umfasste der Prognosezeitraum die auf den Aufrufzeitpunkt der Applikation folgenden sechs Stunden. Die aus den Eingangsdaten der Prognose durch das Berechnungsmodell abgeleitete Wetterklasse wurde ebenfalls in stundenscharfer Auflösung dargestellt.

Diese Informationszusammenstellung erlaubte den Feldversuchsteilnehmern, insbesondere den für

Kennung der GMA	Zielzeit der Vorhersage	Lufttemperatur [°C]	Taupunkttemperatur [°C]	Belagtemperatur für Hauptstrecke (Standard) [°C]	Straßenzustand für Hauptstrecke (Standard)	Niederschlagsmenge [mm]	Niederschlagstyp	Wetterklasse
H571	09:00	1	0	1	0	0	0	8
H571	10:00	2	1	3	0	0	0	8
H571	11:00	2	1	4	0	0	0	8
H571	12:00	4	1	5	0	0	0	8
H571	13:00	4	2	6	0	0	0	8
H571	14:00	5	2	7	0	0	0	8
H571	15:00	5	3	6	0	0	0	8

Kennung der GMA	Zielzeit der Vorhersage	Lufttemperatur [°C]	Taupunkttemperatur [°C]	Belagtemperatur für Hauptstrecke (Standard) [°C]	Straßenzustand für Hauptstrecke (Standard)	Niederschlagsmenge [mm]	Niederschlagstyp	Wetterklasse
H580	09:00	0	-1	0	0	0	0	4
H580	10:00	1	0	2	0	0	0	8
H580	11:00	2	1	3	0	0	0	8
H580	12:00	2	1	4	0	0	0	8
H580	13:00	3	1	4	2	0	0	6
H580	14:00	3	1	4	2	0	1	5
H580	15:00	4	1	4	2	0	1	5

Bild 5-7: GMA-bezogene Wetterprognosedaten

den operativen Winterdienst Verantwortlichen, den Abgleich mit weiteren, ihnen verfügbaren Daten und Angaben zum Witterungszustand im von ihnen betreuten Streckennetz.

5.5.1.1 Bereitstellung des Prognoseverfahrens und der Berechnungsergebnisse

Über die Nutzeroberfläche der Webapplikation wurden für jeden Streckenabschnitt im Testgebiet die Ergebnisse der Prognose in Form einer Excel-Datei zum Herunterladen angeboten. In dieser Datei ist das zugrunde liegende Warteschlangenmodell hinterlegt.

Der Anwender konnte durch gezielte Modifikation der Eingangsgrößen eigenständig Untersuchungen hinsichtlich der Sensitivität der Vorhersage bezüglich Parameterschwankungen durchführen. Sowohl die Grunddaten des Testgebietes wie z. B. die Verkehrsstärke-Ganglinien als auch Kapazitätskenngrößen oder Abschlagsfaktoren der einzelnen Wetterklassen lassen sich gezielt verändern. Die Auswirkungen werden unmittelbar und interaktiv dargestellt. Die veränderten Werte bewirken eine Modifikation der Prognoseergebnisse. In der Tabellendarstellung der Wetterklassen sind die voreingestellten Abschlagsfaktoren für die Kapazität der Strecke aufgelistet. Diese konnten ebenfalls durch den Nutzer zu Evaluierungszwecken verändert werden.

Weitere Ausgaben umfassen die Prognoseganglinie der Verkehrsstärke mit der Darstellung der zeitabhängigen Kapazitäten (Normalfall/Worst

Case) unter Berücksichtigung der Wettersituation und geplanter Baustellen im betreffenden Streckenabschnitt.

Im Excel-Arbeitsblatt sind ferner die Darstellungen der Stauflächendiagramme für den Normalfall und den Worst Case enthalten. Dabei ist die Anzahl der Fahrzeuge im Stau dargestellt, die das verwendete Prognoseverfahren ermittelt. Angezeigt werden zudem die Anzahl der zufließenden Fahrzeuge während des Staufbaus und die Anzahl der abfließenden Fahrzeuge während des Stauabbaus.

Über ein weiteres Excel-Arbeitsblatt zur Kapazitätsprognose ist ein direkter Zugriff auf die berechneten Werte und das hinterlegte Rechenverfahren möglich. Durch den Nutzer konnten die angezeigten Werte in diesem Arbeitsblatt interaktiv modifiziert werden.

Die verfügbaren Arbeitsblätter sind in beispielhaften Auszügen dargestellt.

Bild 5-8 zeigt die Eigenschaften eines Streckenabschnitts sowie die Berechnungsergebnisse eines Prognoseschritts. In Bild 5-9 sind die Verkehrsstärke-Ganglinie sowie die beiden Ganglinien der Kapazitätsprognose für einen Streckenabschnitt dargestellt. Der vorhergesagte Verlauf der Staulängen als Funktion der Zeit wurde aus dem Warteschlangenmodell ermittelt und kann beispielhaft Bild 5-10 und Bild 5-11 entnommen werden.

Kapazitätsprognose für den 32.01.2009 ab 11:00 h								
Bundesautobahn	von km	von AS	bis AS	bis km	Länge [km]	Spuren	Baustelle	RFB
A 46	53,00	Neheim (A 445)	Neheim-Süd	55,50	2,50	2	WAHR	1
Grundleistungsfähigkeit/Spur		1.830 Kfz/h						
Leistungsfähigkeit Querschnitt		3.660 Kfz/h						
Fahrzeuglänge		6,0 Kfz						
Ergebnisse für den 23.01.2009 ab 10:00h								
max. Staulänge		6,5 km						
max. Staulänge Worst Case		9,5 km						
Kapazitätsminimum		400 Kfz/h						

Wetterklasse	Abschlagsfaktor Kapazität Word Case	Abschlagsfaktor Kapazität
1	58 %	32 %
2	58 %	34 %
3	58 %	11 %
4	0 %	0 %
5	60 %	38 %
6	0 %	0 %
7	60 %	38 %
8	0 %	0 %
0	0 %	0 %

Bild 5-8: Übersichtsdarstellung mit der Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Prognose für einen Streckenabschnitt (Feldversuchsphase 1)

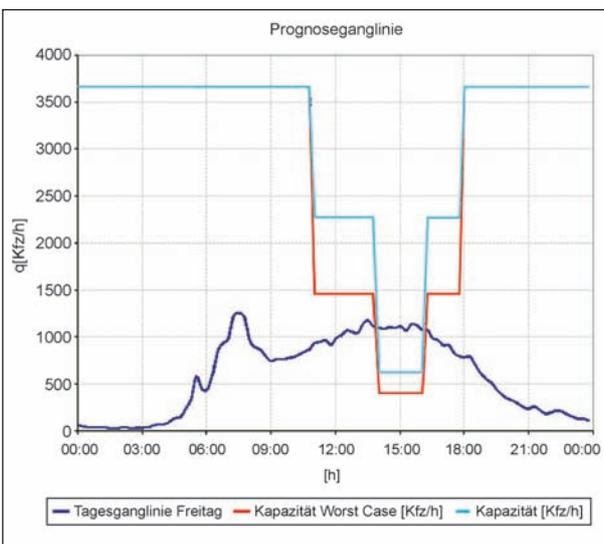


Bild 5-9: Ganglinie der Verkehrsstärke und prognostizierte Kapazitäten eines Streckenabschnitts

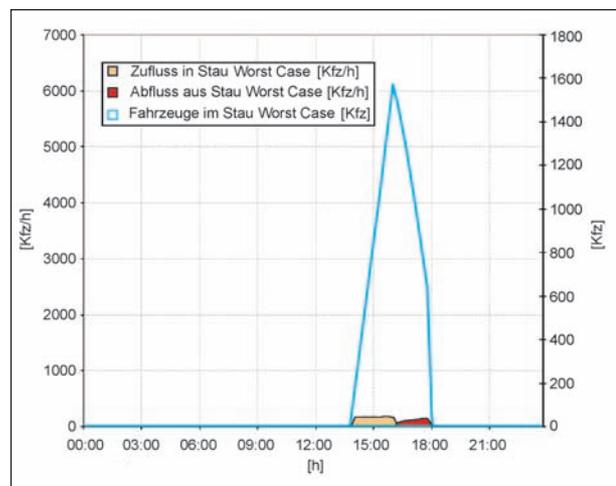


Bild 5-11: Stauflächendiagramm für den Worst Case

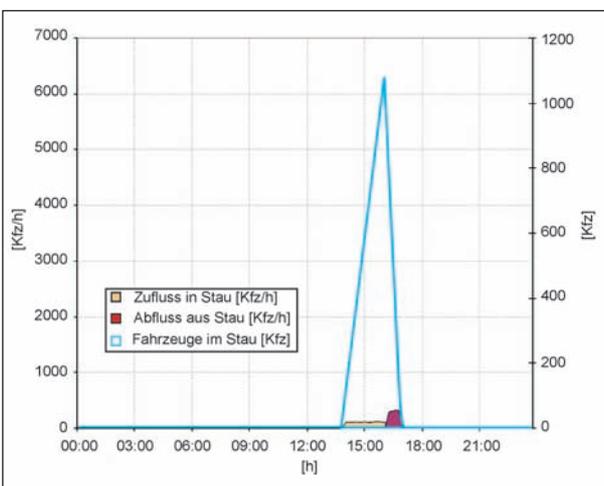


Bild 5-10: Stauflächendiagramm für den Normalfall

5.5.2 Baustelleneingabe

Die Erfassung von Arbeitsstellen im Netz wurde den Teilnehmern des Feldversuchs über ein gesondertes Excel-Listenblatt ermöglicht, um keine proprietären Schnittstellen zu Baustelleninformationssystemen implementieren zu müssen (siehe Bild 5-12). Diese für den Feldversuch erstellte Datei „Baustellen.xls“ beinhaltet Erläuterungen mit Hinweisen zum Ausfüllen der Liste. Die Eingabe der Arbeitsstellen erfolgte im Tabellenblatt „Baustellen“ gemäß der vorgegebenen Feldkonventionen.

Die verbleibenden Restkapazitäten wurden durch den Baustellenverantwortlichen ermittelt bzw. abgeschätzt. Diese Informationen wurden wie zuvor bei der Beschreibung des Verfahrensansatzes erläutert als Eingangsgrößen für die Prognose verwendet.

Die Auswertung der Excel-Datei wurde maschinell vor jedem Prognosedurchlauf durchgeführt. So konnten kurzfristige Aktualisierungen der Baustellenmeldungen in der Verfügbarkeit des Verkehrsraums berücksichtigt werden.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Autobahn	Abschnitt	RFB	Baustellenart	von	bis	verbleibende Spuren	verbleibende Kapazität RFB
2	A 46	Meschede - Bestwig	1	Dauerbaustelle	01.01.2009 10:30	01.03.2009 10:30	1	1200
3	A 44	Kreuz Werl - Werl - Süd	2	Dauerbaustelle	21.02.2009 10:30	22.02.2009 17:30	2	3600
4	A 46	Neheim (A 445) - Neheim-Süd	1	Tagesbaustelle	23.01.2009 14:00	23.01.2009 16:00	1	1000
5	A 46	Arnsberg-Ost - Freienohl	1	Dauerbaustelle	22.01.2009 16:00	23.01.2009 16:00	1	1790
6	A 46	Enste - Meschede	1	Dauerbaustelle	23.01.2009 16:00	24.01.2009 16:00	1	1790
7	A 46	Hüsten - Arnsberg-Altstadt	1	Dauerbaustelle	26.01.2009 14:00	27.01.2009 14:00	1	1790
8	A 46	Arnsberg-Altstadt - Arnsberg-Ost	1	Dauerbaustelle	01.01.2009 10:30	01.03.2009 10:30	1	1500
9	A 46	Arnsberg-Altstadt - Arnsberg-Ost	1	Tagesbaustelle	23.01.2009 14:00	23.01.2009 16:00	1	1000

Bild 5-12: Beispiel für die Erfassung von Arbeitsstellen im Netz

Die Excel-Tabelle wurde durch den Anwender über einen gesicherten Zugang in ein vom Forscher bereitgestelltes Verzeichnis auf einen ftp-Server hochgeladen. Als Client für das Hochladen wurde übliche ftp-Zugangssoftware genutzt.

5.6 Durchführung und Ergebnisse des Pilotbetriebs Phase 1

Die Pilotphase 1 hat mit der Bereitstellung der Webapplikation für den Betreuerkreis und die Nutzer in einem Teilbereich der Winterdienstzentrale Hamm des Landesbetriebs Straßenbau Nordrhein-Westfalen am 23.01.2009 begonnen. Sie endete am 31.03.2009.

Zeitnah wurde eine Einweisung der Anwender in die Bedienoberfläche und Nutzung der Prognoseergebnisse in der Winterdienstzentrale der Niederlassung Hamm des Landesbetriebs Straßenbau NRW durchgeführt.

In der Pilotphase 1 wurden die Schnittstelle für die stündliche Übernahme der DWD-Wetterprognose und deren Weiterverarbeitung, die Schnittstelle zur Verarbeitung der bereitgestellten Baustelleninformationen, die Prognosealgorithmen als auch das Web-Frontend für die grafische Ergebnisdarstellung der Stauprognose im Internet implementiert und auf Praxistauglichkeit getestet.

Im Anschluss an den ersten Teil des Feldversuchs erfolgten eine Analyse der archivierten Daten und der Abgleich mit weiteren Datenquellen sowie Rückmeldungen aus dem Kreis der Anwender. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Datenanalyse sind in die Verfeinerung des Modellansatzes eingegangen und in der Feldversuchsphase 2 berücksichtigt worden.

Um die Prognoseergebnisse eines Tages beurteilen zu können, wurde eine grafische Darstellung entwickelt, welche die relevanten Informationen für eine Ergebnisanalyse visuell darstellt. Diese so ge-

nannten Tagesbänder wurden für jeden Streckenabschnitt und Tag des Feldversuchsgebiets erstellt und enthalten

- die Verkehrsqualitätsstufe (LOS),
- die Anzahl der von den Landesmeldestellen der Polizei veröffentlichten Verkehrswarndienstmeldungen in den Prognosestunden,
- ausgewählte, gemessene Kenngrößen des dem Abschnitt zugeordneten GMA-Standorts, d. h. die Fahrbahnoberflächentemperatur, die Niederschlagsart und den Fahrbahnzustand,
- die aus den gemessenen GMA-Daten abgeleitete Wetterklasse gemäß Prognosealgorithmus,
- die aus der DWD-Prognose gemäß Prognosealgorithmus ermittelte Wetterklasse im zeitlichen Verlauf des Prognosehorizontes,
- die ausgelösten Warnungen bzw. Alarmer der Stauprognose im zeitlichen Verlauf des Prognosehorizontes,
- Informationen zum Vorhandensein von Arbeitsstellen kürzerer bzw. längerer Dauer im Abschnitt,
- Informationen zur Art der durchgeführten Winterdienstmaßnahmen.

Mit dem Tagesband kann auf visuelle Weise geprüft werden, wie gut die prognostizierten Wetterklassen mit denen aus der sich tatsächlich ergebenden Wettersituation abgeleiteten Klassen übereinstimmen. Auch sind der zeitliche Verlauf der prognostizierten Wetterklassen und die daraus resultierenden Stauwarnungen und -alarmer nachzuvollziehen. Der Vergleich mit dem im Tagesband angetragenen auf gemessenen Daten beruhenden LOS mit den prognostizierten Verkehrszuständen lässt Rückschlüsse auf die Güte der Stauprognose zu.

Bild 5-13 zeigt ein Datenbeispiel.

Start Kurzfristige Prognose Mittelfristige Prognose Wetterklassen GMA Liste Erläuterung 12.02.2010, 14:03 h														
Kapazitätsprognose A44, RFB 1 für 14 h														
	von km	AS 1	AS 2	Spuren	Stau- alarm	Wetter prognose	Luft- temp. [°C]	Belags- temp. [°C]	Straßen- zustand	Nieder- schl.- menge [mm]	Niederschl.- typ	LOS	Winter- dienst	Bau- stelle
A 44	147,5	Kreuz Dortmund / Unna	Kreuz Unna-Ost	2	14:00h 	5	-3	-1	Schnee	0	Schnee	5 13:59		-
A 44	143,9	Kreuz Unna-Ost	Kreuz Werl	2	14:00h 	5	-3	-1	Schnee	0	Schnee	3 13:59		-
A 44	130,8	Kreuz Werl	Werl-Süd	2		5	-3	-1	Schnee	0	Schnee	2 13:59		-
A 44	128	Werl-Süd	Soest	2		5	-3	1	nass	0	Schnee	2 13:59		-
A 44	116,2	Soest	Soest-Ost	2		5	-3	1	nass	0	Schnee	2 13:59		-
Kapazitätsprognose A44, RFB 2 für 14 h														
	von km	AS 1	AS 2	Spuren	Stau- alarm	Wetter prognose	Luft- temp. [°C]	Belags- temp. [°C]	Straßen- zustand	Nieder- schl.- menge [mm]	Niederschl.- typ	LOS	Winter- dienst	Bau- stelle
A 44	143,9	Kreuz Unna-Ost	Kreuz Dortmund / Unna	2	14:00h 	5	-3	-1	Schnee	0	Schnee	3 13:59		-
A 44	130,8	Kreuz Werl	Kreuz Unna-Ost	2	14:00h 	5	-3	-1	Schnee	0	Schnee	4 13:59		-
A 44	128	Werl-Süd	Kreuz Werl	2		5	-3	0	Schnee	0	Schnee	3 13:59		-
A 44	116,2	Soest	Werl-Süd	2		5	-3	1	nass	0	Schnee	2 13:59		-

Bild 5-14: Beispielhafte Ansicht der in der Pilotphase 2 validierten Kurzfristprognose

Darstellung der Ergebnisse zu optimieren. Ferner wurde das im Kapitel 4 beschriebene Modell zur Wetterklassifikation im Feldversuchsprototyp hinterlegt.

Die Internet-basierte Anwendung wurde um eine Seite mit der Darstellung einer Kurzfristprognose ergänzt (siehe Bild 5-14), welche die Ergebnisse der Stauprognose für die aktuelle Stunde enthält und dem Anwender einen komfortablen Abgleich mit verfügbaren Messdaten aus den Streckenabschnitten anbietet. Die über einen neuen Menüpunkt erreichbare Kurzfristprognose enthält zu diesem Zweck neben der tabellarischen Darstellung der Streckencharakteristika der jeweiligen Autobahnabschnitte auch die Anzeige bzw. Informationen über

- das Vorliegen einer Stauwarnung bzw. eines Staualarms mit Angabe des zeitlichen Beginns,
- die Wetterklasse der aktuellen Stunde,
- die DWD-Wetterprognosedaten Lufttemperatur, Fahrbahnoberflächentemperatur, Straßenzustand, Niederschlagsmenge und Niederschlagstyp,

- die Anzeige des momentanen Level of Service mit Zeitstempelangabe, entnommen aus aktuellen Messdaten,
- das Vorhandensein von Arbeitsstellen kürzerer oder längerer Dauer in den Autobahnabschnitten.

Eine Spalte wurde für Informationen über Winterdiensttätigkeiten im betreffenden Abschnitt in der Seitenansicht vorgesehen, die aber mangels zur Verfügung stehender Online-Daten im Feldversuch nicht genutzt werden konnte.

Die in der Kurzfristprognose dargestellte Verkehrsqualitätsstufe (LOS) stand für den Feldversuch für die Bundesländer Hessen und NRW online zur Verfügung.

Auch die grafische Darstellung der Mittelfristprognose wurde in der Pilotphase 2 auf der Grundlage von Anregungen aus dem Nutzerkreis verbessert (vgl. Bild 5-15). Für eine bessere zeitliche Orientierung in den Spalten der Wetterklassen wurde die Prognosezeit in die Spaltenbeschriftung aufgenommen. Die Anzeige der Wetterklasse wurde farblich von Weiß (Wetterklasse 1) bis Dunkelgrau

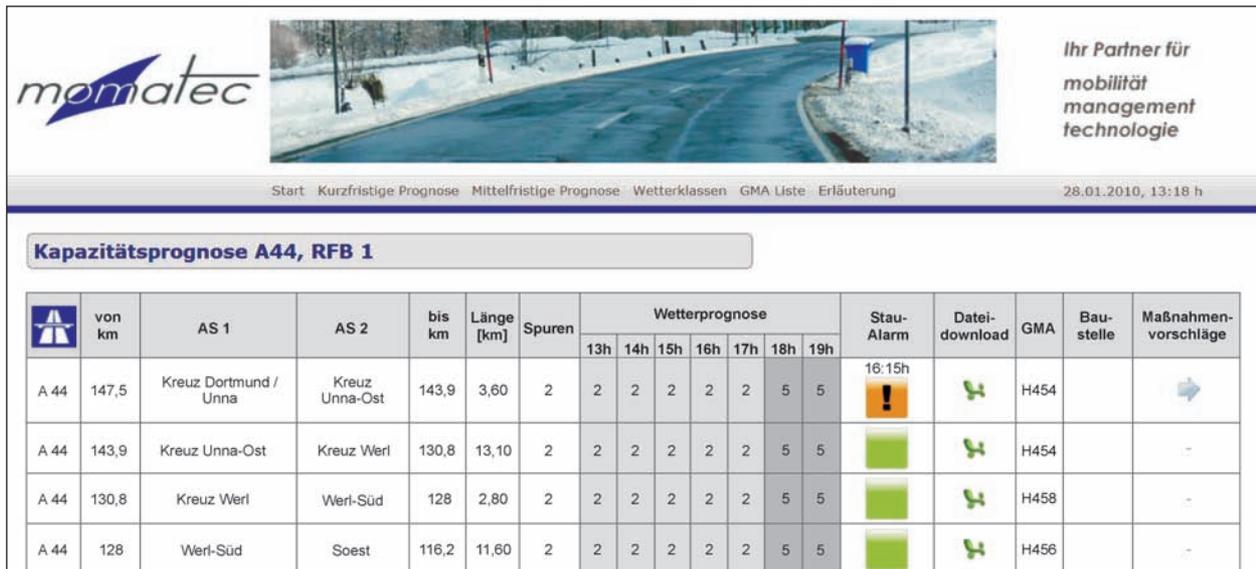


Bild 5-15: Ansicht der Mittelfristprognose (Pilotphase 2)

(Wetterklasse 8) abgestuft dargestellt, um Änderungen der Wetterklassen im zeitlichen Verlauf optisch besser voneinander abzuheben.

Auf die Anzeige der Spalte „Kapazitätsminimum“ in der Tabelle der Mittelfristprognose wurde in der Pilotphase 2 verzichtet.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Datenanalysen in zusammengefasster Form dargestellt. Diese wurden nach Abschluss der Feldversuchphase 2 durchgeführt.

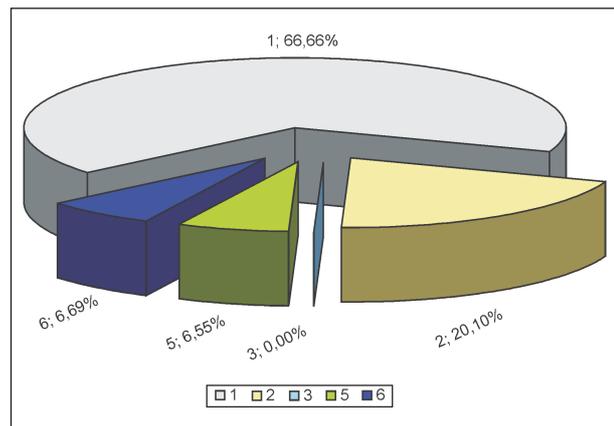


Bild 5-16: Häufigkeitsverteilung der aus der DWD-Wetterprognose abgeleiteten Wetterklassen

5.7.1 Analyse der DWD-Prognose

Nach Abschluss des zweiten Teils des Feldversuches wurden die vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellten Daten der Wetterprognose analysiert. Da es sich hierbei um die grundlegenden Eingangsgrößen des Kapazitätsprognosemodells handelt, kommt der Güte der Wetterprognose eine hohe Bedeutung zu.

Zunächst wurde die Häufigkeitsverteilung der Wetterklassen, die aus der DWD-Wetterprognose abgeleitet worden sind, untersucht. Diese Häufigkeitsverteilung umfasst alle Wetterklassenwerte aller Prognosehorizonte im Feldversuchszeitraum 2. Das Ergebnis ist in Bild 5-16. dargestellt. Mit ca. 67 % dominiert die Klasse 1, d. h., im restlichen Drittel der Fälle ist in den Wetterprognosen ein Niederschlagsereignis vorhergesagt worden.

Auffällig ist, dass die Wetterklassen 4, 7 und 8 in der Häufigkeitsverteilung nicht vertreten sind bzw.

nicht anhand der Daten der Wetterprognose klassifiziert worden sind. Diese Wetterklassen werden bei hohen Niederschlagsintensitäten mit Niederschlagsmengen $\geq 7,5$ mm/h zugeordnet.

Um diesen Sachverhalt genauer zu untersuchen, wurde die Häufigkeitsverteilung der prognostizierten Wetterklassen (siehe Bild 5-17) der Verteilung der Wetterklassen aus gemessenen Daten gegenübergestellt. Dies erfolgte für die beiden GMA Wetterau (L637) und Westhafen (L832) in Hessen, da hier abweichend von den anderen GMA-Systemen im Testgebiet auch die gemessene Niederschlagsmenge und die Niederschlagsintensität archiviert worden sind und somit eine nachträgliche Zuordnung der Wetterklasse eindeutig möglich war.

Bild 5-17 und Bild 5-18 zeigen, dass die Anteile der prognostizierten Wetterklasse 1 (kein Nieder-

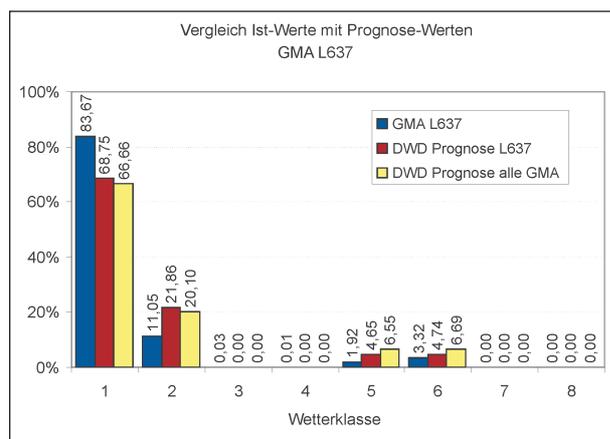


Bild 5-17: Häufigkeitsverteilung der Wetterklassen an der GMA Wetterau (Standort L637)

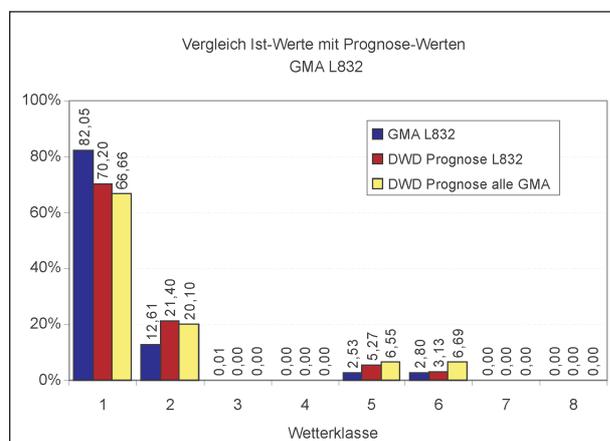


Bild 5-18: Häufigkeitsverteilung der Wetterklassen an der GMA Westhafen (Standort L832)

schlag) an beiden GMA-Standorten unter den Anteilen der gemessenen Werte liegen. Für die übrigen Wetterklassen liegen die Anteile der Wetterklassen aus den gemessenen GMA-Daten über den Anteilen aus der Prognose. Die DWD-Wetterprognose sagt demnach tendenziell „kritischeres“ Wetter gegenüber der Realität voraus. Die Klassen 3 und 4 am GMA-Standort Wetterau sind nur sehr selten gemessen worden. Am Standort Westhafen ist die Wetterklasse 3 gering vertreten, die Wetterklasse 4 ist nicht vertreten.

Bei Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der prognostizierten Niederschlagsmengen (Bild 5-19) fällt auf, dass es eine Häufung für extrem niedrige Niederschlagsmengen in der Niederschlagsklasse 0 (0-0,49 mm) gibt. Niederschlagsmengen > 6 mm wurden in den Stundenwerten des DWD nicht vorhergesagt. Stellt man die prognostizierten Niederschlagsintensitäten den gemessenen Werten an den hessischen GMA-Standorten gegenüber, lässt

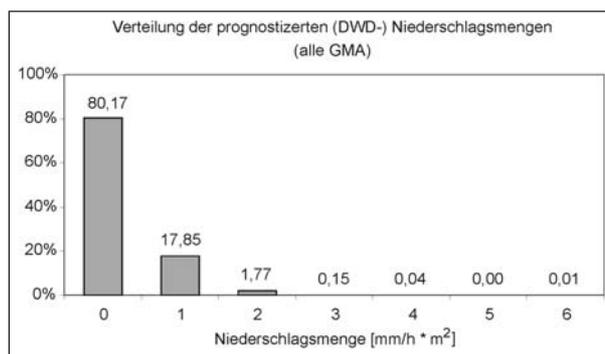


Bild 5-19: Verteilung der prognostizierten Niederschlagsmengen

sich festhalten, dass die gemessenen Niederschlagsintensitäten unter den prognostizierten liegen und die DWD-Prognose Niederschlagsereignisse zur „sicheren Seite“ voraussagt. Hohe Niederschlagsintensitäten, die wie im Kapitel zur Modellentwicklung beschrieben vielfach aus kurzzeitigen starken Niederschlagsereignissen herrühren, werden von der Wetterprognose jedoch nicht abgebildet. Dem Umstand, dass Wetterklassen mit Niederschlagsintensitäten $\geq 7,5$ mm/h demnach nicht klassifiziert worden sind, wurde daher in einer abschließenden Überarbeitung der Wetterklassifikation Rechnung getragen (vgl. Kapitel 4.4.4).

Abschließend sei noch auf ein Fallbeispiel aus der betrieblichen Evaluierung hingewiesen. Am 02./03. Februar 2010 fielen im Bereich der A 45 große Schnee-Niederschläge innerhalb kurzer Zeit. In Diskussion mit den Feldversuchsteilnehmern wurde die Beobachtung geäußert, dass für diese Witterungssituation massive kurzfristige Korrekturen an der Wetterprognose zu beobachten waren sowie erhebliche Fehlprognosen der Wetterentwicklung auftraten. Im Nachgang wurde für diesen Zeitraum eine Datenauswertung erarbeitet, welche diese nachvollzieht. Es stellte sich heraus, dass bisweilen personenabhängig inhaltliche Korrekturen an den meteorologischen Prognosen durchgeführt werden. Fallweise treten dabei Widersprüche zwischen den von Meteorologen verfassten Textprognosen und den datenbasierten Modellprognosen auf. Das für den Winterdienst zuständige Personal nutzt daher unterschiedliche Datenquellen mit Prognosen parallel für die Entscheidungsfindung, um die Problematiken der nicht aktualisierten (nachgesteuerten) datenbasierten Prognosen bzw. der Interpretation des Wettergeschehens durch die Meteorologen in den textbasierten Berichten zu handhaben.

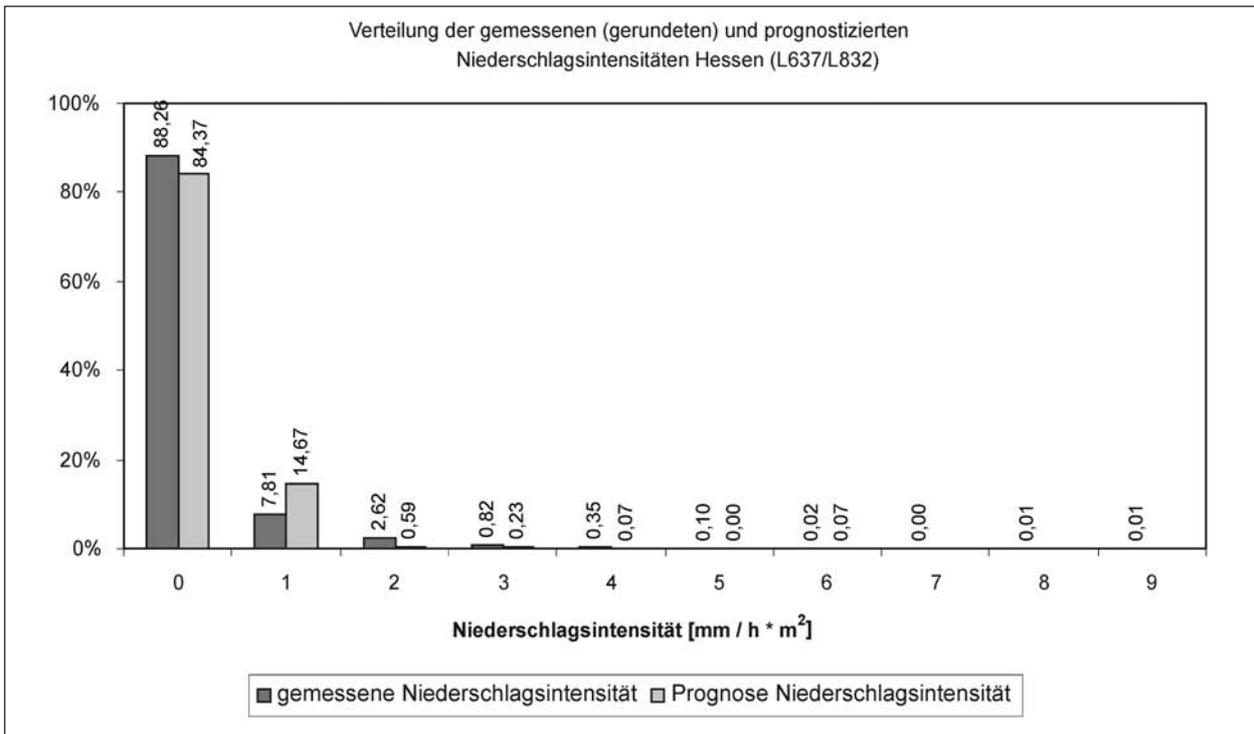


Bild 5-20: Verteilung der gemessenen und prognostizierten Niederschlagsintensitäten Hessen (Standorte L637/L832)

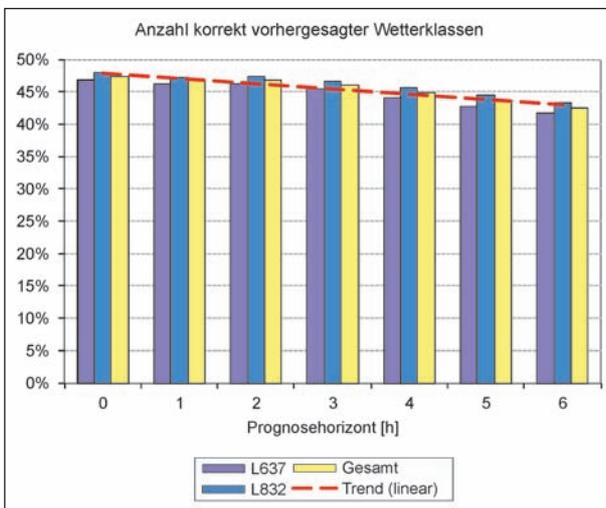


Bild 5-21: Anzahl korrekt vorhergesagter Wetterklassen

Da in den Häufigkeitsverteilungen der Abbildungen kein zeitlicher Bezug enthalten ist, kann hieraus noch keine Aussage zur Güte der Wetterprognose abgeleitet werden. Daher wurde ein Vergleich der Ist-Werte mit den prognostizierten Werten der Wetterklassen durchgeführt. Zu beachten ist hierbei, dass die Wetterklassen aus den Stundenwerten der Wetterprognose mit den zeitlich viel feiner aufgelösten Wetterklassen aus den gemessenen Daten gegenübergestellt werden müssen. Aufgrund der teilweise nur kurzzeitig andauernden Wetterereignisse sind daher prinzipiell bedingte Abweichungen

unvermeidbar. Für die Prognosehorizonte im Untersuchungszeitraum wurde aus dieser Überlegung heraus die Übereinstimmung der Wetterklassen mit den zeitlich feiner aufgelösten Wetterklassen aus den gemessenen GMA-Daten bestimmt und als Prozentsatz angegeben. Das Ergebnis ist in Bild 5-21 dargestellt. Die Genauigkeit der Wetterprognose liegt demnach für die aktuelle Stunde bei knapp 50 % und fällt mit zunehmendem Prognosehorizont leicht ab. Zwar ist die Wetterprognose als Eingangsgröße für die Kapazitätsprognose von entscheidender Bedeutung, und der ermittelte Absolutwert der Genauigkeit liegt weit von einer durchgehend exakten Vorhersage entfernt. Allerdings wird, auch in Rücksprache mit den am Projekt beteiligten Fachvertretern des DWD, die Treffergenauigkeit als hinreichend erachtet, da bei dieser Betrachtung kurzzeitige Ereignisse wie z. B. kurzzeitige Schneeschauer auf Stundenwerte aggregiert werden. Die Vorhersage ist somit tendenziell zur sicheren Seite ausgelegt und bildet die ungünstigste anzunehmende Witterungssituation ab.

5.7.2 Analyse der Stauprognose

Um Aussagen über die Güte der Stauprognose treffen zu können, wurde die zuletzt berechnete Stauprognose für die jeweils aktuelle Stunde ausgewertet. Versucht wurde, die Fragen zu beantworten,

wie oft die Stau prognose korrekt war, wie oft das Modell zu wenig sensitiv reagiert hat und wie oft das Modell eine falsche Prognose vorherberechnet hat. Hierfür sind die in Bild 5-22 dargestellten 8 Analyseklassen definiert worden, die die Richtigkeit, Sensitivität und Fehlerhaftigkeit des Stau prognosemodells beschreiben.

Zu beachten gilt es, dass die Analyseklasse 8 auch überlastbedingte Staus, Staus infolge von Unfällen oder entgegen der Planungsgrundlage im Prognosezeitraum nicht freigegebene Seitenstreifen enthält. Diese Staus sind nicht dem Prognoseverfahren anzulasten. Ferner werden in dieser Fehlerklasse auch „Phantomstaus“ mitgezählt, d. h. ein Überschreiten des Ausgangswerts der Kapazität in der Wetterklasse 1 (Nullfall) durch die Referenzganglinie der Verkehrsnachfrage. In diesem Fall liegt die nicht individuell für die Streckenabschnitte parametrisierte, sondern aus dem HBS übernommene Kapazität im Nullfall zu niedrig.

Das Ergebnis der Analyse ist in Bild 5-23 dargestellt. Dabei zeigt das Ergebnis, dass in über 94 % der Prognosestunden das Modell korrekt reagiert hat. Zu diesem an sich hohen Prozentsatz bleibt allerdings entsprechend den vorausgegangenen Ausführungen anzumerken, dass in über 60 % der Zeit im Untersuchungszeitraum kein Niederschlagsereignis eingetreten ist. Es bleibt positiv zu werten, dass das Berechnungsmodell offenkundig auch nicht winterliche, trockene Fahrbahnzustände und somit für den Verkehrsablauf vorteilhafte Witterungszustände korrekt erkennt und in der Prognose abbildet.

Eine weitere Anmerkung besteht darin, dass in verkehrlichen Schwachlastzeiten auch bei winterlichen Verhältnissen die verminderte Kapazität von der prognostizierten bzw. gemessenen Nachfrage nicht überschritten wird. Dieser Sachverhalt schränkt die Anzahl auswertbarer Fälle, in denen Streckenabschnitte an der Grenze ihrer Kapazität betrieben wurden, nennenswert ein. Eine aus dieser Überlegung durchgeführte weitergehende Untersuchung, die den Analysezeitraum auf ein morgendliches Zeitfenster zwischen 6 h und 10 h mit starker Verkehrsnachfrage eingrenzt, ergibt ein anderes Bild. Hier reagiert das Modell in rund 60 % der Prognosestunden korrekt. Bild 5-24 stellt die Ergebnisse beispielhaft für den hochbelasteten Abschnitt Frankfurt Flughafen-Nord – Frankfurter Kreuz an der A 5 dar. Auffällig ist, dass die Analyseklasse 7 (Stualarm bei freiem bzw. lebhaftem

Analyseklasse	Prognosemodell	gem. LOS	Auswertung	Farbe
1	Warnung	dicht/zäh	OK	[Grün]
2	Alarm	Stau		
3	-	frei/lebhaft		
4	Warnung	Stau	Modell zu wenig sensitiv	[Blau]
5	Alarm	dicht/zäh		
6	Warnung	frei/lebhaft	Fehler!	[Orange]
7	Alarm	frei/lebhaft		
8	-	zäh/dicht/Stau		

Bild 5-22: Legende der Analyseklassen

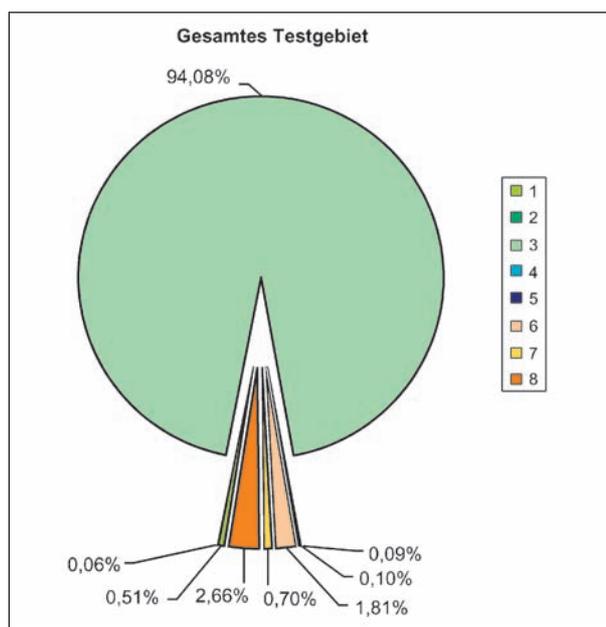


Bild 5-23: Verteilung der Analyseklassen für die Prognose der aktuellen Stunde im Testzeitraum

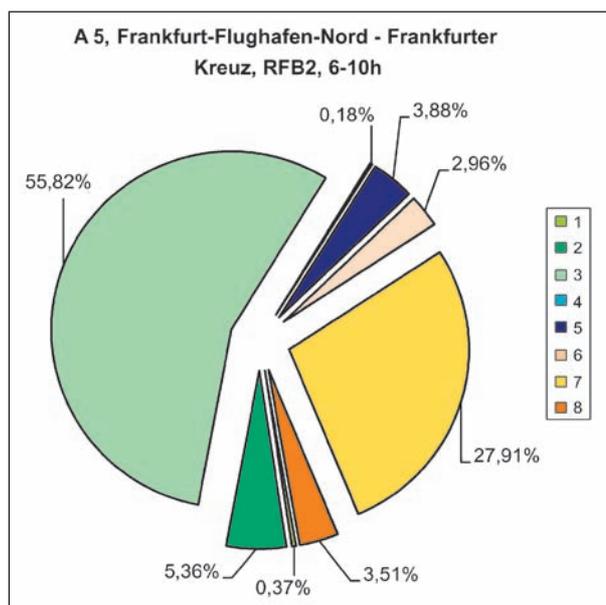


Bild 5-24: Verteilung der Analyseklassen für die Prognose der aktuellen Stunde morgens zwischen 6 h und 10 h

Verkehr) fast 30 % ausmacht. Dies ist u. a. der Tatsache geschuldet, dass die aus den HBS übernommenen Kapazitätswerte in diesen hochbelas-

teten Abschnitten der A 5 zu gering gewählt worden sind und in der Modellprognose zu „Phantomstaus“ geführt haben. Eine abschnittsweise Kalibrierung der Kapazität erscheint daher sinnvoll und erforderlich.

Betrachtet man die Analyseklassen differenziert nach den Autobahnen im Testgebiet (Bild 5-25), lässt sich feststellen, dass an allen Autobahnen der Anteil der Analyseklasse 3 (keine Stauwarnung bei freiem/lebhaftem Verkehr) über 90 % liegt. An der A 46 liegt der Anteil knapp über 99 %. Die geringen Belastungen (< 1.300 Kfz/h) der A 46 haben zu keinen Stauwarnungen bzw. Stualarmen auch bei prognostizierter Kapazitätseinschränkung geführt. Eine Analyse der Verkehrsmeldungen hat ergeben, dass Staumeldungen nur für den Abschnitt Meschede – Bestwig vorlagen, Diese Staus sind durch die Kapazitätseinschränkung am Ende der Autobahn, also am Übergang des hochrangigen ins nachgeordnete Straßennetz, vor allem an Wochenenden mit erhöhtem Freizeitverkehr im Sauerland zurückzuführen. Nennenswerte witterungsbedingte Staus konnten dort in beiden Pilotphasen nicht nachgewiesen werden.

Die Verteilung der Analyseklassen 2, 4 und 8 zeigt, dass Fehler gehäuft in der Wetterklasse 1 (kein Niederschlag/kein Kapazitätsabschlag) auftreten (siehe Bild 5-26). Dies ist u. a. auf „Phantomstaus“ auf der hochbelasteten A 5 zurückzuführen, deren Kapazitätswerte zunächst auf den Werten des HBS beruhen. Die Stundenwerte der Kapazität des HBS sind oftmals von der zeitlich feiner aufgelösten, auf 15-min-Intervallen basierenden Nachfrage, die im Modell hinterlegt war, überschritten worden. Eine Übertragung der für Stunden-Intervalle geltenden HBS-Kapazitäten auf andere Zeitintervalle ist eigentlich nicht zulässig, daher wurden im Laufe des Feldversuchs die parametrisierten Kapazitätswerte der A 5 erhöht. Die fahrstreifenbezogene Kapazität wurde im Zeitraum montags bis freitags auf 2.100 Fahrzeuge/Stunde heraufgesetzt.

Eine abschnittsweise Kalibrierung der Kapazität erscheint daher wie bereits erläutert sinnvoll und erforderlich. Zusätzlich sind in den Fehlern der Wetterklasse 1 „Staus ohne Witterungseinfluss“ enthalten, deren Ursache z. B. in einer fehlenden Freigabe des Seitenfahrstreifens aufgrund einer Panne oder Unfällen zurückzuführen ist. Weiterhin schlägt in den Fehlern aller Wetterklassen die Treffergenauigkeit der Wetterprognose (max. 50 %) durch.

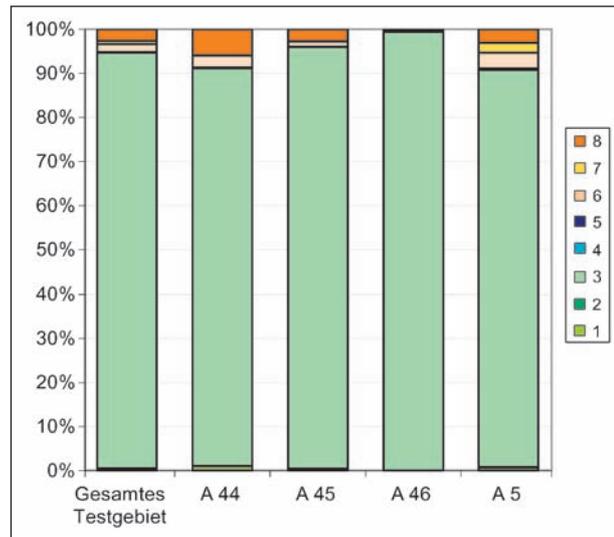


Bild 5-25: Verteilung der Analyseklassen differenziert nach Autobahnen im Testgebiet

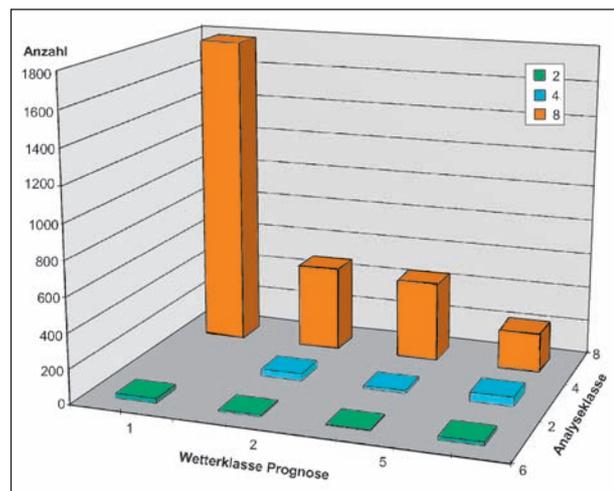


Bild 5-26: Verteilung der Analyseklassen 2, 4, 8 (Staus)

5.7.3 Analyse der Verkehrsnachfrage bei wetterbedingten Sonderereignissen

Am 09.01.2010 zog das Tief „Daisy“ mit starken Schneefällen und orkanartigen Böen über Deutschland hinweg. Neben den ausgegebenen Unwetterwarnungen des Deutschen Wetterdienstes wurde auch in den Medien intensiv und umfassend vor der witterungsbedingten Sondersituation gewarnt. Die verbreiteten Ratschläge, Vorräte an Lebensmitteln und Medikamenten aufzustocken und unnötige Autofahrten so weit wie möglich zu vermeiden, sollten die Bevölkerung in „Alarmbereitschaft“ versetzen. Die wetterbedingte Sondersituation führte im Testgebiet zu einem erheblichen Rückgang der Verkehrsnachfrage in einer Größenordnung von ca. 30 %. In Bild 5-27 sind den Prognosedaten für die-

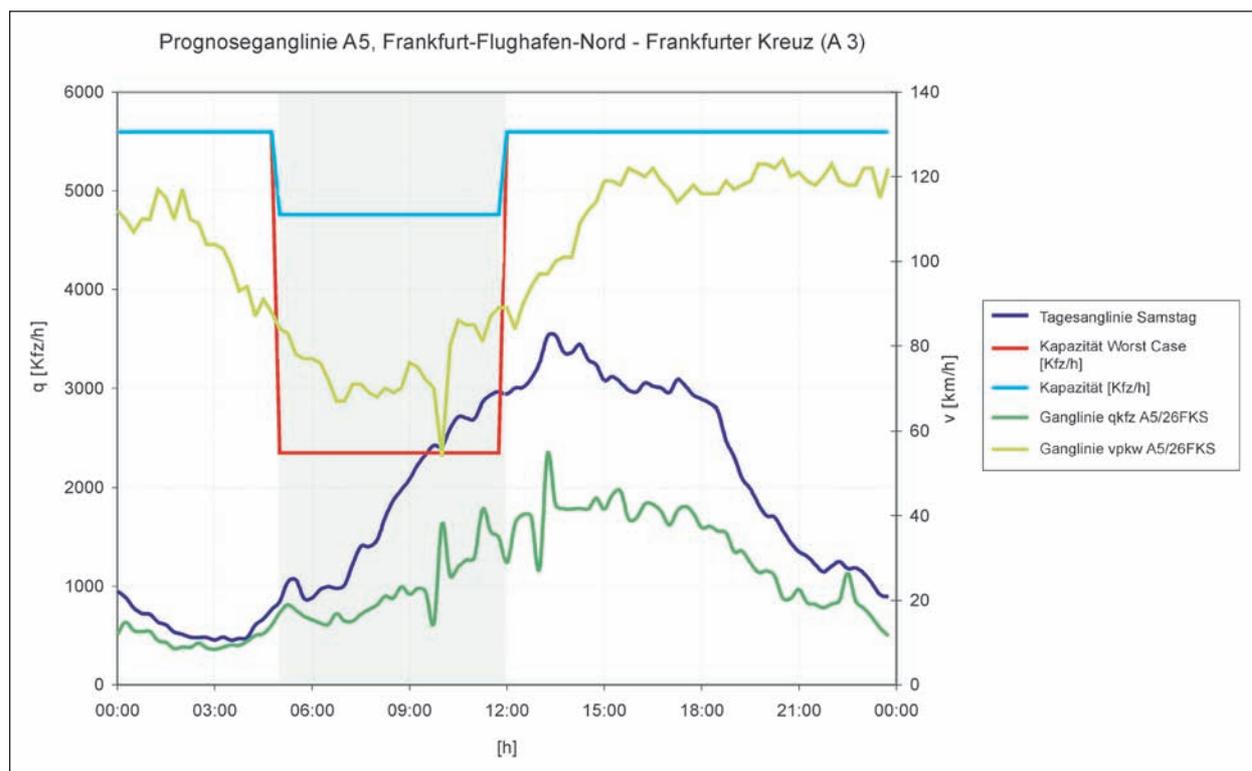


Bild 5-27: Verkehrsnachfrage am 09.01.2010 (Tief „Daisy“)

sen Tag die gemessenen Verkehrsdaten beispielhaft für den Abschnitt Frankfurt Flughafen-Nord – Frankfurter Kreuz an der A 5 gegenübergestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die gemessene Nachfrage weit unter der prognostizierten Nachfrage liegt.

Zwischen 2:00 h und 15:00 h ist ein Geschwindigkeitsrückgang ablesbar, der auf winterliche Fahrbahnzustände zurückgeführt werden kann. Die dargestellte Stauprognose für 5:00 h weist eine Stauwarnung erst ab 9:00 h auf. Dies zeigt, dass Sondersituationen mit stark veränderten Nachfrageganglinien in der Prognose nicht nachgebildet werden können.

5.7.4 Analyse des Winterdienstes

Nach Abschluss des Feldversuches wurden die bereitgestellten Einsatzberichte des Winterdienstes im Testgebiet untersucht. Diese liegen abhängig von der Art der Erfassung der Tätigkeiten regional in unterschiedlichen Qualitäten und unterschiedlichen, teilweise proprietären Formaten vor. Aufgrund des hohen Aufwandes für die Bereitstellung der Daten beschränkte sich die Auswertung der Einsatzberichte auf ausgewählte Abschnitte und Zeiträume des Feldversuchs. Dabei erwies sich die Zuord-

nung der Einsatzberichte zu den Abschnitten und Zeiten der Winterdienstdurchführung zum Teil als schwierig bzw. nicht nachvollziehbar.

Die Untersuchungen und der Abgleich mit den zur Verfügung stehenden verkehrlichen Messdaten ergaben, dass Räumfahrten zähfließenden Verkehrsablauf auslösen können. Dabei besteht eine grundsätzliche Abhängigkeit von der Art des Einsatzes und der Verkehrsbelastung. In Schwachlastzeiten, z. B. während der Nachtstunden, kann hingegen die verkehrliche Auswirkung nicht messbar sein. Die zeitliche Auswirkung der Winterdienstmaßnahmen dauert im Regelfall nur kurz. Ein spezieller, dem Winterdienst zugeordneter Kapazitätswert konnte daher nicht unmittelbar abgeleitet werden. Ebenso erscheint aus diesem Grund die Berücksichtigung in der (stundenscharfen) Prognose nicht sinnvoll.

Das Ziel einer kapazitätsbewerteten Prognose des Verkehrsablaufs aus der Sicht des Winterdiensteinsatzes besteht im rechtzeitigen Auslösen der Aktivitäten und der Verkehrsmanagement-Maßnahmen unter Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens. Es bleibt als Rahmenbedingung festzuhalten, dass der Dispositionsspielraum des Winterdienstes sehr gering ist, sobald die Einsätze angelaufen sind.

	Uhrzeit	Std.	Strasse	Typ	Räum-km	Streu-km	Salz g/m ²	Soße g/m ²	Breite m	Temperatur Luft °C	Boden
17	13:09	0:28	Hoftest		0,000	0,500	7	3	8,0	2,0	0,0
18	13:37	0:12	AS Arnsb.Ost		0,000	6,700	8	3	7,8	0,8	0,0
19	13:49	0:07	AS Freienohl		0,000	2,100	9	4	5,0	0,6	0,0
20	13:56	0:09	AS Wennemen		0,000	4,400	9	4	5,5	0,4	0,0
21	14:05	0:06	AS Enste		0,000	2,600	9	4	5,5	0,4	0,0
22	14:11	0:04	Sonde Fulmecke		0,000	0,900	9	4	5,5	0,1	0,0
23	14:15	0:14	AS Meschede		0,000	6,500	9	4	5,5	-0,1	0,0
24	14:29	0:07	AS Velmede		0,000	5,500	10	4	5,5	-0,4	0,0
25	14:36	0:06	AS Meschede		0,000	3,500	10	4	5,5	-0,5	0,0
26	14:42	1:35	AS Enste		0,000	9,300	11	5	5,8	-0,6	0,0
27	16:17	0:46	AS Velmede		0,000	23,200	12	5	5,9	-2,1	0,0
28	17:03	0:31	AS Arnsb. Altstadt		0,000	18,600	12	5	5,9	-2,4	0,0
29	17:34	0:10	Sonde Fulmecke		0,000	6,300	13	5	6,0	-3,1	0,0
30	17:44	0:11	AS Velmede		0,000	2,600	13	5	6,6	-3,1	0,0
31	17:55	0:06	AS Meschede		0,000	3,400	12	5	7,5	-2,4	0,0
32	18:01	0:14	AS Enste		0,000	6,200	13	4	5,8	-2,3	0,0
33	18:15	0:15	AS Wennemen		0,000	8,800	17	1	4,9	-2,4	0,0
34	18:30	0:12	AS Arnsb.Ost		0,000	5,600	18	0	4,9	-2,5	0,0
35	18:42	0:17	AS Wennemen		0,000	8,900	17	0	6,1	-2,3	0,0
36	18:59	0:30	AS Enste		0,000	0,200	18	0	6,5	-2,3	0,0
38	Summe: 6:20										
42	Gesamteinsatzstd.				6:20	Fahrstrecke		164,000 km			
44	Bund Land Kreis Allg. Streustoffverbrauch										

Bild 5-28: Automatisch erstelltes Einsatzprotokoll des Winterdienstes

Bei den im Rahmen der Feldversuchsauswertung befragten Autobahnmeistereien wird im Regelfall mit einem Grundbestand von vier Winterdienstfahrzeugen gearbeitet. Die eingesetzte Flotte kann auf sechs, im Tagesdienst ggf. sieben Fahrzeuge aufgestockt werden, sofern das erforderliche Personal verfügbar ist.

Für den Bereich der AM Lüdenscheid wurden abhängig von der konkreten Witterungssituation und der Verfügbarkeit ein bis drei Fahrzeuge mit Personal der AM Hagen angefordert und dort eingesetzt. Das „Verschieben“ von Winterdienstfahrzeugen und der Einsatz werden durch die Winterdienstzentrale Hamm des Landesbetriebs Straßenbau Nordrhein-Westfalen koordiniert.

Die Optimierung der Einsatzplanung berücksichtigt bereits jetzt verkehrliche Anforderungen. So werden z. B. an Freitagnachmittagen aufgrund der zu erwartenden Hauptreiserichtung Einsatzschwerpunkte der AM Lüdenscheid auf der A 45 nordwärts gebildet.

6 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

6.1 Prognosemodell

Als Ergebnis des Forschungsvorhabens wurde ein Simulationsverfahren für die Ermittlung von Streckenkapazitäten auf BAB bei winterlichen Straßenzuständen erarbeitet. Das Verfahren wurde auf robuste Verfahrensweise ausgelegt, um auftretende Ungenauigkeiten und Fehler von Eingangsgrößen auszugleichen. Es orientiert sich an den technischen Rahmenbedingungen wie z. B. die Eigenschaften der derzeit verfügbaren Daten der Wetterprognose und der Umfelddatenerfassung. Zugleich werden die Anforderungen an die Nutzung der Prognoseergebnisse berücksichtigt.

Das nachgeschaltete Prognoseverfahren ist als zweistufiger Ansatz auf der Grundlage eines nachfrageganglinienbasierten Warteschlangenmodells gestaltet. Es besitzt eine Planungsprognose für die vorausschauende Disposition sowie eine Kurzfrist-

darstellung für die operative Durchführung des Winterdienstes, des Straßenbetriebsdienstes, des Arbeitsstellenmanagements und des Verkehrsmanagements. Die Ergebnisse können somit als Entscheidungshilfe verwendet werden. Beide Komponenten setzen auf den gleichen grundsätzlichen Vorgehensweisen für die Prognose auf.

Ausgehend von einer Grundkapazität der Streckenabschnitte in Anlehnung an das HBS wurden Abschlagsfaktoren für die jeweils vorherrschende Witterungssituation ermittelt. Diese Witterungseigenschaften wurden zuvor anhand charakteristischer Eingangsgrößen zusammengefasst und als Wetterklassen definiert. Im Verlauf der Untersuchungen stellte sich heraus, dass in den einzelnen Wetterklassen keine allgemeingültigen Abschlagsfaktoren auftreten. Vielmehr ergeben sich starke Streuungen der Kapazitätswerte auch bei vergleichbaren winterlichen Witterungs- und Fahrbahnzuständen. Unter diesen Rahmenbedingungen stellte es sich als sinnvoll heraus, durch die Definition von jeweils zwei Abschlagsfaktoren eine Abbildung der Bandbreite möglicher Kapazitätsreduktionen im Verfahrensansatz zu ermöglichen. Die Parameter beziffern somit zum einen den durchschnittlich zu erwartenden Kapazitätseinbruch und zum anderen den Kapazitätsabschlag in selteneren, aber dennoch relevanten Sondersituationen (worst case).

Die im Feldversuch genutzten Definitionen der Wetterklassen und die zugehörigen Abschlagsfaktoren wurden in der praktischen Anwendung analysiert und als angemessen und zutreffend bewertet. Die zwischenzeitlich erfolgte Verfeinerung des Klassifikationsmodells beinhaltet die sinnvolle Fortentwicklung mit dem Ziel einer zusätzlichen Differenzierung der Witterungssituationen unter besonderer Berücksichtigung der Niederschlagsintensität.

Das vorgestellte Verfahren erlaubt durch individuelle Wahl der Grundkapazität eine vereinfachte Modellierung von „verkehrlichen Brennpunkten“ mit Netzwirkung. Die orts- und zeitabhängige Kalibrierung der Grundkapazität im Netz wird daher als sinnvoll erachtet. Darüber hinaus wird angeregt, eine Dynamisierung der Ganglinien, z. B. durch Modellierung des Befolungsgrades bei Verkehrsmanagementmaßnahmen und Nachfragerückgang bei Wetterwarnung, vorzunehmen. Das Ziel besteht mittelfristig im Aufbau einer Ganglinien-Wissensbasis für witterungsbedingte Sondersituatio-

nen. Es bleibt festzuhalten, dass sich extreme Sonderfälle („Jahrhundertereignisse“) grundsätzlich einer modelltechnischen Abbildung durch Prognoseverfahren entziehen. Die als Grundversorgung für die Kapazität der Abschnitte herangezogenen HBS-Werte sind auf Stunden bezogen. Sofern Ganglinien mit abweichender Stützstellenweite, z..B. 15 min, herangezogen werden, ist eine Umrechnung der HBS-Werte erforderlich.

Es bleibt offensichtlich, dass die Güte der Wetterprognose für die korrekte Auswahl der Wetterklasse entscheidend ist. Die Zuverlässigkeit der nachfolgend aufgesetzten Prognose des Verkehrsablaufs korreliert daher unmittelbar mit der Qualität der Eingangsgröße Wetterprognose. Aus diesem Grund ist der Bereitstellung hochwertiger und kleinräumiger Wetterprognosen für den Straßenbetriebsdienst die erforderliche Aufmerksamkeit zu widmen.

Eine Rückkopplung der Messdaten aus Glättemeldeanlagen auf die DWD-Wetterprognose zum Nachsteuern der Prognose findet nicht statt und ist in näherer Zukunft nicht vorgesehen. Hier bieten sich ggf. Optimierungsmöglichkeiten, um für den Anwender irritierende widersprüchliche Prognosen und Messwerte zu vermeiden.

Von einer Abschätzung der Auswirkung von Winterdiensteseinsätzen auf die Kapazität wurde abgesehen, da sich kein konkreter Kapazitätswert unmittelbar zuordnen lässt. Zudem betreffen die Auswirkungen im Regelfall nur kurze Zeiträume, während die Verkehrsprognose auf Stundenwerten basiert. Eine Modellierung in der im Rahmen des Vorhabens entwickelten Prognosealgorithmik erscheint daher nicht als sinnvoll.

Denkbar ist eine Erweiterung der Auswertung des Prognoseverfahrens um die Bemessung des Staurisikos durch eine zeitlich gewichtete Bewertung der Differenz von Verkehrsstärke und Kapazität. Ebenfalls möglich ist die Beschreibung der Ausprägung des Staus. Hierzu sollten Attribute wie prognostizierte Staulängen, Reisezeitverluste oder volkswirtschaftlicher Schaden modelliert werden. Des Weiteren könnten Auswirkungen von Winterdiensteseinsätzen auf die Kapazität sowie Modellierung einer dynamisch adaptierten Verkehrsnachfrage sinnvolle betriebliche Erweiterungen der Prognose darstellen.

6.2 Betriebliche Einbettung

Aufgrund der gewonnenen Betriebserfahrungen wird die Aussage unterstützt, dass das Ziel der Prognose im rechtzeitigen Auslösen des Winterdienstesinsatzes und der Verkehrsmanagement-Maßnahmen unter Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens besteht. Der Dispositionsspielraum im Winterdienst bleibt jedoch sehr gering, wenn Einsätze angelaufen sind bzw. aufgrund der Verkehrssituation nicht störungsfrei durchgeführt werden können.

Nach Aussage der Feldversuchspartner ist beim örtlichen Personal im Regelfall ausreichendes Erfahrungswissen für das fachgerechte Auslösen und Durchführen der Winterdienstesätze unter Beachtung der verkehrlichen Anforderungen vorhanden. Im Fall von personellen Vertretungen bzw. zum Erfahrungsaufbau bei neu eingesetzten Kollegen wird das im Forschungsvorhaben genutzte Prognosewerkzeug als hilfreiche Ergänzung für die Entscheidungsfindung empfunden.

Die Inhalte der Winterdienstprognose werden von den Feldversuchsteilnehmern als wertvoll für die Nutzung zur Fahrerinformation angesehen. Somit wird der Betrieb eines derartigen Ansatzes unter Federführung des Verkehrsmanagements unter Abgleich mit weiteren Werkzeugen der Stauprognose als sinnvoll bewertet.

Eine optionale Integration der Prognoseverfahren in SWIS wird aus der Sicht der Anwender nicht angestrebt, da die Komplexität des Gesamtsystems anwachsen würde. Für die Verwendung eines eigenständigen Verfahrens zur verkehrlichen Prognose spricht gerade die einfache, intuitive Nutzung, wie sie in der Feldversuchsanwendung gegeben war.

Vom Straßenbetriebsdienst wird die Darstellung in Form eines Streckenbandes bzw. als Liste – ähnlich der Feldversuchsanwendung – gewünscht. Die alternative Darstellung als Karte wird von den Autobahnmeistern als zu komplex bewertet.

Die Mitarbeiter der Winterdienstzentrale halten die Kartendarstellung hingegen für hilfreich, da sie eher netzbezogen arbeiten. Eine schematisierte Netzplandarstellung mit Orientierungspunkten wird als ausreichend angesehen.

Die Qualität der Daten der Glättemeldeanlagen wird von den Anwendern als kritisch angesehen.

Die korrekte Funktion der Einrichtungen wird oftmals nach Auftreten der ersten Wintersituationen getestet. Eine ggf. erforderliche Kalibrierung oder Reparatur der Anlage ist nachfolgend witterungsbedingt kaum mehr möglich. Optionen für die Verbesserung dieser Situation bestehen darin, für die Erfassung von Umfelddaten Redundanzen zu schaffen oder z. B. den Einsatz von Videokameras für die Beurteilung der Situation durch Winterdienstpersonal zu ermöglichen.

Spezielles Augenmerk ist auf die Bereitstellung der jeweils aktuellen Grundkapazitäten der Streckenabschnitte zu legen. Insbesondere die Effekte von temporären Fahrstreifenwegnahmen durch Arbeitsstellen müssen für eine korrekte Prognose der Kapazität und des Verkehrsablaufs bekannt sein. Daher besteht die Anforderung, die erforderlichen Angaben aus Baustelleninformationssystemen über Datenschnittstellen an das Prognosemodell anzukoppeln.

6.3 Fazit

Die im Forschungsvorhaben entwickelte modelltechnische Abbildung der witterungsbedingten Kapazitätseinschränkung und ihrer Auswirkungen auf den Verkehrsablauf durch zwei Risikostufen in Form einer „Warnung“ und eines „Alarms“ hat sich in der Evaluierung bewährt.

Eine praxisbezogene Interpretation der Prognose-Ergebnisse ist möglich. Die Modellbildung bietet dabei mehr als die reine Prognose-Information „Stau“ bzw. „Kein Stau“.

Das Verfahren stellt nachvollziehbare und sinnvolle Prognosen des Verkehrszustands bereit, die für den Winterdienst und das Verkehrsmanagement genutzt werden können, um auf sich abzeichnende problematische Verkehrslagen und Situationen hinzuweisen und Reaktionsstrategien auszulösen.

7 Literatur

ALPPIVUORI, 1994

ALPPIVUORI, K. et al.: Friction tires and studded tires in different circumstances. Helsinki 1994. Finnra 68/1994. TIEL 4000098

BADEL, 2003

BADEL: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst. Abschlussbericht zum Projekt 99652, BASt, Bergisch Gladbach, Juni 2003

BADEL, 2006

BADEL et al.: Prüfung von Sensoren für Glätteldealanlagen. BASt, Verkehrstechnik, Heft V 14

BATHELT, 1971

BATHELT, H.: Analytische Behandlung der Strömung in der Aufstandsfläche schnell rollender Reifen auf nasser Fahrbahn („Aquaplaning“) (Dissertation). Technische Hochschule, Wien, Österreich

BECKMANN, 2005

BECKMANN, A.: Untersuchung und Eichung von Verfahren zur aktuellen Abschätzung von Staudauer und Staulängen infolge von Tages- und Dauerbaustellen auf Autobahnen. Schlussbericht zum Forschungsprojekt 03.313/1998/IGB des Bundesministeriums für Verkehrs, Bau- und Wohnungswesen. Mai 2000, Universität Kassel

BMVBW, 2004

Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Maßnahmenkatalog Straßenbetriebsdienst (MK 6a) – Optimierung von Einsatzverfahren – Empfehlungen für die Organisation bei Autobahn- und Straßenmeistereien. Bonn, 2004

BRILON et al., 2010

BRILON, W.; GEISTEFELDT, J.: Überprüfung der Bemessungswerte des HBS für Autobahnabschnitte außerhalb Knotenpunkten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1033, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Bonn

BRILON et al., 2005

BRILON, W.; REGLER, M.; GEISTEFELDT, J.: Zufallscharakter der Kapazität von Autobahnen und praktische Konsequenzen. Straßenverkehrstechnik 03/2005, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2005

BRILON, 2003

BRILON, W.; ZURLINDEN, H.: Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 870, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Bonn

ungskriterium für Straßenverkehrsanlagen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 870, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.), Bonn

CAPREZ, 2001

CAPREZ, M.: Griffigkeit von Fahrbahndecken aus Asphalt und Beton, Erfahrungen in der Schweiz. ETH Zürich, Straße und Verkehr, 1, 2001

CASSELGREN et al., 2007

CASSELGREN, J.; SJÖDAHL, M.; LeBLANC, J.: Angular spectral response from covered asphalt. Applied optics, 10 July 2007, Vol. 46, No. 20

CRESWELL et al., 1973

CRESWELL, J. S.; CUNLAP, C. F.; GREEN, J. A.: Effects of Studded Tires Highway Safety Non Winter Driving Conditions. Final Report Prepared for Highway Research Board National Cooperative Highway Research Program National Academy of Sciences, Highway Safety Research Institute, University of Michigan, July 1973

CYPRA et al., 2006

CYPRA, T.; ROOS, R.; ZIMMERMANN, M.: Optimierung des Winterdienstes auf hochbelasteten Autobahnen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 135, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2006

CYPRA, 2007

CYPRA, T.: Entwicklung einer Entscheidungsmethode für Maßnahmen im Winterdienst auf hochbelasteten Bundesautobahnen. Heft 56 des Instituts für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2007

ERVIN, 1990

ERVIN, R.; BALDERAS, L.: Hydroplaning With Lightly-Loaded Truck Tires. Final Report, March 1990, UMTRI, the University of Michigan, Transportation Research Institute

FACH, 1996

FACH, M.: Einflussgrößen auf den Kraftschluss bei Nässe. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Reihe Fahrzeugtechnik Heft F 21, Bergisch Gladbach

FACH, 1999

FACH, M.: Lokale Effekte der Reibung zwischen Pkw-Reifen und Fahrbahn (Dissertation). Fachbereich Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt, 1999

FGSV, 1968

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe. Ausgabe 1968, Köln

FGSV, 2004

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt, (Entwurf) 2004: Das Fundamentaldiagramm – Grundlagen und Anwendungen. FGSV Forschungsgesellschaft für Straßenwesen, Berlin, Oktober 2004

FGSV HBS, 2005

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS). Köln, 2001, Ausgabe 2005

FGSV MBGriff, 2003

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe. MBGriff, Ausgabe 2003, Arbeitsgruppe Fahrzeug und Fahrbahn, FGSV Verlag

FGSV Umfelddaten, 2010

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Hinweise zur Erfassung und Nutzung von Umfelddaten in Streckenbeeinflussungsanlagen. FGSV Verlag, 2010

FGSV RAS-L, 1995

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Linienführung (RAS-L). Ausgabe 1995, Köln

GALLAWAY et al., 1972

GALLAWAY, B. M.; ROSE, J. G.; SCHILLER, jr., R. E.: The Relative Effects of Several Factors Affecting Rainwater Depths on Pavement Surfaces. Highway Research Board (HRB), Highway Research Record Nr. 396, Washington D. C., USA, S. 59-69

GENGENBACH, 1967

GENGENBACH, W.: Das Verhalten von Kraftfahrzeugreifen auf trockener und insbesondere nasser Fahrbahn (Dissertation). Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Universität Karlsruhe, Karlsruhe

GNADLER, 1980

GNADLER, R.: 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

GUNN, 1957

GUNN, K. L. S.; MARSHALL, J. S.: The Distribution with Size of Aggregate Snowflakes. McGill University

HANKE, 2004

HANKE, H.: Aufbau eines Winterdienst-Management-Systems zur optimierten Einsatzsteuerung. Straßenverkehrstechnik 01/2004, S. 13-16, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2004

HARTZ, 2010

HARTZ, WEBER: Geschwindigkeit auf Autobahnen bei starkem Regen, Straße und Autobahn 5/2010, S. 317-322, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2010

HBS, 2005

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS 2005). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Januar 2005, Köln

HEINIJKI, 1993

HEINIJKI, H.: 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

HEINZ, 1981

HEINZ, G.: Erhöhtes Unfallrisiko bei Nässe – Versuch einer Quantifizierung. In: Straßenverkehrstechnik, 1981, H. 6, S. 188-194

HERRMANN, 2008

HERRMANN, S.: Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaning-Verhalten auf Fahrbahnoberflächen (Dissertation). Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Ressel, Februar 2008

HIPPI, 2010

HIPPI, M. et al.: A statistical forecast model for road surface friction. SIRWEC 15th international Road Weather Conference, Quebec City, Canada, Feb. 2010

HOGAN, 1992

HOGAN, A. W.: Objective Estimates of Airborne Snow Properties, U.S. Army Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire

HOLDERBAUM, 1978

HOLDERBAUM, A.: Hydraulische Untersuchungen zur Ermittlung der Wasserfilmdicke auf beregneten

Fahrbahnoberflächen (Dissertation). Technische Hochschule Darmstadt (Hrsg.), Darmstadt

HOLLDORB, 2008

HOLLDORB, C.: Forschung und Entwicklung zur Verbesserung des Winterdienstes in Europa – das COST-Projekt 353. *Straßenverkehrstechnik* 2/2008, S. 85-90, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2008

HORNE, 1968

HORNE, W. B.: Tire Hydroplaning and Its Effects on Tire Traction. In: *Highway Research Record* No. 214, Transportation Research Board, Washington, D. C., S. 24-33

HUBER, 2001

HUBER, W.: Fahrzeuggenerierte Daten zur Gewinnung von Verkehrsinformationen (xFCD). Dissertation TU München, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung, München, 2001

KIRSCHFINK, 2003a

KIRSCHFINK, H., RIEGELHUTH, G.: Umfassendes Baustellenmanagement in Hessen. *Straße und Autobahn* 11/2003, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2003

KIRSCHFINK, 2003b

KIRSCHFINK, H., POSCHMANN, M.: Baustellenmanagement: Lösungsansätze für die verkehrliche Optimierung von Baustellen im Straßennetz. Perspektiven für das Straßenwesen, *Aachener Mitteilungen für das Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau* Nr. 43, Aachen, 2003

KIRSCHFINK, 2006

KIRSCHFINK, H., von der RUHREN, S.: Parameterschätzung für Verkehrslage und Stauprognose. Beitrag auf www.optiv.de, OptiV – Erschließung von Entscheidungs- und Optimierungsmethoden für die Anwendung im Verkehr, Projekt-Team, Hannover, 2006

KLEIN-PASTE, 2007

KLEIN-PASTE, A.: Runway Operability under Cold Weather Conditions. NTNU, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil Transport Engineering, Trondheim, November 2007

KLOTZ, 2002a

KLOTZ, S.; LUTZ, P.: Zusammenhang zwischen Betriebsdienst und Verkehrsgeschehen auf Autobahnen im Winter. *Straßenverkehrstechnik* 12/2002, S. 643-651, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2002

KLOTZ, 2002b

KLOTZ, S.: Besonderheiten des Verkehrs auf Autobahnen unter winterlichen Bedingungen. Dissertation TU Darmstadt, Darmstadt, 2002

KUMMER, 1964

KUMMER, H. W.; MEYER, W. E.: Die Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn. *Automobiltechnische Zeitschrift* 66 (1964) 9

LAUFFER, 2002

LAUFFER, J.: Ermittlung der Griffigkeit von Verkehrsflächen mittels Kfz-Datenspeicherung. Fachhochschule Konstanz, Bericht – 15.03.02, Seite 1 von 13

LEHNERT, 1975

LEHNERT, D.: Rechnerische Ermittlung der Wasserfilmdicke auf Straßen bei Regen. In: *Straßen- und Tiefbau*, 29, 1975, H. 1, S. 12-15

LEMPPIO, 2006

LEMPPIO, G.: Machbarkeitsstudie zur Messung festen Niederschlags mit dem optischen Disdrometer. IFM-GEOMAR Uni Kiel

LOEFFLER-MANG

LOEFFLER-MANG, M.: Enhanced Possibilities of PARSIVEL Distrometer: Precipitation Type, Visibility and Fog Type. *htw-saarland*

LORKOWSKI, 2009

LORKOWSKI, S.: Fusion von Verkehrsdaten mit Mikromodellen am Beispiel von Autobahnen. Dissertation, TU Berlin, Fakultät Verkehrs- u. Maschinensysteme

MAHLKE, 2007

MAHLKE, H.: Niederschlagsmessung mit einem neuartigen optischen Distrometer. Diplomarbeit, Institute für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe (TH)

MIERS, 1983

MIERS, B. T.: Review of Calculations of Extinction for Visible and Infrared Wavelength in rain. Atmospheric Sciences Laboratory, White Sands Missile Range, NW 88002

NESTMANN et al., 1996

NESTMANN, F.; KROHMER, R.; BERNHART, H. H.: Wasserfilmdicken in Abhängigkeit von Neigungen, Unebenheiten und Regenintensitäten. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 728; herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg

NORMAN, 2000

NORMAN, J.: Slipperiness on roads – an expert system classification. Meteorological applications, 7 (1), 27-36, 2000

NURMI, 2010

NURMI, P. et al.: Evaluation of FMI's New Forecast Model of Surface Friction. ID-21 SIRWEC Conference Quebec City, 2010 February 5.-7.

OBER-SUNDERMAIER, 2003

OBER-SUNDERMAIER, A.: Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognose an Engpässen auf Autobahnen unter besonderer Berücksichtigung von Arbeitsstellen. Heft 15 der Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel, Hrsg: Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung, Fachgebiet Verkehrstechnik, 2003

OGURA, 2002

OGURA, T. et al.: Study on a road surface sensing system for snow and ice road. Jsaе Review, 23 (3), 333-339 (2002)

PERSSON, 1997

PERSSON, B. N. J.: Sliding Friction: Physical Principals and Application, Springer Verlag, Heidelberg, 1997

PETRACZEK, 1975

PETRACZEK, O.: Experimentelle Ermittlung der Wasserfilmdicken auf Fahrbahnen unter natürlichen Bedingungen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 195; herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg

EN 15518, 2011

Winterdienstausrüstung – Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme – Deutsche Fassung der EN 15518, Teile 1 bis 3, Beuth Verlag, 2011

RAHJA, 2008

RAHJA, J.: Road Safety – Road Maintenance Strategies. Winter Road Congress 2008, Turku, Finnland

RASMUSSEN, 1998

RASMUSSEN, R. et al.: Theoretical Considerations in the Estimation of Snowfall Rate Using Visibility. The National Center for Atmospheric Research, Colorado

RESSEL, 2008

RESSEL, W., HERRMANN, S. R.: Aquaplaning und Verkehrssicherheit in Verwindungsbereichen drei-

streifiger Richtungsfahrbahnen – Berechnung der Wasserfilmdicke. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 997, Bonn

ROOS et al., 2005

ROOS, R.; ZIMMERMANN, M.; v. LOEBEN, W.: Mögliche Bremsverzögerung in Abhängigkeit von der Straßengriffigkeit. ISE Uni Karlsruhe, März 2005, Forschungsbericht 02.209/2001/EGB, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 912, 2005, Wirtschaftsverlag NW

RSC CFRI

Runway Surface Condition (RSC) and CFRI Equivalent, Canadian Transport, <http://www.tc.gc.ca/civilaviation/commerce/operationalstandards/crf/table4.htm>

SAASTAMOINEN, 1993

SAASTAMOINEN, K.: 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

SCHEDLER, 1998

SCHEDLER, K. E.: Verifikation der Wasserfilmhöhen durch die Niederschlagsintensität; Wasserfilmhöhen-Modell, Spezifikation Umfelddatenstationen VBA A 1 Bremen, mickS MSR GmbH, 1998

SCHEDLER, 1997

SCHEDLER, K. E.: WIND Weather Information and Distribution Services. Deliverables WP2, WP5, WP6, STM5043-WIND, EU INFO2000 Programme, 30.07.1997

SCHEDLER, 2000

SCHEDLER, K. E.: Entwicklung eines Messsystems zur Erfassung des witterungsbedingten Straßen- und Flugfeldzustandes. BayTEP Schlussbericht, 17.10.2000, Innovationsberatungsstelle Südbayern des Bay. Staatsministerium des Innern, 2000

SCHULZE et al., 1975

SCHULZE, K.-H.; DAMES, J; LANGE, H.: Griffigkeitsmessungen bei hohen Geschwindigkeiten. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 189; herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg

SCHULZE, 1977

SCHULZE, K.-H.: 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

Strassenverkehrstechnik, 2008

SAMMER et al.: Verkehrswegeplanung und Umwelt (LV.Nr. 856103) H – Strassenverkehrstechnik 14, Institut für Verkehrswesen, Feb. 2008, Universität für Bodenkultur, Wien

TLS, 2002

Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen, BASt, 2002

Van AERDE, 1995

Van AERDE, M.: A Single Regime Speed-Flow-Density Relationship for Freeways and Arterials. Proceedings of the 74th TRB Annual Meeting Transportation Research Board, Washington D. C.

WILKINSON, 1953

WILKINSON, C. S.: Study of the factors affecting the friction or tread compounds on ice. India Rubber World, Vol. 128, No. 4, 1953

WU, 2000

WU, N.: Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm – Ein neues Modell und seine Anwendungen. Straßenverkehrstechnik, Heft 8, 2000

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2008

- V 165: Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM₁₀-Emissionen von Straßen
Quass, John, Beyer, Lindermann, Kuhlbusch, - Hirner, Sulkowski, Sulkowski, Hippler € 14,50 -
- V 166: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2006 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 26,00
- V 167: Schadstoffe von Bankettmaterial – Bundesweite Datenauswertung
Kocher, Brose, Siebertz € 14,50
- V 168: Nutzen und Kosten nicht vollständiger Signalisierungen unter besonderer Beachtung der Verkehrssicherheit
Frost, Schulze € 15,50
- V 169: Erhebungskonzepte für eine Analyse der Nutzung von alternativen Routen in übergeordneten Straßennetzen
Wermuth, Wulff € 15,50
- V 170: Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonals in Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen
Roos, Zimmermann, Riffel, Cyra € 16,50
- V 171: Pilotanwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN)
Weinert, Vengels € 17,50
- V 172: Luftschadstoffe an BAB 2007
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50
- V 173: Bewertungshintergrund für die Verfahren zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offenerporiger Straßenbeläge
Altreuther, Beckenbauer, Männel € 13,00
- V 174: Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PM_x-Belastung an Straßen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. -
Düring, Lohmeyer, Moldenhauer, Knörr, Kutzner, - Becker, Richter, Schmidt € 29,00 -
- V 175: Maßnahmen gegen die psychischen Belastungen des Personals des Straßenbetriebsdienstes
Fastenmeier, Eggerdinger, Goldstein € 14,50

2009

- V 176: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von Pkw, Transportern und Lkw
Schulze, Hübel € 13,00
- V 177: Sicherheitswirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB A24
Lerner, Hegewald, Löhe, Velling € 13,50
- V 178: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2007 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen € 26,00
- V 179: Straßenverkehrszählung 2005: Methodik
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,50
- V 180: Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn
Hausmann € 14,50

V 181: Voraussetzungen für dynamische Wegweisung mit integrierten Stau- und Reisezeitinformationen
Hülsemann, Krems, Henning, Thiemer € 18,50

V 182: Verkehrsqualitätsstufenkonzepte für Hauptverkehrsstraßen mit straßenbündigen Stadt-/Straßenbahnkörpern
Sümmermann, Lank, Steinauer, M. Baier, R. Baier, Klemps-Kohnen € 17,00

V 183: Bewertungsverfahren für Verkehrs- und Verbindungsqualitäten von Hauptverkehrsstraßen
Lank, Sümmermann, Steinauer, Baur, Kemper, Probst, M. Baier, R. Baier, Klemps-Kohnen, Jachtmann, Hebel € 24,00

V 184: Unfallrisiko und Regelakzeptanz von Fahrradfahrern
Alrut, Bohle, Müller, Prahlow, Hacke, Lohmann € 19,00

V 185: Möglichkeiten zur schnelleren Umsetzung und Priorisierung straßenbaulicher Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit
Gerlach, Kesting, Thiemeyer € 16,00

V 186: Beurteilung der Streustoffverteilung im Winterdienst
Badelt, Moritz € 17,00

V 187: Qualitätsmanagementkonzept für den Betrieb der Verkehrsrechnerzentralen des Bundes
Kirschfink, Aretz € 16,50

2010

V 188: Stoffeinträge in den Straßenseitenraum – Reifenabrieb
Kocher, Brose, Feix, Görg, Peters, Schenker € 14,00

V 189: Einfluss von verkehrsberuhigenden Maßnahmen auf die PM₁₀-Belastung an Straßen
Düring, Lohmeyer, Pöschke, Ahrens, Bartz, Wittwer, - Becker, Richter, Schmidt, Kupiainen, Pirjola, - Stojiljkovic, Malinen, Portin € 16,50 -

V 190: Entwicklung besonderer Fahrbahnbeläge zur Beeinflussung der Geschwindigkeitswahl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Lank, Steinauer, Busen € 29,50

V 191: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2008
Fitschen, Nordmann € 27,00
Dieser Bericht ist als Buch und als CD erhältlich oder kann ferner als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 192: Anprall von Pkw unter großen Winkeln gegen Fahrzeugrückhaltesysteme
Gärtner, Egelhaaf € 14,00

V 193: Anprallversuche an motorradfahrerfreundlichen Schutzeinrichtungen
Klöckner € 14,50

V 194: Einbindung städtischer Verkehrsinformationen in ein regionales Verkehrsmanagement
Ansorge, Kirschfink, von der Ruhren, Hebel, Johanning € 16,50

V 195: Abwasserbehandlung an PWC-Anlagen
Londong, Meyer € 29,50
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 196: Sicherheitsrelevante Aspekte der Straßenplanung
Bark, Kutschera, Baier, Klemps-Kohnen € 16,00

V 197: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2008
Lensing € 16,50

V 198: Stoffeintrag in Straßenrandböden – Messzeitraum 2005/2006
Kocher, Brose, Chlubek, Karagüzel, Klein, Siebertz € 14,50

V 199: Stoffeintrag in Straßenrandböden - Messzeitraum 2006/2007
Kocher, Brose, Chlubek, Görg, Klein, Siebertz € 14,00

V 200: Ermittlung von Standards für anforderungsgerechte Datenqualität bei Verkehrserhebungen
Bäumer, Hautzinger, Kathmann, Schmitz,
Sommer, Wermuth € 18,00 -

V 201: Quantifizierung der Sicherheitswirkungen verschiedener Bau-, Gestaltungs- und Betriebsformen auf Landstraßen
Vieten, Dohmen, Dürhager, Legge € 16,00

2011

V 202: Einfluss innerörtlicher Grünflächen und Wasserflächen auf die PM₁₀-Belastung
Endlicher, Langner, Dannenmeier, Fiedler, Herrmann,
Ohmer, Dalter, Kull, Gebhardt, Hartmann € 16,00 -

V 203: Bewertung von Ortsumgehungen aus Sicht der Verkehrssicherheit
Dohmen, Vieten, Kesting, Dürhager, Funke-Akbiyik € 16,50

V 204: Einfluss von Straßenrandbegrünung auf die PM₁₀-Belastung
Bracke, Reznik, Mölleken, Berteilt, Schmidt € 22,00
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 205: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2009
Fitschen, Nordmann € 27,50
Dieser Bericht ist sowohl als gedrucktes Heft der Schriftenreihe als auch als CD erhältlich oder kann außerdem als kostenpflichtiger Download unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

V 206: Sicherheitspotenzialkarten für Bundesstraßen nach den ESN
Färber, Lerner, Pöppel-Decker € 14,50

V 207: Gestaltung von Notöffnungen in transportablen Schutzeinrichtungen
Becker € 16,00

V 208: Fahrbahnquerschnitte in baulichen Engstellen von Ortsdurchfahrten
Gerlach, Breidenbach, Rudolph, Huber, Brosch, Kesting € 17,50

V 209: Stoffeintrag in Straßenrandböden - Messzeitraum 2008/2009
Beer, Surkus, Kocher € 14,50

2012

V 210: Schmale zweibahnig vierstreifige Landstraßen (RQ 21)
Maier, Berger € 18,50

V 211: Innliegende Linkseinfädungsstreifen an plangleichen Knotenpunkten innerorts und im Vorfeld bebauter Gebiete
Richter, Neumann, Zierke, Seebo € 17,00

V 212: Anlagenkonzeption für Meistereigehöfte – Optimierung von Arbeitsabläufen
Schmauder, Jung, Paritschkow € 19,00

V 213: Quantifizierung von Verkehrsverlagerungen durch Baustellen an BAB
Laffont, Mahmoudi, Dohmen, Funke-Akbiyik, Vieten € 18,00

V 214: Vernetzungseignung von Brücken im Bereich von Lebensraumkorridoren
Schmellekamp, Tegethof
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 215: Stauprävention auf BAB im Winter
Kirschfink, Poschmann, Zobel, Schedler € 17,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.