

TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DISSERTATION

PHD THESIS

Entwicklung eines Straßenzustandsmodells beim Einsatz auftauender Streumittel im Winterdienst

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen
Grades eines Doktor techn.

Gutachter:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Ronald Blab**
Institut für Verkehrswissenschaften - Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien

und

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. **Markus Mailer**
Institut für Infrastruktur - Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme
Universität Innsbruck

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dipl.-Ing. **Peter Nutz**

Matr. Nr.: 0225203
Thallernstraße 11
A - 2352 Gumpoldskirchen

Wien, Dezember 2015

.....

Kurzfassung

Der Winterdienst als Teil des Straßenbetriebsdienstes ist für die Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit sowie einer Sicherstellung der Erreichbarkeit bei winterlichen Witterungsverhältnissen unabkömmlich. Dies wird durch eine mechanische Schneeräumung in Kombination mit der Ausbringung von Streumitteln erreicht. Durch den flächendeckenden Einsatz von Taumitteln entsteht jedoch ein Zielkonflikt zwischen Verkehrssicherheit und Befahrbarkeit des Straßennetzes einerseits und Kosten für den Winterdienst sowie Umweltauswirkungen auf der anderen Seite. Als Beitrag zur Lösung dieses Zielkonfliktes wird in dieser Arbeit ein umfassendes Modell entwickelt, das eine holistische Betrachtung des Straßenwinterdienstes ermöglicht.

Die Auswertung bisheriger Modelle, welche ihren Ursprung zumeist in Wetterprognosen oder der Datenauswertung von Winterdiensteinsätzen haben, zeigt die Mängel bestehender Modelle durch fehlende gegenseitige Verknüpfung der Daten bzw. einer Einbindung von Parametern der Fahrbahnoberfläche auf. Besondere Aufmerksamkeit liegt in dieser Arbeit in der Berücksichtigung aller notwendigen Parameter, um eine ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen und ein breites Anwendungsspektrum zu eröffnen, ohne praxisrelevante Faktoren zu vernachlässigen. Als Eingangsgrößen im Modell werden in erster Linie Wetterprognosen, Einsatzdaten der Streufahrzeuge sowie Informationen zur Fahrbahntextur genutzt, um den Fahrbahnzustand mit Bezug zur Fahrbahngriffigkeit zu prognostizieren. Das entwickelte Modell ist in vier Module gegliedert, welche getrennt betrachtet werden können und jeweils eigene Forschungsgebiete bilden.

Für den Straßennutzer ist die Fahrbahngriffigkeit die relevanteste Größe, da diese direkte Auswirkung auf den Bremsweg und die mögliche Kurvengeschwindigkeit hat. Neben den Reifen ist die Textur der Fahrbahnoberfläche für die Griffigkeit ausschlaggebend. Mit zunehmender Füllung der Fahrbahntextur durch Schnee bzw. Eis wird die Griffigkeit reduziert. Die für eine Absenkung des Griffigkeitsniveaus notwendige Schnee- bzw. Eismenge hängt dabei vom vorhandenen Texturvolumen ab.

Für die Griffigkeit ist es wesentlich, ob der Niederschlag in Form von Schnee bzw. Eis oder Wasser auf der Fahrbahnoberfläche vorliegt. Der Aggregatzustand wird durch die Temperatur, sowie das Verhältnis der Mengen an Tausalz und Niederschlag bestimmt. Während die Temperatur als Mess- bzw. meteorologische Prognosegröße eingeht, werden in dem entwickelten Modell Restsalzmenge, sowie Wasserfilmdicke berechnet und somit das Mengenverhältnis mit daraus folgendem Gefrierpunkt bestimmt.

Die hohe Flexibilität in der Modellierung und Simulation dient Entscheidungsträgern als Hilfestellung bei der Entwicklung und Bewertung von Einsatzstrategien. In Verbindung mit präzisen Nowcasts der Wetterverhältnisse und Daten fix an der Strecke verbauter Sensoren sowie der zeitnahen Übermittlung von Einsatzdaten lässt sich mit Hilfe des Modells auch eine detaillierte Prognose des zu erwartenden Fahrbahnzustandes treffen. Dadurch lassen sich laufend gezielte Streumengenempfehlungen für einzelne kurze Streckenabschnitte geben, die den aktuellen Witterungsbedingungen Rechnung tragen.

Mit einer Umsetzung des entwickelten Modells zur Ermittlung der optimalen Streumenge im operativen Winterdienstbetrieb lassen sich große Teile des noch vorhandenen Optimierungspotentials im Winterdienst realisieren. Sowohl Straßenbetreiber als auch die Umwelt profitieren von den, bei gleichbleibend hoher Verkehrssicherheit, möglichen Einsparungen an Taumittel.

Summary

Winter maintenance as part of road maintenance is mandatory for road operators to provide accessibility and traffic safety under winterly road conditions like snowy or icy roads. Snow ploughing and application of de-icing chemicals is the common treatment in winter maintenance. Although the use of de-icing chemicals creates a conflict of goals between traffic safety and accessibility and maintenance costs as well as environment impact. The model developed in this work enables a holistic approach to winter maintenance.

Previous models have their root in weather forecasts or data evaluation of winter maintenance actions without mutual data exchange and do not take road surface parameters into account. With this new developed model all relevant factors from temperatures, precipitation rate, type of de-icing agent, application rate and traffic volume as well as road surface condition can be accounted for. Input parameters are weather forecasts, field data from winter maintenance vehicles and road condition data such as macro texture of the road surface and friction under wet conditions. Based on four modules, which can each be treated separately, the model is extremely flexible and expendable.

The parameter most important for road users, friction, can now be calculated with information of the three modules mentioned above and road surface data. Braking distance and the maximum cornering speed both very important for drivers are depending on road friction. With the road surface texture filling with snow or ice the friction level decreases if there is not enough salt to thaw snow or ice on the road surface.

Once de-icing material such as salt has been spread onto the road surface it is carried out by traffic or washed away with precipitation. The salt remaining on the road surface dilutes in precipitation forming brine with a freezing point depending on the brine concentration.

With information about the amount of salt on the road the next step is information about the film thickness of water on the road to calculate the brine concentration. Parameters for the calculation of film thickness are precipitation rate and road inclination as well as traffic volume. Furthermore the amount of dew and hoarfrost influences the water amount on the road surface.

The combination of these four modules creates a holistic winter maintenance model which allows users to simulate different weather situations with treatment scenarios and predict the resulting friction. Combining this model with already available information about traffic and road surface condition as well as weather now-casts a high resolution forecast of friction for very short road sections on the entire network becomes feasible. Using the developed model both road operators and the environment benefit from savings in de-icing materials with constant good traffic safety.

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Bedanken, die mich in den letzten Jahren beim Verfassen dieser Arbeit unterstützt haben.

Besonders danken möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab für die Möglichkeit, diese Dissertation am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßen- und Flugbetriebsflächenbau durchführen zu können und die Betreuung während der Erstellung dieser Arbeit. Ebenfalls großer Dank gilt Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Mailer, der als Zweitgutachter durch intensive Durchsicht den Abschluss dieser Arbeit ermöglichte.

Ganz besonders möchte ich auch Herrn Univ.-Lektor Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Hoffmann für die intensive Betreuung dieser Arbeit und die wertschätzende Zusammenarbeit an vielen wunderbaren Projekten danken.

Meinen Freunden und Kollegen danke ich herzlich für die Unterstützung und die schöne Zeit in den letzten Jahren.

Ganz herzlicher Dank gilt meiner Familie und meiner Freundin Eva für all die Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis, auch in turbulenten Zeiten.

Dipl.-Ing. Peter Nutz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Ausgangslage und Stand der Forschung	9
1.1.1	USA	10
1.1.2	Europäische Forschung	12
1.1.3	Skandinavien	12
1.1.4	Deutschland	13
1.2	Fragestellung und Zielsetzung	14
1.3	Vorgehensweise und Methoden	15
2	Straßenbetrieb in Österreich	21
2.1	Straßenbetrieb im Allgemeinen	21
2.1.1	Aufgaben und Abgrenzung des Straßenbetriebes	21
2.1.2	Kennzahlen der Straßenbetreiber	23
2.2	Aufwendungen für den Straßenbetrieb	24
2.2.1	Ausgaben für den ganzjährigen Straßenbetrieb	24
2.2.2	Kostenkennzahlen für den Winterdienst	25
2.2.3	Internationaler Vergleich	25
3	Rahmenbedingungen im Winterdienst	27
3.1	Aufgaben und Interessengruppen des Winterdienstes	27
3.1.1	Aufgaben und Umfang	27
3.1.2	Betroffene Interessengruppen	30
3.2	Rechtliche Rahmenbedingungen	31
3.2.1	Haftung und Verantwortlichkeit	31
3.2.2	Haftung auf bemaute Straßen	36
3.2.3	Haftung bei fehlerhafter Organisation	36
3.2.4	Ausgewählte Gerichtsurteile	37
3.2.5	Rechtliche Absicherung des Wegehalters	38
3.2.6	Arbeitnehmerschutz und Lenkzeiten im Winterdienst	38
3.2.7	Winterdienst und Umweltschutzgesetze	39
3.3	Klimabedingungen in Österreich	40
3.3.1	Häufigkeit, Intensität und Verteilung von Schneefällen	40
3.3.2	Mikroklima auf der Straße	42
3.3.3	Qualität ausgewählter Wetterprognosen	44
3.4	Ausstattung und Organisation	56
3.4.1	Winterdienstausstattung typischer Straßenmeistereien	56
3.4.2	Salzbevorratung	58
3.4.3	Räumtechniken und ihre Anwendungsbereiche	59
3.5	Prinzipien der Routenplanung und Routenarten	61
4	Streumittel	63
4.1	Abstumpfende Streumittel	63
4.1.1	Wirkungsweise abstumpfender Streumittel	64
4.1.2	Verwendete Materialien	64
4.1.3	Einsatzbereiche abstumpfender Streumittel	64

4.2	Auftauende Streumittel	65
4.2.1	Natriumchlorid	65
4.2.2	Kalziumchlorid	67
4.2.3	Magnesiumchlorid	68
4.2.4	Weitere Taumittel	68
4.2.5	Übersicht über Taumittel	70
4.3	Arten der Taumittelausbringung	71
4.3.1	Trockensalzstreuung	72
4.3.2	Feuchtsalzstreuung	72
4.3.3	Solestreuung	73
4.3.4	Variable Streuung	74
4.4	Tauvorgang	75
4.4.1	Temperaturänderung beim Lösungsprozess	75
4.4.2	Gefrierpunkterniedrigung	81
4.4.3	Tauwirksamkeit auftauender Streumittel	83
4.4.4	Tauwirksamkeitsversuche mit flüssigen Taustoffen	90
5	Gefrierpunkt	95
5.1	Versuchsprogramm und -geräte	95
5.2	Auswertung und Modellierung	96
5.3	Verifizierung und Einbindung	99
6	Restsalz	101
6.1	Versuchsprogramm	102
6.1.1	Streuverluste unmittelbar nach der Ausbringung	104
6.1.2	Streuverluste und weitere Austragung durch den Verkehr	105
6.1.3	Modelleinbindung	107
7	Filmdicke	111
7.1	Zufuhr - Niederschlagsmenge	111
7.2	Abfuhr - Verkehr und Verdunstung	112
7.3	Modellierung und Verifizierung	112
7.4	Einbindung	116
8	Griffigkeit	119
8.1	Haftung von Gummireifen	119
8.1.1	Reibungsmechanismen	119
8.2	Einfluss der Fahrbahntextur	121
8.2.1	Bestimmung der Fahrbahntextur	122
8.2.2	Korrelation zwischen den Messverfahren	124
8.2.3	Zusammenhang RoadSTAR - Sandfleck	126
8.3	Modellierung	127
8.3.1	Zusammenhang Volumen und Oberfläche der gefüllten Textur	127
9	Modellsynthese und -implementierung	135
9.1	Zusammenwirken der Module	135
9.2	Vergleich Modellrechnung und Messung	137
9.2.1	Simulation eines realen WD-Einsatzes einer Autobahnmeisterei	138
9.2.2	Simulation unterschiedlicher Szenarien	139
9.2.3	Simulation einer Einzelfahrt	143
9.2.4	Wirksamkeit von Winterdienstmaßnahmen	144

10 Zusammenfassung und Ausblick	147
10.1 Modellentwicklung Winterdienst	147
10.2 Ausblick	149
10.2.1 Simulation Winterdienst	149
10.3 Automatisierte Berechnung optimaler Streumengen	150
10.4 Weitere Forschung	150

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Stand der Forschung

In der Zeit von November bis März wird der Straßenbetrieb in Mittel- und Nordeuropa vom Winterdienst bestimmt. Ziel des Straßenwinterdienstes ist es, das Straßennetz auch unter winterlichen Witterungsbedingungen wie Eisbildung und Schneefall befahrbar zu halten. Dazu zählen vorbereitende Maßnahmen, welche den Straßenwinterdienst erleichtern sollen, wie etwa das Aufstellen von Schneezäunen, sowie alle konkreten Winterdienstesätze. Schnee oder Eis auf der Fahrbahn führt zu Glätte und in weiterer Folge zu einem erhöhten Unfallrisiko und Zeitverlust im Verkehr. Dadurch kann die Erreichbarkeit einzelner Gebiete eingeschränkt werden. Bei längerer Sperre von Straßen kann es auch zu wirtschaftlichen Nachteilen in Betrieben kommen, die auf einen raschen Transport angewiesen sind. Im Falle einer durch starke Schneefälle verursachten Straßensperre kommt erschwerend hinzu, dass in der Regel auch keine Umleitungen möglich sind.

Die Maßnahmen im Straßenwinterdienst zielen daher in erster Linie auf das Entfernen von Schnee und die Erhöhung des Griffigkeitsniveaus durch den Einsatz von Streumitteln bei winterlichen Straßenverhältnissen ab. Die Räumung des Schnees erfolgt nach Schneeräumplänen unter Einsatz von Schneepflügen und Schneeräumgeräten. Die Vermeidung von Straßenglätte erfolgt zum überwiegenden Teil über den Einsatz von auftauenden Streumitteln. Die Bedeutung von Straßen und die örtlichen Wetterverhältnisse sind Kenngrößen, die Betreuungszeiträume und Intensität der Einsätze bestimmen und damit auch eine Grundlage für etwaige Regelwerke, wie beispielsweise die in RVS 12.04.12 (08/2010) angeführten Winterdienstkategorien, darstellen.

Die angeführten Standards stellen dabei Mindestanforderungen an den Winterdienst dar. Neben Betreuungszeitraum und Intensität werden darin auch Anforderungen an die Befahrbarkeit, das verwendete Streumittel und die Organisation gestellt. Innerhalb dieses Rahmens haben die Winterdienstmitarbeiter jedoch einen großen Handlungsspielraum, wie etwa Streumengen oder Beginn einer Streufahrt, und treffen darin die Entscheidung, welche Strategie angemessen ist. Dabei spielt die persönliche Erfahrung der Mitarbeiter eine große Rolle, wodurch unterschiedliche Streumengen bei gleichen äußeren Bedingungen resultieren können. Die Differenzen in der angewandten Strategie kann auch zum Nahtstellenproblem führen, das auftreten kann, wenn an zwei benachbarten Abschnitten starke Unterschiede in der winterlichen Betreuung bestehen.

Dem Nutzen des Winterdienstes, der im Wesentlichen aus Unfallvermeidung und Einsparung volkswirtschaftlicher Kosten besteht, stehen jedoch Kosten, welche beim Straßenbetreiber anfallen, gegenüber. Aber auch die Umwelt wird vom Winterdienst negativ beeinflusst, wenn etwa große Taumittelmengen Pflanzen oder Gewässer belasten. Beim Einsatz von Streusplitt wird durch die mögliche Feinstaubentwicklung die Gesundheit des Menschen gefährdet, wodurch weitere Maßnahmen von Seiten des Straßenbetreibers notwendig werden. Die Kombination dieser Faktoren, welchen auch noch die Haftungsproblematik hinzugefügt werden muss, macht den Straßenwinterdienst zu einer komplexen Aufgabe mit hohem Optimierungspotential.

In der folgenden Analyse werden die weltweit entwickelten und angewendeten Winterdienstmodelle sowohl in Hinblick auf einzelne Aspekte, als auch die ganzheitliche Betrachtung und die praktische Anwendbarkeit untersucht. Dabei wird ein Überblick über die wichtigsten Forschungsgebiete sowie die jeweiligen Schwachpunkte gegeben.

1 Einleitung

1.1.1 USA

Die Forschungsarbeit, welche dem Anspruch auf Ganzheitlichkeit am nächsten kommt, ist für die Entwicklung der MDSS-Software in den USA. Darin werden einzelne Streufahrten betrachtet und Empfehlungen zur Strategie entwickelt.

Seit dem Start durch die Federal Highway Administration (FHWA) im Office of Transportation Operations im Jahr 2001 wird in den Vereinigten Staaten an einer Anwendung zur Optimierung des Winterdienstes (Maintenance Decision Support System MDSS) am National Center for Atmospheric Research (NCAR) im Fachbereich Research Applications Laboratory (RAL) geforscht. Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Programms, das Wetterprognose, Setzung von Winterdienstmaßnahmen und Erfassung der aktuellen Position einzelner Streufahrzeuge vereint und welches von einem Arbeitsplatz aus bedienbar ist. Durch den modularen Aufbau der Software können zusätzliche Schritte, die im Laufe des Projektes hinzukommen, integriert werden. In Abbildung 1.1 ist die Oberfläche der MDSS-Software zu sehen, die Niederschlags- und Temperaturprognosen sowie vorgeschlagene Streufahrten darstellt.

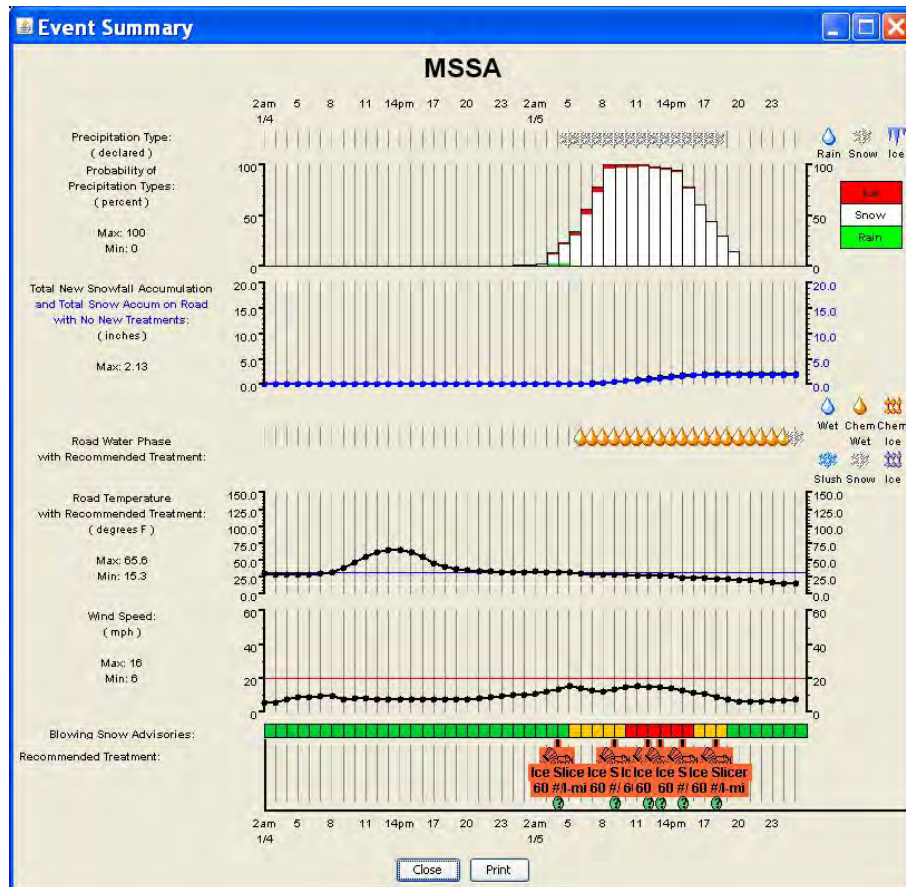


Abbildung 1.1: Screenshot der MDSS Software *Quelle: NCAR*

Die endgültig von der MDSS-Software prognostizierte Fahrbahntemperatur setzt sich aus den Werten mehrerer Prognosemodelle zusammen. Die verschiedenen Modelle weisen in Teilbereichen Schwächen auf. In ihrer derzeitigen Konfiguration ist die Software auch mehr auf eine Wettervorhersage getrimmt als auf Empfehlungen zum Winterdienst. Die Abweichung der Prognostemperatur zur Isttemperatur wird bei allen Modellen in dem Zeitraum von 24 h bis 48 h mit zunehmender Zeit größer, bleibt aber in einem Bereich, der eine Winterdienstplanung möglich macht. Zudem können diese Abweichungen durch die laufende Einbeziehung aktueller Wetterprognosen minimiert werden.

Bei einem Feldversuch in Maine in der Wintersaison 2006/07 wurden noch Probleme bei der praktischen Umsetzung festgestellt. In [14] wird auf die verwirrenden Warnhinweise bei größeren Niederschlagsereignissen hingewiesen, die bei der Mannschaft dazu führten, diese oft gar nicht mehr zu beachten. Dazu ist noch zu sagen, dass in Maine 30 Räumfahrten während 24 h durchgeführt wurden, was in Österreich aufgrund der längeren Räumstrecken und des begrenzten Fuhrparks nicht möglich ist (das vorgeschriebene Mindestintervall in Österreich auf A+S-Straßen ist drei Stunden). Auch die generelle Akzeptanz der Anwendung bei der Mannschaft stellt in manchen Fällen ein Problem dar, da diese oft langjährige Erfahrung haben und der Software nicht trauen, da viele der verwendeten Prognosemodelle ohnehin schon in der Praxis verwendet wurden.

Auf Wunsch der Departments of Traffic ist ein weiteres Modul in Entwicklung, das eine Aussage über die aktuelle Befahrbarkeit eines Straßenabschnittes macht. Die Idee dahinter ist, bei starken Niederschlagsereignissen die verfügbaren Winterdienstfahrzeuge gezielt dort einsetzen zu können, wo der Bedarf am größten ist (also die Befahrbarkeit am schlechtesten). Dieser „Mobility Index“ wird als Wert von 0 (nicht befahrbar) bis 1 (keine Behinderung) definiert. Da die Untersuchungen zu diesem Thema noch nicht vollständig abgeschlossen sind, wird ein Platzhalter verwendet, der den Niederschlag, der auf der Fahrbahn liegen bleibt, berücksichtigt. Werte gehen von trockener Fahrbahn (1,0) über 4 bis 6 Zoll Schnee auf der Fahrbahn (0,4) bis zu Eis auf der Fahrbahn (0,2).

Die letzten publizierten Versuche in der Praxis fanden in Denver und der näheren Umgebung in der Wintersaison 2007/08 statt, in der noch eine ältere Version der Software zum Einsatz kam. Die aktuelle Version 6.1.0 rc wurde im Februar 2011 veröffentlicht und enthält Neuerungen im Bereich der Fahrzeugfassung. Es besteht die Möglichkeit, die Streufahrzeuge so auszurüsten, dass ihre Position sowie Videobilder an eine Zentrale, die per Funk eingreifen kann, übertragen werden. In Abbildung 1.2 ist ein Ausschnitt der MDSS-Software dargestellt, auf dem die Gefährdungszonen und die Positionen der Fahrzeuge markiert sind sowie ein übermitteltes Livebild eines Fahrzeuges zu erkennen ist. In den letzten Jahren (Stand August 2014) erfolgte keine Weiterentwicklung dieser Software mehr.

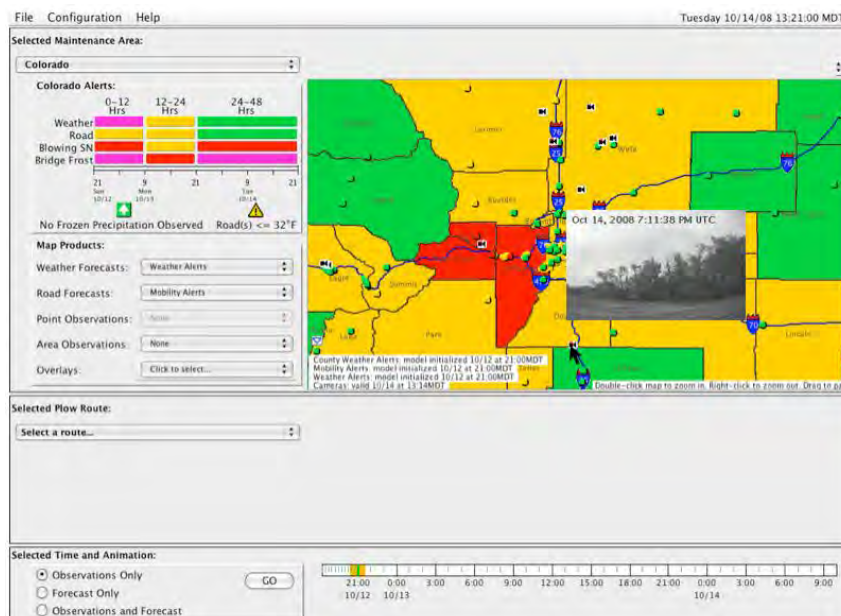


Abbildung 1.2: Screenshot der MDSS Anwendung *Quelle: NCAR*

Die Software liegt frei verfügbar im Quellcode vor und ist auf Solaris- sowie Linuxsystemen lauffähig, wobei alternativ Benutzer über eine Webschnittstelle die Anwendung nutzen können. Zu den Berechnungsalgorithmen liegen im Handbuch Flussdiagramme vor, die jedoch leider keine genauen Berechnungsschritte enthalten. Obwohl alle Eingabegrößen berücksichtigt werden, gibt es im Handbuch

1 Einleitung

keine Informationen, um Aussagen über die Qualität des Modells treffen zu können. Es sind jedoch noch Anpassungen an Mikroklima und Streuempfehlungen, insbesondere in Hinblick auf die Warnungen und Vorschläge im Praxiseinsatz, durchzuführen. Nach der Entwicklung des MDSS-Modells geht die Forschung in Richtung Evaluierung und Benchmarking von Winterdienstseinsätzen [51].

1.1.2 Europäische Forschung

In Europa gab es eine drei Jahre dauernde Untersuchung zum Thema Winterdienst bis 2002, deren Ergebnisse im Rahmen des von der CORDIS (<http://cordis.europa.eu/>) koordinierten Projektes *COST 344 Improvements to Snow and Ice Control on European Roads and Bridges* veröffentlicht wurden. Dabei wurde die übliche Winterdienstpraxis der 18 teilnehmenden Länder analysiert, verglichen und ausgewertet. Es erfolgte eine grobe geografische Zuordnung der Wettermodelle sowie eine tabellarische Gegenüberstellung der verschiedenen Winterdienststrichtlinien, wobei keine genaue „best practice“ gefunden werden konnte: Es fehlte an Indikatoren der Qualität der Resultate; praktisch kein Land verfügt über eine systematische und effektive Messung der Winterdiensteffizienz und die unterschiedlichen Klimazonen innerhalb Europas erfordern sehr unterschiedliche Herangehensweisen.

In allen teilnehmenden Ländern ist jedoch die Einteilung des Betreuungslevels der Straßen in Kategorien in Abhängigkeit der Wichtigkeit für das Netz und der Verkehrsstärke der Straße vorhanden. Es ist auch eine Tendenz zur Trockensalzstreuung in feuchteren Regionen (maritimes Klima) zu erkennen, während in trockeneren Regionen (kontinentales Klima) die Feuchtsalzstreuung dominiert.

Da einzelne Länder aber in Teilbereichen weiter fortgeschrittene Ansätze haben, erscheint eine Steigerung der Gesamteffizienz des Winterdienstes europaweit betrachtet, in erster Linie durch Kooperation, möglich. Durch die vielen verschiedenen Förderungen zum gleichen Thema und die zumeist in staatlicher Hand befindlichen Auftraggeber (Straßenbetreiber) gestaltet sich dies schwierig. Oft wird mit länderspezifischen Herstellern zusammengearbeitet und ein System entwickelt, welches Teilbereiche abdeckt, ohne eine ausreichende Gesamtübersicht zu bieten.

1.1.3 Skandinavien

In den skandinavischen Ländern wird verstärkt an der mobilen Erfassung des Straßenzustandes (Griffigkeit, Wasserfilmdicke) mittels optischer Sensoren geforscht. So hat etwa die finnische Firma *Vaisala* seit einiger Zeit ein stationäres optisches Gerät im Portfolio. Die stationären Geräte sind mittlerweile ausgereift und erreichen teilweise die Präzision von Bodensensoren.

Andere Firmen haben diese Idee der optischen Messung aufgegriffen und Sensoren entwickelt, welche sich an Fahrzeugen montieren lassen. Einen Vergleich mehrerer Systeme zur mobilen Straßenzustandserfassung (trocken, nass, Schnee, Eis) wurde von Mikko Malmivuo im Auftrag der Finnischen Transportbehörde durchgeführt [46].

Ein solches Gerät, welches auch an der TU Wien getestet wurde, ist das von der Firma *Teconer* entwickelte RCM 411 [21]. Der optische Sensor ist dabei mit einem Smartphone gekoppelt und nutzt neben dem Display als Ausgabegerät noch einige Funktionen wie GPS, Beschleunigungssensoren, Bluetooth etc. Damit ist es möglich, neben der gemessenen Griffigkeit auch einen aus der Verzögerung einer Vollbremsung rückgerechneten Griffigkeitswert zu ermitteln. Generell ist die optische Erfassung der Griffigkeit problematisch, da der Algorithmus nur die Filmdicke von Wasser, Schnee bzw. Eis misst und die Griffigkeit daraus errechnet. Für die Griffigkeit entscheidende Faktoren wie die Polierresistenz des Gesteins können mit diesem Verfahren nicht betrachtet werden. Dies ist insofern von Bedeutung, als bereits bei nasser Fahrbahn die Griffigkeit zwischen verschiedenen Belägen enorm variieren kann [40]. Auf diesen Unterschied wird von den Herstellern der optischen Messgeräte jedoch in der Regel nicht hingewiesen.

1.1.4 Deutschland

Über den richtigen Anfeuchtungsgrad von Feuchtsalz wurden von der BASt Untersuchungen angestellt, die sich einerseits auf die so bezeichnete „Tauleistung“ sowie andererseits auf das Streubild konzentrierten [6]. Die Tauleistung wurde dabei mit dem Inzeller Eisplattenversuch beurteilt, bei dem eine bestimmte Menge Taumittel eine definierte Zeit bei vorgegebener Temperatur auf einer Eisplatte wirkt und dann die getaute Eismenge gemessen wird. Die Ergebnisse zeigen ein uneinheitliches Bild, das auf die Messungenauigkeit des Verfahrens in Verbindung mit der geringen Anzahl an durchgeführten Messungen zurückzuführen ist. Nach längerer Einwirkungszeit (60 min) ist die Tauleistung jedoch nur noch abhängig von der Salzmenge, die effektiv aufgebracht wird, da reichlich Zeit für eine vollständige Lösung des gesamten Salzes vorhanden ist.

Zur Beurteilung der Auswirkung des Anfeuchtungsgrades auf das Streubild wurde auf visuelle Beobachtungen zurückgegriffen und Streufahrten mit verschiedenen Anfeuchtungsgraden während des Streuvorganges fotografiert, um anschließend die Verwehung mithilfe der zur besseren Erkennbarkeit des Salzes bearbeiteten Bilder zu beurteilen. Hier zeigt sich ab einer Anfeuchtung von FS 20 ein Abnehmen der Verluste durch Verwehung, bis bei FS 30 keine sichtbaren Verluste mehr auftreten. Weiters wird darauf hingewiesen, dass eine FS 30-Streuung, im Gegensatz zur reinen Trockensalzstreuung, einen erhöhten Wartungs- und Kalibrierungsbedarf an den Geräten bedeutet.

Eine Untersuchung zum Thema „Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn“ ist im Rahmen der Schriftenreihe „Verkehrstechnik“ der BASt erschienen [23], wobei hier mit fix installierten Feldern aus Bodensensoren die Fahrbahntemperatur und die Restsalzmenge gemessen wurden. Die Messungen weisen jedoch aufgrund der starken mechanischen Beanspruchung der Sensoren durch das Überrollen, vor allem nach längerer Zeit, starke Streuungen auf. Ein weiteres Problem stellt die genaue Messung der Wasserfilmdicke dar, da durch das Einsetzen der Sensoren Vertiefungen in der Fahrbahn entstehen, in welchen sich Wasser sammelt. Die Untersuchung der Restsalzmengen an mehreren Querschnitten zeigt die rasche Verteilung des Salzes in Längs- und Querrichtung durch den Verkehr auf.

Im Winter 2009/10 wurden Versuche mit einem Saug-Spülgerät (Abbildung 1.3) durchgeführt, wobei hier der Einsatz von Safecote als Zusatzmittel zur Erreichung einer Verbesserung der Liegezeit des Streusalzes im Vordergrund stand. Das Saug-Spülgerät der BASt saugt einen beliebig langen gleich breiten Streifen Wasser von der Fahrbahn, wodurch eine genauere Bestimmung des Restsalzgehaltes als bei Geräten mit Widerstandsmessung (z. B. SOBO 20) möglich ist. Die Messungen zeigen einen starken asymptotischen Abfall der Restsalzmenge unmittelbar nach Aufbringung.



Abbildung 1.3: Saug-Spülgerät *Quelle: [24]*

1 Einleitung

Zur Liegedauer von Taumitteln auf der Fahrbahn wurde in [25] eine Untersuchung durchgeführt. Da die meisten bisherigen Messungen auf Autobahnen durchgeführt wurden, ist auch eine entsprechende Untersuchung auf Landesstraßen von der BASt beauftragt worden [63].

Gleichzeitig wird ebenfalls an einer Zusammenfassung der im Einzelnen bereits zum Teil sehr gut untersuchten Faktoren gearbeitet und etwa in [7] ein Bewertungsfaktor für den Winterdienst entwickelt. Weiters wird in [26] ein deutlich verbessertes System zur automatisierten Streumengeneinstellung untersucht, welches bereits praktisch eingesetzt wurde. Dieses System soll die Schwächen bereits bestehender Systeme (lediglich abhängig von der Temperatur) deutlich verbessern. Insgesamt ist die Forschung im Winterdienst in Deutschland derzeit mit vielen parallel laufenden Projekten zu unterschiedlichen Themen sehr gut aufgestellt.

1.2 Fragestellung und Zielsetzung

Aus der Ausgangslage ergibt sich für den Straßenbetreiber eine Vielzahl von Fragestellungen, wie mit den bestehenden Ressourcen der Winterdienst optimal organisiert und durchgeführt werden kann. Die entstehenden Zielkonflikte lassen sich jedoch nur mit einer auf Bereiche außerhalb des praktischen Straßenbetriebes ausgeweiteten Sicht des Winterdienstes lösen. Gesetze und Normen bilden für den Winterdienst jenen Teil der Rahmenbedingungen, die sowohl Verkehrssicherungsaufgaben der Wegehalter umschreiben als auch den Einsatz von Personal im Rahmen von Arbeitszeit- bzw. Lenkzeitregelungen festlegen.

Am hochrangigen Straßennetz werden hauptsächlich auftauende Streumittel, in erster Linie Tausalz, eingesetzt, weshalb sich diese Arbeit vorrangig auf diese konzentriert. Aus physikalischer Sicht ist die Tauwirksamkeit der eingesetzten Taumittel unter ökologischen, ökonomischen sowie sicherheitsrelevanten Aspekte einer genauen Betrachtung zu unterziehen. Ebenso sind die verwendeten Räum- und Streutechniken ausschlaggebend für einen effizienten Winterdienst. Unabhängig vom rechtlichen Rahmen lautet die Kernfrage dieser Arbeit, wo die physikalischen, ökologischen und wirtschaftlichen Grenzen des Winterdienstes liegen bzw. wo eine Optimierung ansetzen kann und wie diese zu erfolgen hat.

Auf diese eher allgemein gehaltene Frage soll die vorliegende Arbeit wissenschaftlich fundierte und gleichzeitig praktisch anwendbare, detaillierte Antworten bzw. Lösungsvorschläge geben. Ausgehend vom Stand der Technik erfolgt die Erläuterung aller für den Winterdienst wesentlichen Wirkungen um diese anschließend in einem ganzheitlichen Modell abzubilden. Die thermodynamischen Vorgänge des Tausens von Eis durch Salz auf Tauwirksamkeit und Fahrbahntemperatur sind abzuklären. Salz wird durch Niederschlag und Verkehrseinfluss wieder von der Fahrbahn verdrängt und lenkt damit die Frage auf die nach Verkehrseinwirkung zur Verfügung stehende Salzmenge auf der Fahrbahn. In diesem Zusammenhang tritt auch die Frage nach Filmdicke der Wasser-, Schnee- oder Eisschicht auf. Die Qualität von Winterdiensteseinsätzen zu beurteilen, ist derzeit noch aufwendig und kaum standardisiert, obgleich Benchmarks zu einer deutlichen Verbesserung der Effizienz beitragen können. Hier stellt sich die Frage nach typischen Winterdienstesituationen und entsprechenden sinnvollen bzw. notwendigen Streumengen. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung kann für den Winterdienst nur eine Kenngröße als Grundlage dienen, die aktuelle Fahrbahngriffigkeit, welche die für den Straßennutzer relevante Größe ist.

Ziel einer, wie in dieser Arbeit erstellten, umfassenden semi-empirischen Modellierung der Vorgänge im Winterdienst muss es daher sein, die Auswirkungen auf Straßennutzer und Umwelt in Zusammenhang mit Wetterereignissen und Einsatzstrategien zu bringen. Ausgehend von der derzeit üblichen Praxis, sowie der aktuellen Forschung und Entwicklung in diesem Bereich wird daher ein mathematisches Modell entwickelt, das die Vorgänge, welche beim Aufbringen von Tausalz auf die Fahrbahn im Rahmen des Winterdienstes auftreten, erfasst und sich daraus ergebende Auswirkungen darzustellen vermag.

Das entwickelte Modell ist so flexibel, dass eine wetter-, verkehrs- und winterdienstmaßnahmenabhängige Prognose des zu erwartenden Straßenzustandes möglich wird, welche einen Rückschluss auf die

momentan ideale Streustrategie erlaubt. Die einbezogenen Parameter sollen so flexibel sein, dass das Modell auf eine Vielzahl von Straßen in den verschiedensten Klimaregionen anzuwenden ist, ohne Einbußen an Prognosegenauigkeit in Kauf nehmen zu müssen. Der Einsatz zur Einsatzsteuerung ist eine Möglichkeit das Modell für die operative Ebene sinnvoll zu nutzen. Mit dem Einsatz zu einer wetterabhängigen Simulation von Winterdiensteseinsätzen wird aber auch ein wichtiges Werkzeug für die Kontrollebene geschaffen. Benchmarks lassen sich unter Einbeziehung des Modells auch überregional durchführen und die tatsächlich ausgebrachte Salzmenge kann mit einer den jeweiligen Wetter- und Straßennetzbedingungen entsprechenden Streustrategie abgeglichen werden.

Eine Erweiterung des Modells um Umweltauswirkungen und Unfallkosten ermöglicht es, ansonst schwer zu erfassende Auswirkungen wie starke Umweltbeeinträchtigungen durch den Salzeinsatz oder volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Rechnungen rasch und einfach zu bewerten. Dazu werden auf Basis aktueller Kostendaten Einheitskosten für verschiedene Leistungen gebildet, die in der Simulation des Winterdienstes eingesetzt werden.

1.3 Vorgehensweise und Methoden

Holistisches Streumodell

Das auf Basis dieser vier Grundmodule in dieser Arbeit entwickelte Modell fügt sich wie in Abbildung 1.4 dargestellt in eine holistische Betrachtung des Straßenwinterdienstes ein. Damit können die Vorgänge im Winterdienst zu Parameterstudien, Straßenzustandsprognosen etc. abgebildet werden. Eine präzise Strategieentwicklung für Straßenbetreiber ist ebenso möglich wie die automatisierte Streumeneinstellung bei Einsatzfahrten. Bisherige Modelle greifen dabei oft zu kurz und nehmen nicht auf alle Bedingungen Rücksicht. Selbst das bisher am weitesten ausgeprägte gesamtheitliche Modell (MDSS) bildet die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche bzw. die Griffbarkeit nicht ausreichend ab.

Die Eingangsparameter in das Modell sind wie in Abbildung 1.4 ersichtlich Meteorologie, Organisation (Umlaufzeiten, Routenführung etc.) und Ressourcen (Fahrzeuge, Personal, Streumittelager etc.). Daraus können mit Hilfe des Modells die Auswirkungen auf Ökologie, Verfügbarkeit des Straßennetzes und Ökonomie dargestellt werden. Je nach Gewichtung, etwa um Einsparungsziele oder Umweltauflagen zu erfüllen, können nun Strategien entwickelt und die Auswirkungen simuliert werden. Die umgesetzten Strategien führen über ein Monitoring durch Feedback zu einer weiteren laufenden Optimierung der Arbeitsprozesse.

In dieser Arbeit wird ein detailliertes, validiertes Modell entwickelt, wobei auf einen modularen Aufbau geachtet wird, der übersichtliche Modellierungsansätze vereint, die sich zu einem Gesamtmodell zusammenfügen. Dadurch können einzelne Modellannahmen gezielt mittels Feld- bzw. Laborprüfungen validiert werden. Als Bezugsgröße für die Modellierung dient die Fahrbahngriffbarkeit, welche ein zentrales Kriterium der Verkehrssicherheit ist und von winterlichen Verhältnissen infolge Reif, Schnee oder Eis negativ beeinflusst wird.

Die einzelnen physikalischen Vorgänge im Winterdienst, wie etwa die Vertragung von Taumittel aus der Rollspur, die Tauwirksamkeit von Salz und die Änderung der Fahrbahngriffbarkeit durch Schnee und Eis, werden zuerst zu einem Rechenmodell zusammengefügt, wobei anhand erster Daten aus Versuchen bereits eine Plausibilitätskontrolle der einzelnen Module geschieht. Die Ergebnisse des vorläufigen Modells werden mit der Realität verglichen, wobei auch eine Ergebnisdiskussion mit Straßen- und Autobahnmeistern mit langjähriger Winterdienstenerfahrung wichtige Hinweise auf die Aussagekraft des Modells liefern.

Auf Basis bereits erprobter Ansätze, wie etwa in [5], werden Laborverfahren zur Prüfung und Bewertung der Tauwirksamkeit verschiedener Taumittel wie NaCl, CaCl₂ oder Safecote sowohl in fester als auch flüssiger Form (Sole) entwickelt. Bei den Versuchen soll gezielt der am häufigsten eingesetzte Tau-

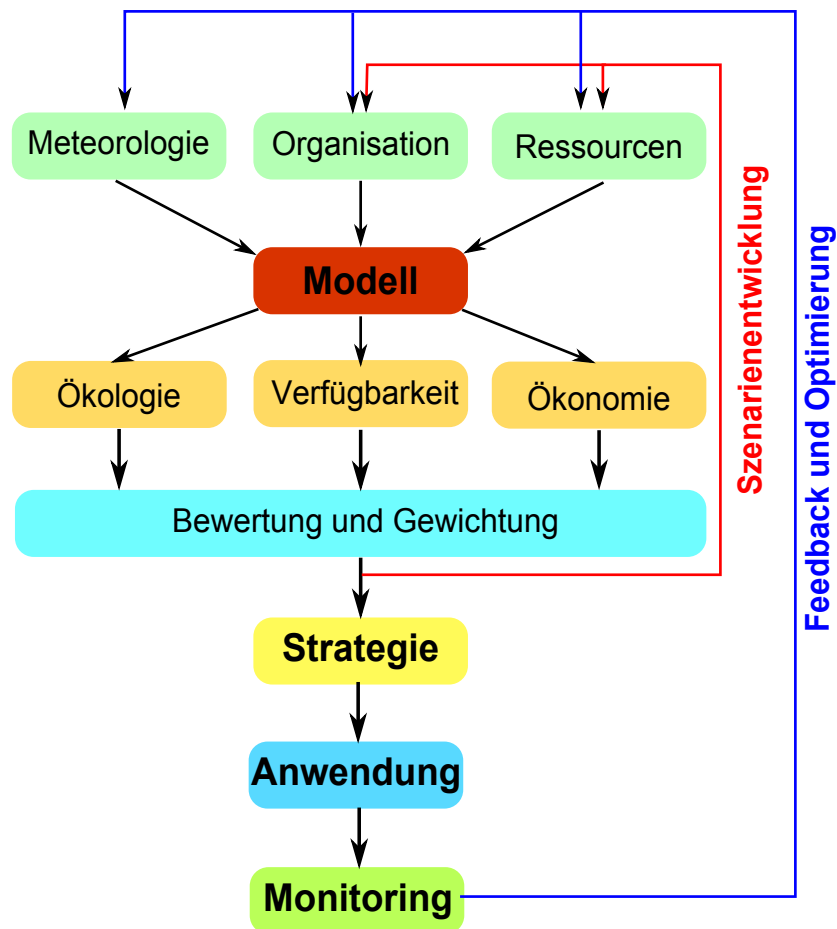


Abbildung 1.4: Schematische Darstellung der geplanten Integration des entwickelten Modells in den Winterdienstbetrieb

stoff Natriumchlorid (NaCl) getestet und gegebenenfalls auch die Wirkung unterschiedlicher Produkte nach ihrer Herkunft (z. B. Siedesalz und Steinsalz) verglichen werden. In Verbindung mit dem thermodynamischen Hintergrund des Tauvorganges soll das Verständnis für Taumittel verbessert werden, um situationsbezogen jeweils das Richtige einsetzen zu können.

Die Tauwirksamkeit wird durch Laborversuche, vor allem mit dem Unterschied einzelner Taumittel in Bezug auf ihre Anfangstaugeschwindigkeit und weitere Tauwirksamkeitsentwicklung untersucht. Im Wesentlichen geht es dabei um eine Untersuchung der Menge an Eis, die durch eine definierte Menge an Taumittel bei einer festgelegten Temperatur zeitabhängig getaut werden kann. In einer weiteren Versuchsreihe wird der eutektische Punkt der Taumittel untersucht. Dies ist von großer Wichtigkeit, da Taumittel bei einer dem eutektischen Punkt entsprechenden Konzentration die größte Absenkung des Gefrierpunktes der Lösung aufweisen. Insgesamt sollen diese Versuche Hinweise zur Grenztemperatur liefern, ab der ein Taumittel nicht mehr wirksam ausgebracht werden kann.

Die Abnahme des Taumittels auf der Fahrbahn und die Änderung der Fahrbahngriffigkeit wird anhand von Feldversuchen untersucht, wobei die Einflüsse von Deckschichttype bzw. Textur, Witterung, Verkehr und Winterdienst genau betrachtet werden. Die Messungen auf der Fahrbahn für verschiedene Winter- und Verkehrsszenarien sollen letztlich die Entwicklung eines Modells erlauben, mit dem die Auswirkungen des Winterdienstes auf die Griffigkeit der Fahrbahn simuliert werden können. Restsalzmessungen zeigen die Abnahme der Salzmenge auf der Fahrbahn mit fortschreitendem Verkehrseinfluss in Abhängigkeit des Fahrbahnzustandes (trocken, feucht oder nass).

Für eine weitere Validierung des Modells sind große Datensätze an Feldmessungen notwendig um Stärken und Schwächen zu erkennen. Diese Daten können nicht mehr mit manuellen Messungen gewonnen werden, sondern sind aus automatischen Messstellen zu beziehen, die Aufzeichnungen der wichtigsten Einflussgrößen liefern. Ein Vergleich der mit dem Modell errechneten Prognosewerte und den gemessenen Daten aus Langzeitmessungen bei verschiedensten Verhältnissen erlaubt eine detaillierte Analyse und weitere Kalibrierung des Modells.

Sind die physikalischen Zusammenhänge des Streumodells validiert, kann dieses semi-empirische Kernmodell um einige Erweiterungen ausgebaut werden, welche etwa wirtschaftliche Kennzahlen oder Umweltauswirkungen beinhalten. Damit kann die Komplexität des Winterdienstes in ein umfassendes Modell gegossen werden, wodurch eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten entsteht.

Der Erfolg eines solchen Modells bedingt die gute Akzeptanz bei den Winterdienstfahrern. Dazu ist eine Rückführung der komplexen Zusammenhänge auf eine einfache Oberfläche für die täglichen Anwender unbedingt notwendig.

Einflussfaktoren im Streumodell

Der in den Kapiteln 1 bis 3 gegebene Überblick des Straßenwinterdienstes macht die Bedeutung und Komplexität des Themas deutlich, welche die Mitarbeiter des Straßendienstes Winter für Winter vor schwierige Aufgaben und Entscheidungen stellt. Zur Unterstützung dieser Mitarbeiter wird im Folgenden ein mathematisches Grundmodell Winterdienst entwickelt, das alle wesentlichen Zusammenhänge erfassen und abbilden kann. Ziel ist es, die Auswirkungen auf Straßennutzer und Umwelt in Zusammenhang mit Wetterereignissen und Einsatzstrategien zu bringen. Dafür ist es notwendig, dass die Vorgänge, die beim Aufbringen von Tausalz auf die Fahrbahn im Rahmen des Winterdienstes auftreten, erfasst und modelliert werden können. Dazu muss der Bogen von den vorherrschenden Witterungsbedingungen über die getroffenen Winterdienstmaßnahmen zum Fahrbahnzustand und schlussendlich zur Verkehrssicherheit im Sinne der Fahrbahngriffigkeit führen.

Der Fahrbahnzustand im Sinne von Schnee-, Eis- oder Wasserfilmdicke im unbeeinflussten Zustand ist dabei ausschließlich von meteorologischen Faktoren abhängig. Die Prognose und Messung von Niederschlagsart und -menge, Zeitpunkt und Dauer des Niederschlagsereignisses, auftretende Luft- und Bodentemperaturen sowie Luftfeuchtigkeit erfolgt durch diverse Wetterdienste. Viele Wetterdienste bieten auch auf die speziellen Bedürfnisse des Winterdienstes abgestimmte Produkte an. Zur Akkumulation von Schnee am Boden gibt es aus dem Bereich des Lawinenschutzes gute Modelle, die auf den Straßenbereich ausgeweitet wurden, etwa [13]. Wetterprognosen und -modelle fallen jedoch in den Fachbereich der Meteorologie und werden in dieser Arbeit nicht im Detail behandelt, an den entsprechenden Stellen wird verwiesen. Die Prognose meteorologischer Parameter liegt nicht im Betrachtungsbereich und wird im Rahmen dieser Arbeit als Eingangsparameter angenommen.

Mit einem Schneefallereignis beginnen auch die Arbeiten des Straßenwinterdienstes, den Schnee zu beseitigen und eine Reduktion der Griffigkeit zu verhindern. Wie in Kapitel 4.2 angeführt, wird in dieser Arbeit die Wirkung auftauender Streumittel, welche derzeit überwiegend eingesetzt werden, vorausgesetzt. Es ist nun von entscheidender Bedeutung, wie viel Schnee bzw. Eis bei der jeweils herrschenden Temperatur durch das auftauende Streumittel getaut werden kann. Dazu muss die Menge des Taumittels und des Schnees sowie die Menge an Schnee oder Eis, welche das Taumittel zu tauen vermag, bekannt sein.

Kann die gesamte Menge an Schnee oder Eis durch das Taumittel beseitigt werden, womit eine salz-nasse Fahrbahn der Endzustand wäre, ist die Fahrbahngriffigkeit vergleichbar mit jener einer regennassen Fahrbahn. Die Veränderung der Fahrbahngriffigkeit mit zunehmender Schneemenge auf der Fahrbahn in Abhängigkeit der Fahrbahnbeschaffenheit bis hin zur geschlossenen Schneedecke wird in dieser Arbeit untersucht.

1 Einleitung

Der komplexe Zusammenhang zwischen Witterung, Winterdienst und Fahrbahngriffigkeit kann nun in verschiedene Teilbereiche unterteilt werden, welche in grundlegenden Modulen einzelne Bereiche zusammenfassen. Die Einteilung in Module ermöglicht es, Versuchsprogramme zu erstellen, welche empirische Daten zu den einzelnen Vorgängen liefern können, ohne eine zu hohe Zahl an Unbekannten zu beinhalten.

Einige dieser Größen wurden wie in Kapitel 1.1 beschrieben bereits umfangreich untersucht, wie etwa die Liegedauer von Tausalz zur Restsalzmengenprognose in Deutschland, eine Zusammenführung aller Elemente ist jedoch zur Zeit noch nicht erfolgt. Ein hier entwickelter durchgängiger Modellansatz, mit dem die gesamten Zusammenhänge zwischen den Einzelmodulen beschrieben wird, fehlt aber bisher.

Die in Abbildung 1.5 dargestellte Skizze dieses Grundmodells Winterdienst zeigt den modularen Aufbau, der notwendig ist, um die einzelnen Modellparameter möglichst unabhängig voneinander untersuchen und berechnen zu können. Die vier grundlegenden Module dabei sind:

- Restsalzmengenprognose (Kapitel 6): Ermittlung der Menge an Salz, die sich zu jedem beliebigen Zeitpunkt in Abhängigkeit von Streuzzeitpunkt und Verkehrsmenge auf der Fahrbahn befindet
- Ermittlung der Wasserfilmdicke (Kapitel 7): Berechnung der Menge an Wasser, das sich durch Niederschlag, Reifbildung und Verdunstung gleichzeitig auf der Fahrbahn befindet und mit dem Salz eine Salzlösung bildet
- Gefrierpotential (Kapitel 5): Prognose der Fahrbahntemperatur in und neben der Rollspur über das Streuintervall bzw. Ermittlung durch mobile Messung über das Streufahrzeug in Verbindung mit dem Gefrierpunkt der vorhandenen Salzlösung
- Griffigkeit (Kapitel 8): Berücksichtigung des verzögerten Griffigkeitsabfalls durch Eis und Schnee in Abhängigkeit der Texturtiefe bzw. Füllung derselben

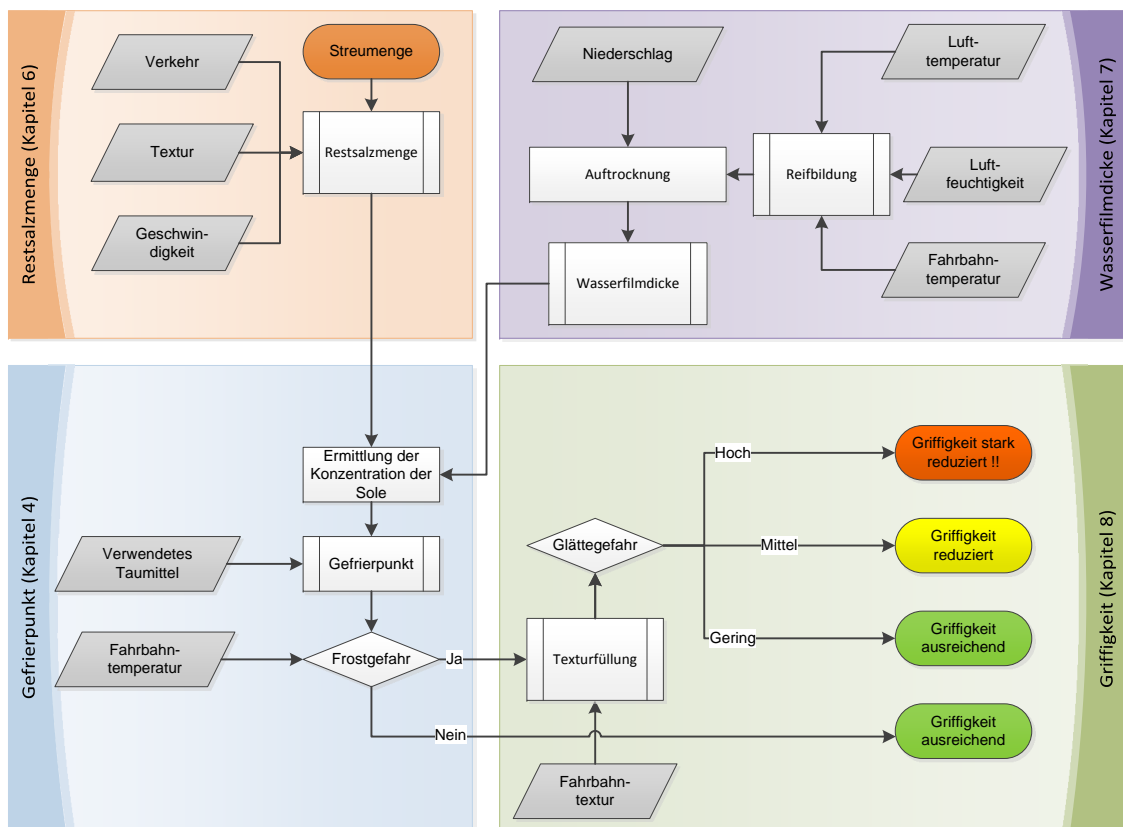


Abbildung 1.5: Schemaskizze des entwickelten Winterdienstmodells

Die grafische Darstellung zeigt eine grobe Übersicht der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Zusammenhänge. Die Eingangswerte für die Berechnungen kommen entweder direkt aus Prognosen bestehender Modelle (Niederschlagsmenge, Temperaturen etc.) oder können aus historischen Daten (Verkehr) gewonnen werden. In den grauen Kästen sind Zwischenschritte dargestellt (Restsalzmenge, Reifbildung, Wasserfilmdicke), die mit entsprechender Sensorik in Echtzeit kontrollierbar sind. Dies ist insofern wesentlich, als dadurch eine laufende Korrektur der Berechnung und Prognosen bzw. Kalibrierung des Modells möglich ist.

Einflussfaktoren im Streumodell

Die Berechnung der Solekonzentration und damit des Gefrierpunkts der Sole wird durch entsprechende Laborversuche ausreichend gut abgesichert und kann als Fehlerquelle weitgehend unberücksichtigt bleiben. Kritischer ist die Bestimmung der Fahrbahntemperatur, die sich aus Nowcast-Wetterprognosen bzw. Bodensensoren sowie ergänzenden Messungen durch eine Sensorik direkt am Fahrzeug ergeben können. An den Winterdienst angepasste Wetterprognosen sind ein umfangreiches Themengebiet und werden in dieser Arbeit mit dem Verweis an Fachinstitute (z.B. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) nur am Rande erwähnt. In Bezug auf die Genauigkeit ist der direkten Messung am Fahrzeug der Vorzug zu geben, da eine exakte Prognose der Fahrbahntemperatur aufgrund sich laufend ändernder Bedingungen vergleichsweise schwierig ist. Eine Verbesserung der Ergebnisse kann jedoch durch ein „Thermal-Mapping“ der Strecke erfolgen. Bei diesem Verfahren wird die Fahrbahn bei unterschiedlichen Witterungsszenarien thermisch kartiert und erlaubt damit eine Streckenprognose, die nur wenige Messensoren als Stützpunkte benötigt.

Auf Fahrbahntextur und gefahrene Geschwindigkeit hat der Straßenbetreiber nach Bau- und Instandsetzung nur mehr begrenzt Einfluss, wobei diese Größen jedoch meist über einige Jahre unverändert bleiben und daher nur selten bzw. in großen Zeitabständen angepasst werden müssen.

Die Prognosedaten für Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Temperatur können aus meteorologischen Modellrechnungen bezogen werden. Durch die Unsicherheit von Wetterprognosen mit zunehmendem Prognosehorizont nimmt die Genauigkeit des dargestellten Modells entsprechend ab. Für die Einsatzplanung reichen jedoch meist die Wochen- bzw. 3-Tagesprognosen mittlerer Prognosegenauigkeit, während für die Streumengenberechnung die wesentlich präziseren 3-h Prognosen auf Basis von Nowcasts sowie die ermittelten Fahrbahntemperaturen aus dem Streueinsatz verwendet werden sollten.

Der Straßenbetreiber bzw. die Winterdienstmannschaft kann die Ergebnisse durch die Wahl des verwendeten Streumittels (Modul Gefrierpunkt) beeinflussen. Begrenzt wird die Freiheit in der Streumittelwahl durch das Fehlen wirtschaftlicher Alternativen zu NaCl als Grundtaumittel.

Damit beschränkt sich die einzig effektive Steuerungsebene des Straßenbetreibers auf das Modul Restsalzabnahme, wo der Fahrer des Streuwagens die auszubringende Taumittelmenge, den Soleanteil und das Streuintervall bestimmen kann. Werden diesen Tätigkeiten die auftretenden Kosten des Straßenbetreibers hinterlegt, können Kosten und Wirkung unterschiedlicher Streustrategien gegenübergestellt werden. Eine Gesamtoptimierung kann dann entweder unter Einbeziehung der Auswirkungen auf Nutzer und Dritte oder innerhalb der Randbedingungen der einschlägigen Vorschriften erfolgen.

2 Straßenbetrieb in Österreich

2.1 Straßenbetrieb im Allgemeinen

Die Kernaufgabe des Straßennetzes liegt darin, die Erreichbarkeit von Gebieten oder Einzelobjekten unter Einhaltung der notwendigen Verkehrssicherheit zu gewährleisten. Der Gesetzgeber sieht dabei vor, dass Bundesstraßen derart zu planen, zu bauen und zu *erhalten* sind, dass sie nach Maßgabe und bei Beachtung der straßenpolizeilichen und kraftfahrrechtlichen Vorschriften von allen Straßenbenutzern unter Bedachtnahme auf die durch die Witterungsverhältnisse oder durch Elementarereignisse bestimmten Umstände ohne Gefahr benützlich sind.¹ Dabei wird schon darauf hingewiesen, dass das Straßennetz regelmäßig erhalten, instandgesetzt oder erneuert werden muss, um seine Aufgabe dauerhaft erfüllen zu können. Dass eine Straße nicht ohne Gefahr benutzt werden kann, zeigt sich jedoch in dem Zwang zum Abschluss einer Haftpflichtversicherung bei der Anmeldung eines Kraftfahrzeuges. Der Gesetzgeber weicht dabei vom Grundsatz der Verschuldenshaftung ab, man spricht dann von der Gefährdungshaftung.

Instandsetzungen und Erneuerungen von Straßen ziehen umfangreichere und längere Baumaßnahmen mit sich, die zu einer Verbesserung der Straßensubstanz führen. Die dafür aufgewendeten Investitionen gewährleisten auch die notwendige Verkehrssicherheit und gleichbleibende Leistungsfähigkeit über die gesamte Lebensdauer einer Straße. Ein sparsamer, zweckmäßiger und effizienter Mitteleinsatz ist dabei Grundvoraussetzung.

Im Gegensatz zu Instandsetzung und Erneuerung, die nur in vergleichsweise kurzen Zeiträumen der Lebensdauer in Anspruch genommen werden, läuft der Straßenbetrieb während der gesamten Lebensdauer einer Straße. Leistungen der betrieblichen Straßenerhaltung sind Tätigkeiten und Aufwendungen, die unmittelbar dem Betrieb und der Erhaltung der Straßen oder ihrer Bestandteile zugeordnet werden können. Die Leistungen des Straßenbetriebes, wie etwa der Winterdienst als wichtiger Teil, haben zum Teil keinen direkten Einfluss auf die Substanz der Straße, jedoch auf die momentane Verkehrssicherheit.

2.1.1 Aufgaben und Abgrenzung des Straßenbetriebes

Die Erhaltung eines Straßennetzes kann wie in Abbildung 2.1 dargestellt, in eine bauliche und eine betriebliche Erhaltung getrennt werden. Die bauliche Erhaltung umfasst Arbeiten, die der Erhaltung der Straße als Bauwerk dienen wie insbesondere Arbeiten am Straßenkörper oder den Kunstbauten, etwa Instandhaltung, Instandsetzung und Erneuerung. Die bauliche Erhaltung dient somit einer Sicherstellung bzw. Verbesserung der Straßensubstanz.

Die betriebliche Erhaltung umfasst Aufgaben, welche für die dauernde Betriebsbereitschaft der Straße notwendig sind, wie etwa Winterdienst, Grünflächenpflege, Erhaltung von Straßenausstattung, Nebenanlagen und Bodenmarkierungen sowie Hilfsdienste. Betriebliche Erhaltungsaufgaben verbessern die Substanz der Straße nicht, tragen jedoch maßgeblich zur Gewährleistung einer durchgehenden Nutzbarkeit und Reduktion einer Substanzverschlechterung mittels präventiver Maßnahmen bei.

In Österreich wird der Straßenbetrieb, mit Ausnahme einiger kleiner privater Straßenbetreiber, auf drei Ebenen durchgeführt. Das hochrangige Netz der Autobahnen und Schnellstraßen wurde 1997 von

¹Vgl. § 7 Abs. 1 BStG 1971

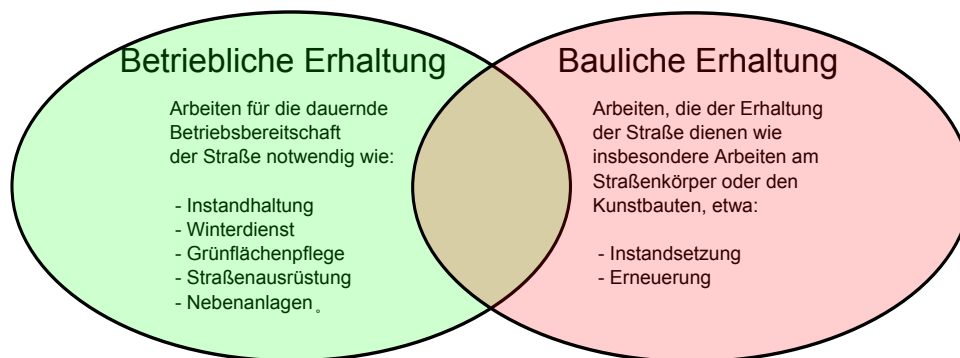


Abbildung 2.1: Abgrenzung des Straßenbetriebes von der baulichen Straßenerhaltung

den Bundesländern an die ASFiNAG übertragen, die ab 2002 sukzessive mit die Betreuung und den Ausbau des Netzes übernommen hat. Das Netz der weiteren Landesstraßen B beträgt 9.959 km und wurde im Jahr 2002 an die Länder übertragen, die seither für die Betreuung zuständig sind. Zusätzlich wird von einigen Ländern noch der Winterdienst auf Güterwegen durchgeführt. Das weitaus längste Netz haben die Gemeinden in Österreich in welchen der Winterdienst, je nach Gemeindegröße, entweder von eigenen Abteilungen oder von Mitarbeitern des Gemeindebauhofs durchgeführt wird (siehe Tabelle 2.1). Die durchschnittliche Länge des Straßennetzes einer Gemeinde ist mit 33,5 km dabei relativ kurz und kann auch stark vom Durchschnitt abweichen. Dadurch ist es für Gemeinden, insbesondere für kleinere, schwierig einen effizienten Winterdienst durchzuführen.

Straßenbetreiber	Betreutes Straßennetz	Netzlänge
ASFiNAG	Autobahnen und Schnellstraßen sowie deren Netzanschlüsse	2.192 km
Länder	Alle Landesstraßen B sowie Landesstraßen L	33.637 km
Gemeinden	Alle Gemeindestraßen	88.759 km
	Straßennetz gesamt	124.588 km

Tabelle 2.1: Straßenbetreiber in Österreich (Stand 2015, Quelle:bmvit, Statistik Straße und Verkehr)

Die Aufteilung der Straßennetzkilometer ist in Abbildung 2.2 zu erkennen. Es liegt gerade bei den höherrangigen Straßen im Osten Österreichs ein stark verzweigtes Straßennetz vor, während in den alpinen Regionen eher Talerschließungen dominieren.

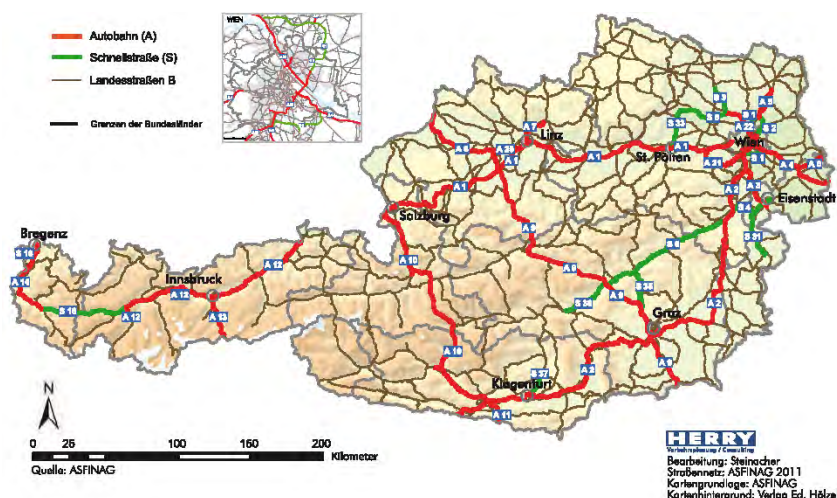


Abbildung 2.2: Straßennetz der Bundesstraßen und ausgewählter Landesstraßen B in Österreich 2011
Quelle: [28]

2.1.2 Kennzahlen der Straßenbetreiber

Um den Betrieb des Straßennetzes erfolgreich durchführen zu können, ist es für einen Straßenbetreiber zweckmäßig eine Infrastruktur aufzubauen, die eine dauerhafte Benutzbarkeit des Netzes sicherstellen kann. Der Straßenbetrieb wird von den Straßen- bzw. Autobahnmeistereien durchgeführt, die für Betrieb und Erhaltung der Straßen im jeweiligen Betreuungsbereich zuständig sind. Seit der Ausgliederung der Autobahnen an die ASFiNAG wird auf dem A+S-Netz der Betrieb durch Autobahnmeistereien durchgeführt, die ausschließlich Autobahnen, Schnellstraßen und deren Anschlüsse betreuen, Landesstraßen werden von Straßenmeistereien der jeweiligen Bundesländer betreut. Bis etwa 2005 waren in Österreich auch Mischmeistereien üblich, welche Autobahnen, Landesstraßen B und Landesstraßen L betreuten, wie sie heute etwa noch in Deutschland zu finden sind.

Die im Mittel von einer Meisterei betreute Streckenlänge liegt bei rund 60 km auf Autobahnen und Schnellstraßen bzw. bei 160 km für Landesstraßen. Dabei ergeben sich, wie in Abbildung 2.3a ersichtlich, zum Teil große Unterschiede. Die hohen Betreuungslängen von NÖ und Salzburg spiegeln das verzweigte Streckennetz in NÖ bzw. die geringere Anzahl an entsprechend größeren Straßenmeistereien in Salzburg wieder. Dieser Unterschied geht jedoch verloren, wenn die zu betreuende Strecke je Mitarbeiter betrachtet wird. Hier liegen alle Bundesländer mit Ausnahme der Stadt Wien bzw. der ASFiNAG bei etwa 22,5 km je Mitarbeiter (Abbildung 2.3b). Dieser relativ stabile Wert zeigt auch den Personalaufwand, der in etwa für den Betrieb einer Straße eingesetzt werden muss.

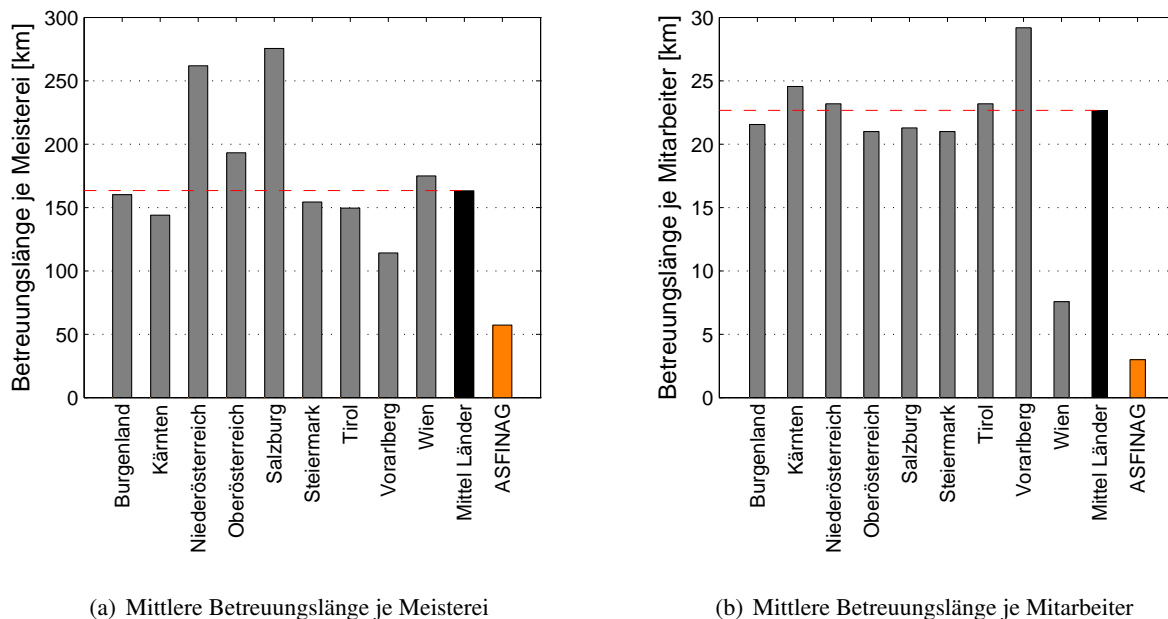


Abbildung 2.3: Mittlere Betreuungslängen im Straßenbetrieb in den Bundesländern bzw. bei der ASFiNAG

Eine etwas weiter ausholende Übersicht über die durchschnittliche Menge an vom Straßenbetrieb zu pflegenden Objekten stellen die Bestandskenngrößen einer durchschnittlichen (deutschen) Autobahnmeisterei in Tabelle 2.2 dar. Für den Winterdienst ist neben den Netzkilometern vor allem die Brückenanzahl wichtig, da diese bei Reifbildung besonders exponierte Abschnitte darstellen. Für Österreichische Autobahnmeistereien kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil an Kunstbauten durch die erschwerten topografischen Verhältnisse höher ist. Zusätzlich ist eine deutlich höhere Fläche an Lärmschutzwänden von den Meistereien zu betreuen.

70 km	Netzlänge (durchgehende Fahrbahn)
35 km	ein- und zweistreifige Rampen und Nebenfahrbahnen
10	Anschlussstellen
1	Autobahnkreuz oder -dreieck
2	Tank- und Rastanlagen
4	KWC- und PWC-Anlagen
6	Unbewirtschaftete Rastanlagen
165	Brückenbauwerke
270 km	passive Schutzeinrichtungen
1.815	Stück Verkehrszeichen
146 ha	zu pflegende Grünflächen

Tabelle 2.2: Bestandskenngrößen einer durchschnittlichen Autobahnmeisterei in Deutschland [44]

2.2 Aufwendungen für den Straßenbetrieb

Das hochrangige Straßennetz Österreichs ist bis auf wenige Lückenschlüsse so weit ausgebaut, dass in naher Zukunft mit keinen großen Neubauinvestitionen zu rechnen ist. Auf dem Netz der ASFiNAG ist der Kostenanteil der Neubauten durch sehr kostenintensive Projekte wie Tunnelerweiterungen und neue Trassen in sensiblen Wohn- und Schutzgebieten noch vergleichsweise hoch. Mit dem vorherrschenden Trend zur Abwanderung aus ländlichen Gebieten in Städte ist auch auf dem Großteil des Gemeindestraßennetzes wenig Neubauaktivität zu erwarten. Viel mehr werden Gemeinden durch das sinkende Budget für Straßenerhaltung und -betrieb vor schwierige Probleme gestellt [30].

2.2.1 Ausgaben für den ganzjährigen Straßenbetrieb

Ein Beispiel für die Kostenverteilung des gesamten Straßenbaubudgets auf einzelnen Tätigkeiten im Straßenbetrieb wird auf Basis von Zahlen des Landes Niederösterreich aus dem Jahr 2008 in Abbildung 2.4 gezeigt. Für Erhaltung und Betrieb der Landesstraßen fallen dabei mit 350 Mio. Euro genau zwei Drittel des gesamten Straßenbaubudgets von 526 Mio. Euro an. Die Hälfte der Kosten für den Straßenbetrieb fällt bei der baulichen Erhaltung (28%) und dem Winterdienst (22%) an. Die andere Hälfte verteilt sich gemäß der Darstellung auf weitere Ausgaben im Straßenbetrieb.

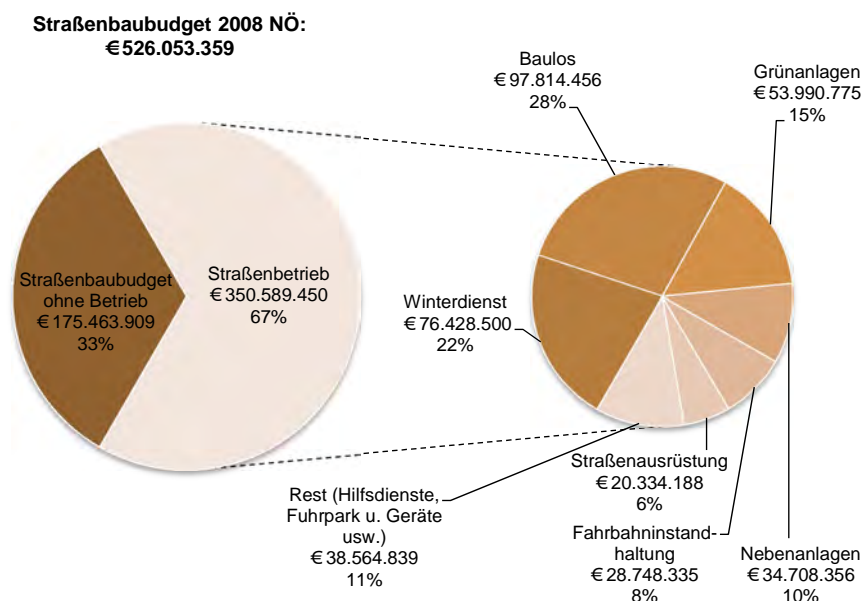


Abbildung 2.4: Aufteilung des Straßenbaubudgets des Landes Niederösterreich im Jahr 2008

2.2.2 Kostenkennzahlen für den Winterdienst

Für jegliche Art wirtschaftlicher Betrachtung von Winterdienststrategien bzw. einzelner Einsatzfahrten sind Kostenkennzahlen notwendig, deren Grundlagen zur Erhebung in der Regel konstant bleiben und damit eine Vergleichbarkeit gewährleisten. Es sei hier ausdrücklich auf mögliche Schwankungen zwischen den hier angeführten Kennzahlen und jenen eines Straßenbetreibers hingewiesen. Diese haben eine Vielzahl von Ursachen, etwa unterschiedliche Verrechnungssysteme und Teilansätze, und lassen sich zum Teil nicht beseitigen. Im Folgenden werden daher Kennzahlen verwendet, die auf eigenen Kalkulationen bzw. publizierten Zahlen, etwa aus Rechnungshofberichten, basieren. Sie stellen einen guten Anhaltspunkt dar und sind in der späteren Modellbetrachtung auch flexibel genug eingebunden, um rasch durch Zahlen aus der tatsächlichen Kostenrechnung eines Betriebes ersetzt zu werden.

Zu den weitgehend bekannten Zahlen gehören die Materialkosten, etwa für Tausalz, wobei hier auch der Verbrauch der Bundesländer bzw. der ASFiNAG bekannt ist. Kosten für Personal und Geräte können noch vergleichsweise einfach basierend auf herkömmlicher Kostenkalkulation ermittelt werden. Schwierigkeiten treten bei der Zuordnung etwa von Hochbaukosten zu einzelnen Aufgaben im Straßenbetrieb auf. Diese sind für die Optimierung der Einsatzfahrten und Winterdienststrategien jedoch von untergeordneter Bedeutung und werden daher im Weiteren auch nicht betrachtet. Lediglich eindeutig zuordenbare Kosten, wie etwa Baukosten für Salzsilos, fließen in die Betrachtungen mit ein.

Bei den Kosten für Taumittel ist die Art des Taumittels der dominante Faktor; Transportwege, Abnahmemenge, Qualitätsabzüge und andere Ausschreibungsvereinbarungen haben jedoch Einfluss auf die tatsächlichen Kosten. Auch der Zeitpunkt des Kaufes kann eine Rolle spielen, so kann Salz im Frühjahr/Sommer oft deutlich günstiger sein als im Winter. Bei flächendeckender, akuter Salzknappheit kann der Preis jedoch bis zum dreifachen des Normalpreises betragen. Der Preis für NaCl liegt bei 90 € bis 100 € je Tonne, kann aber bei Engpässen in der Versorgung, wie etwa in der Saison 2010/2011, auf bis zu 300 € je Tonne ansteigen. Die Erhöhung der Lagerkapazitäten bei den Straßenbetreibern und der Einkauf bereits im Frühjahr hat die jahreszeitlichen Schwankungen im Preis reduziert.

2.2.3 Internationaler Vergleich

Ein Vergleich der Ausgaben für den Straßenbetrieb verschiedener Straßenerhalter gestaltet sich durch nicht einheitliche Abgrenzungen einzelner Kostenträger und Kostenstellen schwierig. Die für eine Lagerhalle mit unterschiedlicher Nutzung anfallenden Kosten oder Kosten für Verwaltungspersonal mit vielen Aufgaben lassen sich etwa nur bedingt zuordnen. Die Auswirkungen dieser Problemstellung sind in Abbildung 2.5 zu sehen, in welcher die Kosten für den Straßenbetrieb je Straßenkilometer im internationalen Vergleich dargestellt ist. Die Kosten beziehen sich auf das Jahr 2009 und stammen aus [16] für die Europäischen Staaten bzw. [37] für die US-Bundesstaaten.

Im internationalen Vergleich zeigt sich beim Winterdienst im Bezug auf das verwendete Streusalz, dass generell lokale Produkte verwendet werden. Während in der D-A-CH -Region vorwiegend Stein- oder Siedesalz verwendet wird, wird etwa in Frankreich oder Spanien Meersalz eingesetzt, in Großbritannien und Polen ist sehr grobkörniges Salz üblich. Dies hängt zum einen an den lange bestehenden Salzmonopolen in einigen Staaten und der sich daraus ergebenden Gepflogenheiten der Straßenbetreiber zusammen. Ein weiterer Punkt in dieser Hinsicht ist der bei weiten Lieferstrecken rasch ansteigende Preis durch die anfallenden Transportkosten sowie die gesammelten Praxiserfahrungen mit den jeweils vorherrschendem Produkt.

2 Straßenbetrieb in Österreich

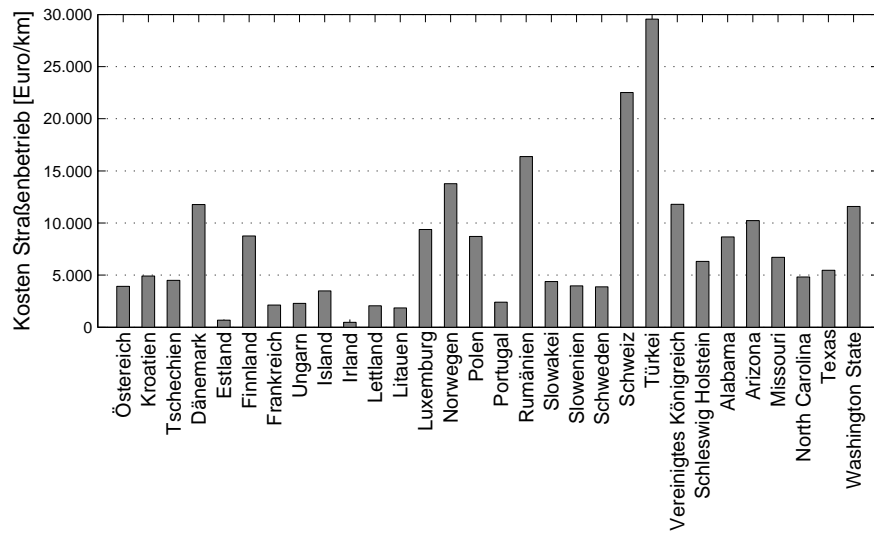


Abbildung 2.5: Vergleich der Kosten für den Straßenbetrieb in €/km (Datenbasis: 2011)

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

Neben den allgemeinen Rahmenbedingungen rund um den Straßenbetrieb gibt es eine Reihe an organisatorischen Aufgaben, Ausstattung sowie rechtliche und klimatische Rahmenbedingungen zu beleuchten, welche den Winterdienst betreffen. Die in diesem Kapitel vorgestellten Grundlagen fließen oft nicht direkt in das Straßenzustandsmodell ein, haben aber zumeist indirekten Einfluss auf den Straßenzustand. So können beispielsweise Schneezäune die zu erwartende Schneemenge auf der Straße reduzieren und damit konkrete Einsatzfahrten beeinflussen.

3.1 Aufgaben und Interessengruppen des Winterdienstes

Der Winterdienst stellt die Verkehrssicherheit und Verfügbarkeit des öffentlichen Straßennetzes in den Wintermonaten sicher und ist notwendig, um die von Güter-, Berufs- und Freizeitverkehr gestellten Anforderungen zu erfüllen. Der Winterdienst sichert darüber hinaus den Wirtschafts- und Lebensraum für große Teile der Bevölkerung in mittleren und nördlichen Breiten.

Der Winterdienst in Österreich umfasst gemäß RVS 12.04.12 (08/2010) alle Vorkehrungen und Arbeiten, die das Ziel haben, die Benutzbarkeit der Straßen unter Berücksichtigung der winterlichen Wittereinflüsse zu gewährleisten. Für das Maß der Sicherheit, Leichtigkeit und Flüssigkeit des Verkehrs ist neben den Anlageverhältnissen der Straßen (Linienführung, Querneigung, Kurvenradien etc.) der bauliche Zustand der Verkehrsflächen (z. B. Griffigkeit, Spurrinnen) maßgebend. Winterliche Wittereinflüsse wie Schnee oder Eis auf der Straße führen zu einem gewissen Grade unabhängig von Trassierung und baulichem Zustand zu einer Verminderung der Griffigkeit der Verkehrsfläche. Eine geringere Griffigkeit führt zu verringerten, fahrdynamisch möglichen Kurvengeschwindigkeiten sowie längeren Bremswegen und in weiterer Folge zu Verkehrsbeeinträchtigungen und erhöhtem Unfallrisiko. Der Winterdienst erhöht durch Räumen des Schnees und Ausbringen von Streugut die Griffigkeit und verbessert die Fahrersicherheit für den Nutzer.

3.1.1 Aufgaben und Umfang

Die Aufgaben des Winterdienstes lassen sich im Wesentlichen durch zwei konkrete Maßnahmen erfüllen:

- Das mechanische Beseitigen des auf der Fahrbahn liegenden Schnees, also das *Räumen*,
- Das Verhindern von Glatteisbildung, wie es etwa beim Frieren eines auf der Fahrbahn befindlichen Wasserfilms geschieht, durch das *Streuen*.

Bei der Art der Schneeräumung kann zwischen den folgenden drei Varianten unterschieden werden:

- Die *Schwarzräumung* hat das Ziel, den kompletten Schnee durch Räumen und Streuen von auftauenden Streumitteln von der Fahrbahn zu beseitigen.
- Im Gegensatz dazu steht die *Weißräumung*, bei der noch Schnee auf der Fahrbahn bleibt und meist Splitt als Streumittel verwendet wird. Diese Art wird nicht auf hochrangigen Straßen eingesetzt.
- In nordischen Ländern gibt es zusätzlich noch die *Weißer Fahrbahn*, bei der nur geräumt wird, eine gewisse Schneedecke jedoch trotzdem erhalten bleibt. Aufgrund der lange anhaltenden Winterperiode mit vielen starken Schneefällen sind Maßnahmen zur weitergehenden Räumung sehr

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

unwirtschaftlich. Diese Art der Räumung ist jedoch der Bevölkerung bekannt, welche das Fahrverhalten dementsprechend anpasst.

Generell hat der Fahrer des Räum- und Streufahrzeuges die Möglichkeit, während der Fahrt zwischen Trockensalz- und Feuchtsalzstreuung zu wechseln, sowie die ausgebrachte Streumittelmenge in g/m^2 einzustellen. Er ist schlussendlich die letzte Entscheidungsebene und hat damit eine gewisse Verantwortung. Der Einsatzleiter gibt basierend auf Erfahrung bzw. einer Streustrategie Vorgaben bezüglich Betreuungsintensität und Streumengen vor, die lokal z. B. auf Brücken vom Fahrer angepasst werden müssen. Prinzipiell lassen sich zwei Arten der Streufahrten unterscheiden:

- *Kurative Streuung* ist der Fall, wenn Niederschlag fällt und dieser entweder schon gefroren fällt (Schnee, Eisregen) oder beim Auftreffen auf der Fahrbahn zu gefrieren droht (gefrierender Regen). Am häufigsten kommt Schneefall vor, bei dem die Aufgabe des Winterdienstes ein Entfernen des auf der Fahrbahn liegenden Schnees (Räumung) und eine Verhinderung von Schneeglätte (Streuen) ist. Diese Streufahrten werden in der Regel so lange durchgeführt, bis das Niederschlagsereignis endet und der Schnee entfernt ist.
- Bei der *präventiven Streuung* wird vor einem Niederschlagsereignis eine geringe Menge an Tausalz auf der Fahrbahn aufgebracht, um ein Anfriern des Niederschlags an der Fahrbahn zu verhindern. Geschieht dies nicht und der Niederschlag friert an der Fahrbahn fest, so ist es nachträglich beinahe unmöglich diesen durch darauf gestreutes Salz (auch mit Maximalmengen) wieder zu entfernen. Weiters dient die Präventivstreuung der Verhinderung von Reifglättebildung, die auch ohne atmosphärischen Niederschlag stattfindet (Abbildung 3.1).

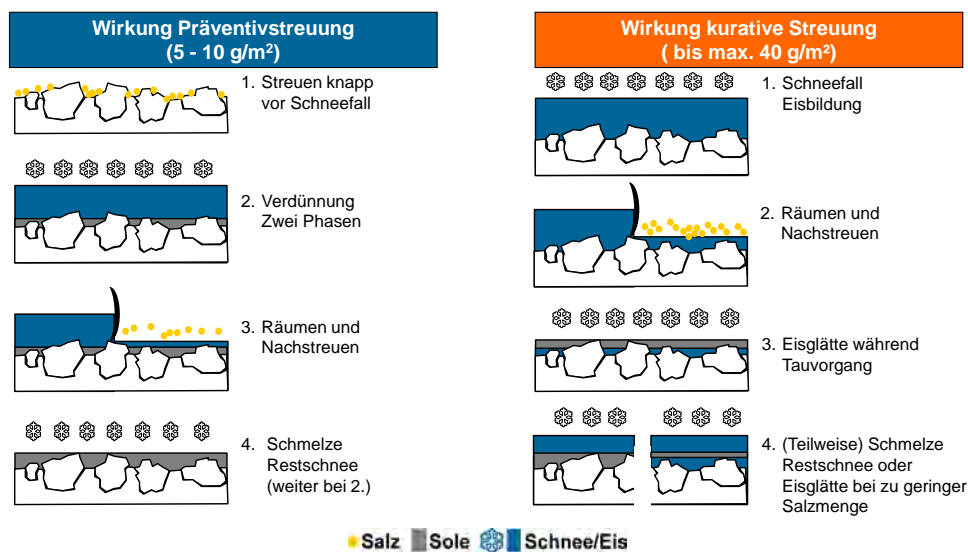


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung präventiver und kurativer Streufahrten

In der Praxis wird vom Straßenmeister ein Dienstplan erstellt, der Mitarbeiter zu Bereitschaft (in der Straßenmeisterei) oder zu Rufbereitschaft (zu Hause) einteilt. Die zu Bereitschaft eingeteilten Mitarbeiter informieren sich über Wetterdienste, Kameras oder durch Kontrollfahrten über den aktuellen Fahrbahnzustand und führt bei Bedarf Streu-, Räum- bzw. Streu- und Räumfahrten durch. Wichtig ist, dass genügend Mitarbeiter und Fahrzeuge zur Verfügung stehen, falls starker Schneefall eintritt und mehr Personal für eine intensivere Streckenbetreuung notwendig wird. Zu viele Mitarbeiter auf Bereitschaft wiederum bedeuten aber auch enorme Kosten, die sich vermeiden ließen, wenn der tatsächliche Bedarf genauer bekannt wäre. Eine gute Wetterprognose und die Erfahrung des Straßenmeisters beeinflussen die Kosten positiv. Zu Schichtbeginn werden den Mitarbeitern einzelne Arbeiten bzw. Bereiche zugeteilt (etwa manuelles Entfernen des Schnees bei Tunnelportalen) sowie die aktuelle Situation auf der Straße von der Mannschaft der zu Ende gehenden Schicht in Erfahrung gebracht.

3.1 Aufgaben und Interessengruppen des Winterdienstes

Die Streufahrten (vor allem jene der Präventivstreuung) werden zu Tageszeiten mit wenig Verkehr, also möglichst in den frühen Morgenstunden und am frühen Nachmittag, vor dem Berufsverkehr, durchgeführt. Bei Schneefall kann auf den Verkehr keine Rücksicht genommen werden, da Streuintervalle einzuhalten sind und der Schnee so rasch wie möglich von der Fahrbahn entfernt werden muss.

Wesentlichen Einfluss auf die Intensität der Winterdienstbetreuung haben die Straßenkategorie, das Verkehrsaufkommen und die örtlichen Wetterverhältnisse. Die Räumung des Schnees erfolgt nach dem Schneeräumplan unter Einsatz von Schneepflügen und Schneeräumgerät. Die Bekämpfung der Straßenglätte erfolgt unter Einsatz von abstumpfenden und/oder auftauenden Streumitteln. Das Anforderungsniveau ist österreichweit einheitlich geregelt und abhängig von Wettersituation sowie Straßenkategorie in Tabellen gefasst. Die unterschiedlichen Anforderungsniveaus ergeben sich aus der Bedeutung einer Straße sowie dem jährlichen durchschnittlichen täglichen Verkehr (JDTV) einer Straße, welche in Tabelle 3.1, nach RVS 12.04.12 (2010) entnommenen Listen, festgelegt sind. Für Freilandstraßen und Stadtstraßen existieren jeweils eigene Straßenkategorien und Betreuungslisten.

Kategorie A:	Autobahnen, Schnellstraßen und deren Netzanschluss
Kategorie B:	Landesstraßen mit überörtlicher Verkehrsbedeutung oder mit einer Verkehrsstärke von JDTV > 5.000 KFZ / 24 h
Kategorie C:	Landesstraßen mit einer Verkehrsstärke von 1.000 < JDTV < 5.000 KFZ/24 h
Kategorie D:	Landesstraßen mit einer Verkehrsstärke von JDTV < 1.000 KFZ/24 h

Tabelle 3.1: Winterdienstkategorien im Außerortsbereich nach [18]

Die Winterdienstbetreuungsintensitäten für Straßen außerhalb von Ortsgebieten teilt die RVS 12.04.12 in die Kategorien A bis D auf. Für den urbanen Bereich sind im Jahr 2010 die Kategorien P1 bis P7 neu hinzugekommen, welche eine Aufteilung auf die Verkehrsflächen, Fahrbahnen, Radwege, Fußgängerflächen vorschreibt. In jeder dieser Kategorien gibt es analog zu den Kategorien A bis D festgelegte Betreuungszeiten, Intervalle etc.

Kategorie P1:	Innerstädtische Hauptverkehrsstraßen, Einfahrtstraßen, Straßen mit Linien / Straßenbahnverkehr, Zufahrten zu öffentlichen Krankenhäusern und Feuerwachen
Kategorie P2:	Zubringer-, Siedlungs-, Gewerbe- und Bergstraßen
Kategorie P3:	Straßen mit untergeordneter Verkehrsbedeutung, Zubringerstraßen in Siedlungs- und Gewerbegebieten, Bergstraßen
Kategorie P4:	Getrennt geführte Radwege als Verbindung von Ortsteilen bzw. mit Bedeutung für den Berufsverkehr / Schulverkehr
Kategorie P5:	Getrennt geführte Radwege als Verbindung mit einer örtlichen Erschließungsfunktion bzw. Freizeitverkehr
Kategorie P6:	Ausgewiesene Gehwege, Fußgängerzonen, Einkaufstraßen, Schulwege, Wege im Bereich von Krankenhäusern u.ä. Einrichtungen, Haltestellen von Öffis, soweit diese im Aufgabebereich der Kommunen liegen
Kategorie P7:	Parkplätze, Abstellflächen, Parkwege, sonstige Verkehrsflächen

Tabelle 3.2: Winterdienstkategorien im urbanen Bereich nach [18]

Diese Festlegung genauer Betreuungszeiträume und -intervalle in einer RVS ist für den urbanen Bereich eine Herausforderung und hat enorme Auswirkungen auf den Winterdienst von Gemeinden. Besonders kleinere Gemeinden sind oft nicht in der Lage bei Personal- oder Geräteausfall für Ersatz zu sorgen. Auf die genaue rechtliche Auslegung wird an anderer Stelle eingegangen. Für etwaige Zusammenlegungen von Routen oder Ersatzfahrzeugen sollten bereits vor Eintreten des Ernstfalles entsprechende Szenarien entwickelt werden.

3.1.2 Betroffene Interessengruppen

Ein holistisches Modell hat auch Perspektiven außerhalb des Einflussbereiches eines Straßenbetreibers auf den Winterdienst zu beachten. Es gibt dabei mindestens vier Gruppen von Betroffenen, deren Ziele zum Teil diametral entgegengesetzt sind. Die Optimierung des Winterdienstes kann jedoch, mit Ausnahme der angepassten Fahrweise der Straßennutzer, nur durch den Straßenbetreiber erfolgen, weshalb sich der Großteil dieser Arbeit mit diesen Aspekten beschäftigt. Der Straßenbetreiber kann den Winterdienst demnach nur an der Schnittstelle der Anforderungen an ihn selbst, zu den Nutzer, zur Umwelt und zur Gesellschaft optimieren. Als weitere Erschwernis kommen sehr knappe Budgets hinzu, die bestmöglich genutzt werden müssen, um allen diesen Anforderungen gerecht zu werden. Die vier Gruppen und deren schmale Schnittstellen sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

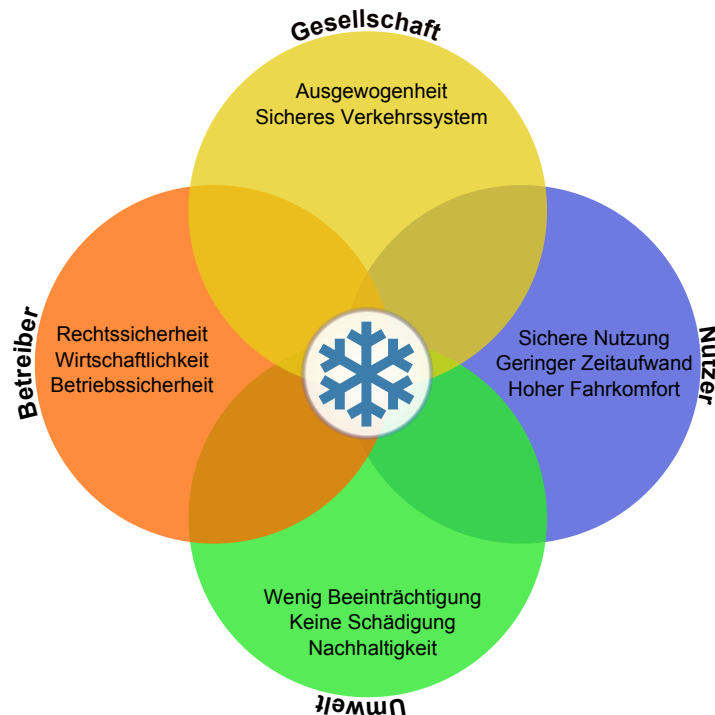


Abbildung 3.2: Zielkonflikte der vom Winterdienst betroffenen Gruppen

Die *Nutzer* einer Straße wollen in erster Linie sicher und rasch an ihr Ziel kommen. Im Idealfall sollte die Fahrbahn daher stets trocken und ohne Schäden sein. Eine Schneefahrbahn ist nur bei angepasster (reduzierter) Geschwindigkeit sicher befahrbar. Es kommt also zu einem unerwünschten Zeitverlust, der viele Straßennutzer zu Beschwerden bei den Straßenbetreibern veranlasst. Weiters wird auch ein hoher Fahrkomfort gefordert, der etwa durch die höheren Anforderungen an das Fahrkönnen zum Teil verloren geht.

Die *Gesellschaft* als Gesamtheit der Bevölkerung legt aus volkswirtschaftlichen Gründen hohen Wert auf ein sicheres Verkehrssystem. Unfälle, Staus und ähnliche Verkehrsbehinderungen wirken sich negativ auf das Gesamtsystem aus und sollen durch geeignete Maßnahmen und Gesetze möglichst vermindert werden. Zudem ist der Gesellschaft eine Ausgewogenheit zwischen den einzelnen Gruppen wichtig, da etwaige Ungerechtigkeiten zu Unmut führen können.

Der *Umwelt* liegt vor allem an einer möglichst geringen, besser noch gar keiner Beeinträchtigung durch den Winterdienst. Aus dieser Sicht ist jener Winterdienst der beste, der gar nicht durchgeführt wird. Weder Pflanzen und Tiere noch Lebensräume sollen geschädigt werden. Neben den direkten Auswirkungen der Streumittel sind auch Lärm, Schadstoffausstoß etc. zu beachten.

Am *Straßenbetreiber* liegt es nun diese Zielkonflikte aufzulösen und den Winterdienst operativ durchzuführen. Wenn der Winterdienst ordnungsgemäß durchgeführt wird, erwartet sich der Betreiber auch Rechtssicherheit gegenüber Schadensansprüchen nach Unfällen, die etwa auf überhöhte Geschwindigkeit auf winterlicher Fahrbahn zurückzuführen sind. Dabei sollen die Mittel jedoch wirtschaftlich eingesetzt werden, ein veränderter volkswirtschaftlicher Schaden wird dem Straßenbetreiber nicht vergütet. Im Fall einer verkehrsabhängigen Maut entstehen bei witterungsbedingt geringerem Verkehrsaufkommen jedoch direkt finanzielle Schäden, die durch den Winterdienst vermieden werden sollen.

3.2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Einem Unfall bei winterlichen Verhältnissen auf öffentlichen Verkehrsflächen folgt in manchen Fällen ein gerichtliches Verfahren zur Feststellung eventueller Schadensersatzansprüche aus zivilrechtlicher Haftung oder gar ein Strafverfahren. Rechtliche Probleme können jedoch bereits bei der Durchführung des Winterdienstes auftreten, wenn geltende Arbeitnehmerschutzgesetze oder Lenkzeitenregelungen missachtet werden. Wenngleich die Anzahl von Mitarbeitern im Winterdienst, welche aufgrund von Rechtsvergehen angezeigt oder gar verurteilt werden, sehr gering ist, bleibt häufig eine Unsicherheit beim Personal zurück. Durch gezielte Aufklärung über die geltende Rechtslage in Rahmen von Schulungen kann das Vertrauen in die Rechtssicherheit erhöht und damit die eine oder andere „Sicherheitsstreuung“ vermieden werden.

Im Hinblick auf das in dieser Arbeit entwickelte Modell sind besonders die Vorschriften zu Betreuungszeiträumen und -intervallen im Winterdienst sowie zu Lenk- und Ruhezeiten maßgeblich. So kann es etwa bei der Simulation von Streurouten dazu kommen, dass Einsatzfahrten aufgrund des vorgeschriebenen Mindestintervalls zu verdichten sind. Bei der Durchführung des Winterdienstes durch Dritte ist auch darauf zu achten, ob die Fahrer der privaten Firmen von den Lenkzeitregelungen ausgenommen sind, wie dies etwa für Fahrer im Arbeitsverhältnis zu einer Gebietskörperschaft der Fall ist¹. Auch Umweltschutzgesetze können einen Einfluss auf die Wahl der Winterdienststrategie haben, wenn etwa der Streumittel Einsatz dadurch begrenzt oder gar verboten wird.

Nicht zuletzt ist der Straßenbenutzer verpflichtet, sich an den in erster Linie in der Straßenverkehrsordnung und dem Kraftfahrzeuggesetz definierten rechtlichen Rahmen zu halten. Im Folgenden werden die wichtigsten, den Winterdienst betreffenden Stellen der verschiedenen Gesetzestexte analysiert und ihre Auswirkungen auf die Winterdienstpraxis festgemacht. Dabei ist noch anzumerken, dass Rechtsstreitigkeiten Einzelfälle sind und jeweils gesondert betrachtet werden, es jedoch von Seiten der Rechtsprechung bereits einige richtungsweisende Urteile gibt.

3.2.1 Haftung und Verantwortlichkeit

Eine für die Mitarbeiter im Winterdienst stets gegenwärtige Fragestellung ist die rechtliche Folge von Unfällen auf der betreuten Strecke. Kommt es zu einem Verkehrsunfall oder stürzt eine Person bei Schnee oder Eis, kann es nach einem polizeilichen Ermittlungsverfahren auch zur Anklage, meist wegen fahrlässiger Körperverletzung (§88 StGB), kommen. Problematisch in dieser Strafrechtssache ist, dass hier immer eine natürliche Person als Schuldiger geführt wird. Anders formuliert: eine Organisation bzw. Versicherung tritt keine Haftstrafe an, dies ist immer ein Mensch.

§ 88 StGB, Fahrlässige Körperverletzung

(1) Wer fahrlässig einen anderen am Körper verletzt oder an der Gesundheit schädigt, ist mit Freiheitsstrafe bis zu drei Monaten oder mit Geldstrafe bis zu 180 Tagessätzen zu bestrafen.

(2) Trifft den Täter kein schweres Verschulden und ist entweder

1. die verletzte Person mit dem Täter in auf- oder absteigender Linie verwandt oder verschwägert oder

¹Vgl. §1 Arbeitszeitgesetz

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

sein Ehegatte, sein eingetragener Partner, sein Bruder oder seine Schwester oder nach §72 Abs.2 wie ein Angehöriger des Täters zu behandeln,

2. (Anm.: aufgehoben durch BGBl. I Nr. 111/2010)

3. aus der Tat keine Gesundheitsschädigung oder Berufsunfähigkeit einer anderen Person von mehr als vierzehntägiger Dauer erfolgt, so ist der Täter nach Abs. 1 nicht zu bestrafen.

(3) In den im §81 Abs.1 Z 1 bis 3 bezeichneten Fällen ist der Täter mit Freiheitsstrafe bis zu sechs Monaten oder mit Geldstrafe bis zu 360 Tagessätzen zu bestrafen.

(4) Hat die Tat eine schwere Körperverletzung (§84 Abs.1) zur Folge, so ist der Täter mit Freiheitsstrafe bis zu sechs Monaten oder mit Geldstrafe bis zu 360 Tagessätzen, in den im §81 Abs.1 Z 1 bis 3 bezeichneten Fällen aber mit Freiheitsstrafe bis zu zwei Jahren zu bestrafen.

Eine strafbare Handlung setzt dabei eine vom eigenen Willen bestimmte, tatbestandsmäßige, rechtswidrige und schuldhafte Handlung voraus. Eine Strafverfolgung setzt dabei das Vorhandensein aller genannten Bedingungen voraus.

Glücklicherweise kommt es nur relativ selten zu strafrechtlichen Prozessen. Häufiger sind Schadenersatzansprüche aus zivilrechtlichen Verfahren. Dies ist insofern besser, als das Risiko auf etwaige Ansprüche etwa durch Versicherungen abgedeckt werden kann. Zudem kann hier auch eine Organisation (Land, Gemeinde, Firma etc.) zum Leisten von Ansprüchen verpflichtet werden. Mit Ausnahme der Gefährdungshaftung (etwa beim Betreiben von Eisenbahnen oder Kraftfahrzeugen) kann die Person im *Schadenersatzrecht* nur bei schuldhaftem Verhalten ersatzpflichtig werden. Dazu müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Der *Schadenseintritt* ist eine elementare Voraussetzung. Grundsätzlich wird nur für Schäden an Vermögen und Personen gehaftet, für ideelle Schäden nicht. Eine für den Winterdienst jedoch bedeutende Ausnahme stellt das Schmerzensgeld bei Körperverletzungen dar, das über Verdienstentgang und Heilungskosten hinaus dem Geschädigten noch zusteht.
- *Kausalität* einer Handlung zum entstandenen Schaden ist ebenso Voraussetzung für einen Ersatzanspruch. Dabei ist es entscheidend, ob der Schaden auch ohne das Verhalten bzw. bei einem einer durchschnittlichen Person zumutbaren Verhalten eingetreten wäre. Es wird jedoch nur für die adäquaten Schäden gehaftet. Bei einem schuldhaft verursachten Verkehrsunfall etwa kommt für diese Verletzungen der Schadenersatzanspruch zum Tragen, nicht jedoch etwa für eventuelle, bei der Heilung gemachte Behandlungsfehler.
- *Rechtswidrigkeit* bedeutet, dass ein Verhalten absolute Rechte, gesetzliche Normen, Vertragspflichten oder Verkehrssicherungspflichten verletzt oder gegen die guten Sitten verstößt.
- *Verschulden* ist die Vorwerfbarkeit rechtswidrigen Verhaltens. Es setzt ein Verhalten voraus, das eine Person hätte vermeiden sollen und können. Beim Verschulden wird, mit Auswirkungen auf Haftung und Strafmaß, zwischen leicht fahrlässig, grob fahrlässig und vorsätzlich unterschieden. Maßstab bildet dabei eine Durchschnittsperson wobei für Sachverständige ein erhöhter Maßstab angelegt wird.

In der Gesetzgebung zu Schneeräumung und Streuung kann prinzipiell zwischen der Verpflichtung aufgrund der Straßenverkehrsordnung bzw. der Wegehalterhaftung unterschieden werden. Eine dezierte Verpflichtung des Eigentümers zur Räumung und Streuung ist jedoch nur in §93 StVO bzw. §4 Hausbesorgergesetz² vorgesehen. Die zivilrechtliche Haftung erfolgt jedoch erst in Verbindung mit §1311 ABGB, worin die Haftung bei Verletzung eines „Schutzgesetzes“ (in diesem Fall §93 StVO bzw. §4 HBG) geregelt ist [61]. Wichtig ist dabei, dass die Haftung des Eigentümers bei jeder Art des Verschuldens besteht.

²§4 HBG Abs. 1 Dem Hausbesorger obliegt: [...] e) das Reinigen der Gehsteige und deren Betreuung bei Glatteis, soweit dies in Erfüllung der dem Hauseigentümer nach den bestehenden Vorschriften obliegenden Verpflichtungen erforderlich ist; [...]

§ 93 StVO, Pflichten der Anrainer

(1) Die Eigentümer von Liegenschaften in Ortsgebieten, ausgenommen die Eigentümer von unbauten, land- und forstwirtschaftlich genutzten Liegenschaften, haben dafür zu sorgen, daß die entlang der Liegenschaft in einer Entfernung von nicht mehr als 3 m vorhandenen, dem öffentlichen Verkehr dienenden Gehsteige und Gehwege einschließlich der in ihrem Zuge befindlichen Stiegenanlagen entlang der ganzen Liegenschaft in der Zeit von 6 Uhr bis 22 Uhr von Schnee und Verunreinigungen gesäubert sowie bei Schnee und Glatteis bestreut sind. Ist ein Gehsteig (Gehweg) nicht vorhanden, so ist der Straßenrand in der Breite von 1 m zu säubern und zu bestreuen. Die gleiche Verpflichtung trifft die Eigentümer von Verkaufshütten. [...]

(6) Zum Ablagern von Schnee aus Häusern oder Grundstücken auf die Straße ist eine Bewilligung der Behörde erforderlich. Die Bewilligung ist zu erteilen, wenn das Vorhaben die Sicherheit, Leichtigkeit und Flüssigkeit des Verkehrs nicht beeinträchtigt.

Die in der Straßenverkehrsordnung angeführten Verpflichtungen betreffen jedoch in erster Linie die Betreuung von Flächen des Fußgängerverkehrs und werden daher in weiterer Folge nicht mehr betrachtet. Die für Straßenbetreiber wichtigere Gesetzesregelung ist in der Wegehalterhaftung in §1319a ABGB enthalten.

§ 1319a ABGB, Wegehalterhaftung

(1) Wird durch den mangelhaften Zustand eines Weges ein Mensch getötet, an seinem Körper oder an seiner Gesundheit verletzt oder eine Sache beschädigt, so haftet derjenige für den Ersatz des Schadens, der für den ordnungsgemäßen Zustand des Weges als Halter verantwortlich ist, sofern er oder einer seiner Leute den Mangel vorsätzlich oder grob fahrlässig verschuldet hat. Ist der Schaden bei einer unerlaubten, besonders auch widmungswidrigen, Benützung des Weges entstanden und ist die Unerlaubtheit dem Benutzer entweder nach der Art des Weges oder durch entsprechende Verbotsschilder, eine Abschränkung oder eine sonstige Absperrung des Weges erkennbar gewesen, so kann sich der Geschädigte auf den mangelhaften Zustand des Weges nicht berufen.

(2) Ein Weg im Sinn des Abs.1 ist eine Landfläche, die von jedermann unter den gleichen Bedingungen für den Verkehr jeder Art oder für bestimmte Arten des Verkehrs benützt werden darf, auch wenn sie nur für einen eingeschränkten Benutzerkreis bestimmt ist; zu einem Weg gehören auch die in seinem Zug befindlichen und dem Verkehr dienenden Anlagen, wie besonders Brücken, Stützmauern, Futtermauern, Durchlässe, Gräben und Pflanzungen. Ob der Zustand eines Weges mangelhaft ist, richtet sich danach, was nach der Art des Weges, besonders nach seiner Widmung, für seine Anlage und Betreuung angemessen und zumutbar ist.

(3) Ist der mangelhafte Zustand durch Leute des Haftpflichtigen verschuldet worden, so haften auch sie nur bei Vorsatz oder grober Fahrlässigkeit.

In diesem Fall ist nicht der Eigentümer, sondern der Wegehalter für die Schneeräumung und Streuung verantwortlich. Der Wegehalter kann, muss aber nicht Eigentümer eines Weges sein, eine anschauliche Definition findet sich in [61]:

Wegehalter ist, wer die Kosten für die Errichtung und Erhaltung des Weges trägt und die Verfügungsmacht darüber hat. Das Eigentum an der Wegfläche ist dabei nicht ausschlaggebend.

Damit ist die Festlegung des Wegehalters auf das Bundesstraßen- bzw. die Straßengesetze der Länder abgeschoben.³ In der Regel kann in Österreich davon ausgegangen werden, dass bei Autobahnen und Schnellstraßen die ASFiNAG⁴ Wegehalter ist, bei Landesstraßen B+L das jeweilige Bundesland und auf Gemeindestraßen die betreffende Gemeinde.⁵ So hat etwa gemäß §5 Niederösterreichisches Landesstraßengesetz die Landesregierung die durch das Land zu bauenden oder zu erhaltenden Straßen zu Landesstraßen zu erklären und deren Verlauf zu beschreiben, gemäß §6 kommt Gemeinden dieselbe Verpflichtung für Gemeindestraßen zu. Ähnliche Regelungen finden sich auch in den anderen Ländern. Die

³Vgl. §8 BStG und entsprechende Paragraphen in Landesstraßengesetzen

⁴Vgl. §8 BStG

⁵Vgl. Landesstraßengesetze

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

Frage, wer eigentlich Halter eines Weges sein kann, ist besonders bei kleineren Straßen durchaus schwer zu beantworten wie aus der offenen Frage des eigentlichen Wegehalters in einem Entscheidungstext des OGH⁶ ersichtlich ist.

In §1319a ABGB ist explizit eine „Leutehaftung“ angeführt, durch welche die Haftung des Wegehalters auf alle seine „Leute“ ausdehnt wird. Unter *Leute* fallen in erster Linie die Mitarbeiter des Wegehalters, jedoch auch alle Personen, die dem Wegehalter in einer Nahebeziehung stehen, die es ermöglicht konkrete Anordnungen durchzusetzen.⁷ Wird jedoch ein selbständiger Unternehmer beauftragt die Aufgaben des Wegehalters zu übernehmen, gehören die Personen des Unternehmers nicht mehr zu den Leuten des Wegehalters und dieser haftet nur für Auswahlverschulden. Etwa wenn dem Wegehalter bekannt ist, dass der Unternehmer für die ihm übertragene Aufgabe nicht oder nur mangelhaft geeignet ist bzw. Gefahren auftreten die der Unternehmer nicht allein beseitigen kann, oder der Wegehalter seine Überwachungspflicht verletzt hat. Ein selbständiger Unternehmer zählt nicht zu den Leuten des Wegehalters und haftet wieder nach allgemeinen Schadenersatzregeln bereits bei leichter Fahrlässigkeit.⁸ Ausgenommen davon ist jedoch die Beauftragung von Gemeinden durch das Land bzw. den Bund, in welchem Fall die Organe der Gemeinde in der Regel als Leute des Bundes bzw. Landes gelten.

Bei der Vergabe von Winterdienstverträgen muss auch darauf geachtet werden, ob von einem selbstständigen Unternehmer mit eigenem Verantwortungsbereich gesprochen werden kann. Behält sich der Wegehalter vor über Zeitpunkt und Umfang der Arbeiten zu entscheiden, wird der Unternehmer eher als Gehilfe angesehen und gehört damit zu den Leuten des Wegehalters. Überlässt der Wegehalter dem Unternehmer diese Entscheidung ist dieser als selbstständiger Unternehmer anzusehen. Besonders für Gemeinden ist bemerkenswert, dass Wege nicht künstlich geschaffen werden müssen, um als Weg nach §1319a ABGB zu gelten, es können auch natürlich entstandene „Trampelpfade“ als Wege gelten. Die hier angeführte Haftungsproblematik ist nicht nur auf den Winterdienst beschränkt, sondern umfasst nach §1319a ABGB alle Flächen und verkehrsdienlichen Anlagen, die sich im Zuge eines Weges befinden und umschließen damit beispielsweise auch Stützmauern und Pflanzungen.

Während in der StVO bzw. einigen Landesstraßengesetzen Schneeräumung und Streuung ausdrücklich gefordert werden, trifft dies nicht auf die Wegehalterhaftung nach §1319a ABGB zu. Es besteht jedoch eine indirekte Verpflichtung, da keine Winterdienstmaßnahme angeführt wird, sondern vielmehr ein „mangelhafter Zustand“ des Weges bei winterlichen Verhältnissen nur durch Räumen und Streuen zu verhindern ist. Die hintanzuhaltende Mangelhaftigkeit ist jedoch im Gesetz nicht definiert und ergibt sich aus dem Zweck des Weges und der Angemessenheit und Zumutbarkeit der Betreuung [61]. Der Begriff „Zustand“ bedeutet nach Ansicht des OGH, dass auch für die Verkehrssicherheit des Weges gehaftet werden soll.⁹

Der Umfang der an einer Straße durchzuführenden Winterdienstmaßnahmen hängt von deren Bedeutung und der Zumutbarkeit des Wegehalters ab. In der im Oktober 2010 eingeführten RVS 12.04.12 sind erstmals nach der Bedeutung von Straßen Betreuungszeiten, Mindestumlaufzeiten etc. und damit der Stand der Technik definiert. Mit diesem zum Teil selbst auferlegten Rahmen der Sorgfaltspflicht ist in den kommenden Jahren mit einer rechtlichen Anpassung der zumutbaren Winterdienstmaßnahmen des Wegehalters zu rechnen. Mit einer überzogenen Auslegung ist nicht zu rechnen, da der OGH bereits festgestellt hat, dass die Sorgfaltspflichten des Wegehalters nicht überspannt werden dürfen und Unzumutbares von ihm auch bei der Prüfung seines Verhaltens auf leichte Fahrlässigkeit im Rahmen vertraglicher Haftung nicht zu verlangen ist.¹⁰ Ebenso sind derzeit Fragen der ausreichenden Beladung mit Streumittel und die Wahl des richtigen Streumittels noch nicht ausschlaggebend.¹¹

⁶Vgl. OGH 20b5/79

⁷Vgl. Schwimann/Harrer, ABGB V, § 1319a Rz12

⁸Vgl. 20b5/79

⁹Vgl. 20b5/79

¹⁰Vgl. OGH 20b33/01v; ZVR 1986/11

¹¹Vgl. 20b169/04y

Neben der Bedeutung des Weges ist auch die topografische Lage von Bedeutung für die Zumutbarkeit von Maßnahmen. So hat die Rechtsprechung anerkannt, dass Wegehalter im Gebirge nicht stets für völlig gefahrlose Benutzung Sorge tragen können,¹² für eine Warnung vor der Gefahr jedoch sehr wohl.¹³ Auf bemaute Straßen kommt es nicht auf die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des Wegehalters, vielmehr auf die objektive Zumutbarkeit der in Betracht zu ziehenden Maßnahmen an.¹⁴ Dies spannt den Bogen der Verantwortung bis zu den Verantwortlichen der Ressourcenbereitstellung.

In einigen Landesstraßengesetzen wird eine Regelung des Winterdienstes getroffen, in der etwa Zuständigkeiten oder die Möglichkeit des Entfalls des Winterdienstes festgelegt ist. So wird beispielsweise in §17 Abs.1 OÖ Landesstraßengesetz genau geregelt, welche Teile der Verkehrsflächen vom Land und welche von den Gemeinden zu betreuen sind. In Abs.3 wird den Gemeinden die Möglichkeit eingeräumt den Winterdienst auf untergeordneten Verkehrsflächen entfallen zu lassen, sofern darauf aufmerksam gemacht wird.

§ 17 OÖ Landesstraßengesetz, Winterdienst

(1) Der Winterdienst (Aufstellen von Schneezeichen und Schneezäunen, Schneeräumung und Streuung) auf den Verkehrsflächen des Landes (§8 Abs.1), ausgenommen auf den im Zuge von Landesstraßen gelegenen Radfahrstreifen, sofern sie nicht Teil der Fahrbahn sind, Gehsteigen, Gehwegen, Radwegen, Geh- und Radwegen, Querungshilfen und Haltestellenbuchten, obliegt dem Land. Der Winterdienst auf den Verkehrsflächen der Gemeinde (§8 Abs.2) sowie auf den im Zuge von Landesstraßen gelegenen Radfahrstreifen, sofern sie nicht Teil der Fahrbahn sind, Gehsteigen, Gehwegen, Radwegen, Geh- und Radwegen, Querungshilfen und Haltestellenbuchten, obliegt der Gemeinde, in deren Gebiet die Straßen liegen. Die Pflichten der Anrainer zur Schneeräumung und Streuung gemäß §93 Straßenverkehrsordnung 1960 bleiben davon unberührt. [...]

(3) Auf Radfahrwegen, Fußgängerwegen und Wanderwegen, die lediglich der Erschließung von Erholungsräumen für Wanderer dienen, sowie auf sonstigen Verkehrsflächen der Gemeinde von untergeordneter Bedeutung dann, wenn sie keine Ortschaftsteile verbinden und wenn bzw. soweit an ihnen keine bewohnten Gebäude liegen, kann der Winterdienst entfallen. Auf den Entfall ist jedoch von der Straßenverwaltung in geeigneter Weise aufmerksam zu machen.[...]

Eine Regelung zur Wintersperre findet sich auch im Niederösterreichischen Straßengesetz, die Land und Gemeinden im Vergleich zu anderen Bundesländern eine deutlich einfachere Möglichkeit bietet Straßen im Winter zu sperren. So kann der Winterdienst entfallen, wenn zumutbare Umleitungen vorhanden sind oder die Kosten für die Durchführung des Winterdienstes unverhältnismäßig hoch sind. Auch hier ist der Straßennutzer auf die Sperre wirksam aufmerksam zu machen.

§8 NÖ Straßengesetz, Wintersperre von Straßen

(1) Die Wintersperre ist der Entfall des Winterdienstes (Schneeräumung und Streuung) für eine Straße.

(2) Die Landesregierung darf für eine Landesstraße, der Bürgermeister für eine Gemeindestraße, die Wintersperre verfügen, wenn für diese Straße

- * kein Verkehrsbedürfnis (§4 Z.9) besteht oder eine Umleitung in zumutbarem Ausmaß besteht und
- * der Winterdienst unverhältnismäßige Kosten verursachen würde.

(3) Eine Verfügung nach Abs.2 ist durch deutlich sichtbare Tafeln mit der Aufschrift „Wintersperre, Betreten und Befahren auf eigene Gefahr“ jeweils am Beginn bzw. Ende der gesperrten Straße oder des Straßenteils ersichtlich zu machen.

Die Wintersperre ist für den Straßenhalter auch aus organisatorischer Sicht wichtig um die vorhandenen Ressourcen zweckmäßig einzusetzen. So kann bei Fahrzeugdefekten oder Krankheit eine Res-

¹²Vgl. EvBl 1979/61

¹³Vgl. ZVR 1983/83

¹⁴Vgl. RS0023925

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

sourcenknappheit durch die Sperre untergeordneter Straßen zum Teil ausgeglichen oder zumindest abgeschwächt werden.

3.2.2 Haftung auf bemaute Straßen

Das Haftungsprivileg der Wegehalterhaftung nach §1319a ABGB gilt für Wege, die ohne Entrichtung eines Nutzungsentgeltes benutzt werden können. Ist ein solches zu entrichten, so haftet der Wegehalter auf Grund des privatrechtlichen Benützungsvertrages bereits bei leichter Fahrlässigkeit, wie der OGH bereits in mehreren Entscheidungen dargelegt hat.¹⁵ Danach ist die ASFiNAG, wie andere Mautstraßenbetreiber, grundsätzlich verpflichtet im Rahmen des bereits erwähnten Zumutbaren für ausreichende Schneeräumung zu sorgen, um die Autobahn in einem verkehrssicheren Zustand zu erhalten.¹⁶

Entscheidungstext OGH 2Ob33/01v

Die zeitabhängige Maut (Vignettenmaut) gemäß §7 BStFG 1996 ist keine Abgabe sondern ein privatrechtliches Entgelt. Die Haftungseinschränkung auf grobe Fahrlässigkeit gemäß §1319a ABGB ist in diesem Fall nicht anwendbar.

Weiters kommt es zu einer Beweislastumkehr und der Wegehalter trägt die Beweislast im Sinne des §1298 ABGB. Damit hat der Schuldner zu beweisen, dass er die objektiv gebotene Sorgfalt eingehalten hat. Gelingt ihm dieser Beweis nicht, so steht ihm allenfalls noch der Beweis offen, dass ihm die Nichteinhaltung der objektiv gebotenen Sorgfalt subjektiv nicht vorwerfbar ist.¹⁷

§ 1298 ABGB, Beweislastumkehr

Wer vorgibt, daß er an der Erfüllung seiner vertragsmäßigen oder gesetzlichen Verbindlichkeit ohne sein Verschulden verhindert worden sey, dem liegt der Beweis ob. Soweit er auf Grund vertraglicher Vereinbarung nur für grobe Fahrlässigkeit haftet, muß er auch beweisen, daß es an dieser Voraussetzung fehlt.

Da einem privaten Straßennutzer kaum der Beweis gelingen wird, dass eine intensivere Winterdienstbetreuung dem Wegehalter zumutbar ist, diese jedoch nicht durchgeführt wurde, ist diese Beweislastumkehr von entscheidender Bedeutung. Hier wird dem Kläger der Nachweis von grober Fahrlässigkeit kaum gelingen. Durch die Beweislastumkehr muss jedoch der Straßenerhalter nachweisen, alle zumutbaren Maßnahmen durchgeführt zu haben, die zu einer Vermeidung des Schadens geführt hätten.

An dem in 2Ob133/00y veröffentlichten Urteil kann das Problem der Beweislastumkehr gut gezeigt werden. In erster Instanz wendete die ASFiNAG ein, es sei eine Streufahrt um 8 Uhr durchgeführt worden und der Grund des Unfalls um 11:40 Uhr liege in überhöhter Fahrgeschwindigkeit. In der Revision konnte die ASFiNAG jedoch nicht nachweisen, dass auch im Bereich der Ausfahrt gestreut wurde bzw. aus welchen Gründen die Streufahrt durchgeführt wurde, und wurde damit zur Leistung von Schadenersatz verurteilt.

3.2.3 Haftung bei fehlerhafter Organisation

Neben der Haftung bei der Durchführung des Winterdienstes haftet der Wegehalter auch wenn die Organisation bereits im Vorfeld unzureichend war. Wird durch unzureichende Organisation nicht dafür Sorge getragen, dass ein entsprechender Schneeräumungs- und Streudienst sichergestellt ist, so hat der Wegehalter als juristische Person für das Verschulden seiner leitenden Funktionäre zu haften.¹⁸ Um dies zu vermeiden, muss zumindest ein Einsatzplan vorliegen, durch den eine ordnungsgemäße Schneeräumung

¹⁵Vgl. 2Ob33/01v = SZ74/25 = ZVR 2001/53; 2Ob133/00y = ZVR 2001/90; RIS-Justiz RS0114743

¹⁶Vgl. 2Ob133/00y

¹⁷Vgl. 2Ob133/00y

¹⁸Vgl. 8Ob66/86

und Streuung mit geeigneten Fahrzeugen durchgeführt und auch überwacht werden kann. In diesem Einsatzplan ist zumindest ein Prioritätenkatalog vorzusehen, der Straßen nach deren Bedeutung reiht (etwa gemäß RVS 12.04.12) bzw. exponierte Stellen eine höhere Dringlichkeit zuweist.

Zusätzlich zur Durchführung von Maßnahmen sollte in einem Einsatzplan auch deren Kontrolle durch Mitarbeiter sowie die daraus folgende Dokumentation des Winterdienstes festgelegt sein. Eine Festlegung, dass während der Nachtstunden nicht geräumt oder gestreut wird, wie dies aus den Betreuungszeiträumen in RVS 12.04.12 abgelesen werden kann, scheint rechtlich gefährlich. So kann bei in Wetterprognosen angekündigtem nächtlichen Schneefall, der den Winterdienstdurchführenden aus den allgemein zugänglichen Wetterprognosen bekannt ist, ein grob fahrlässiges Verhalten bei Unterlassen der Schneeräumung und Streuung in der Nacht nicht ausgeschlossen werden. Die Einrichtung von Kontrollfahrten bzw. in solchen Fällen durchzuführenden Maßnahmen wie etwa notwendige Verständigungen müssen in dem Einsatzplan festgelegt werden. Dabei ist immer zu beachten, dass der öffentlichen Hand (Gemeinden, Ländern) generell mehr zumutbar ist als Privaten und größeren Gemeinden bzw. Ländern mehr als kleinen Gemeinden.¹⁹

3.2.4 Ausgewählte Gerichtsurteile

Die Haftungsbeschränkung des §1319a ABGB stellt die Frage nach grober oder leichter Fahrlässigkeit für Wegehalter mautfreier Straßen in vielen Fällen in den Vordergrund. Unter grober Fahrlässigkeit ist eine auffallende Sorglosigkeit zu verstehen, bei der die gebotene Sorgfalt nach den Umständen des Falles in ungewöhnlicher Weise verletzt wird und der Eintritt des Schadens nicht nur als möglich, sondern geradezu als wahrscheinlich vorauszusehen ist. Grobe Fahrlässigkeit ist daher erst dann gegeben, wenn ein objektiv schwerer Verstoß auch subjektiv schwer anzulasten ist.²⁰ Etwas einfacher lässt sich formulieren: Hätte der Fehler jedem passieren können, ist von keiner groben Fahrlässigkeit auszugehen, wäre der Fehler einem durchschnittlichen Mitarbeiter nicht passiert, ist von grober Fahrlässigkeit auszugehen. Im Folgenden sind einige ausjudizierte Beispiele zu leichter und grober Fahrlässigkeit angeführt. Folgende Fälle stellen *keine grobe Fahrlässigkeit* dar, wenn:

- die Aufstellung vorläufiger Warnzeichen bei Feststellung von Glatteisbildung unterbleibt, weil gleichzeitig die Ausfahrt des Streuwagens durch einen Meldefahrer veranlasst wurde (ZVR 1980/294)
- die Organe des Straßenhalters zwischen 17:00 Uhr und 20:30 Uhr insgesamt viermal eine bestimmte Gefahrenstelle befuhren und bei den letzten Fahrten auch streuten (2Ob98/82; ZVR 1983/316)
- ein Gemeindebediensteter den Ausfall des Streugerätes über eine Strecke von ca. 20 m nicht bemerkt (ÖRZ 1982/54)
- in einer Fußgängerzone nach ordnungsgemäßer Streuung in den Morgenstunden kurze Zeit später vereiste Stellen auftreten, die möglicherweise durch den Zubringerverkehr hervorgerufen werden (ZVR 1991/48)
- auf Grund der Wetterprognose das Wetter zwischen 03:30 Uhr und 4:00 Uhr beobachtet wird und ein Erkennen des aufkommenden Niederschlags zwar möglich, aber nicht wahrscheinlich ist („die Hälfte des Himmels“ bewölkt „die andere Hälfte“ sternenklar) und die nächste Kontrolle erst um 05:45 Uhr vorgesehen ist (2Ob21/05k)

In folgenden Fällen kann von *grober Fahrlässigkeit* gesprochen werden:

- Unterlassen der Aufstellung eines auf die Schleudergefahr hinweisenden Verkehrszeichens in einem hinsichtlich Eis und Nässe heiklen Bereich (ZVR 1966/96)

¹⁹Vgl. 2Ob191/97w

²⁰Vgl. 2Ob509/92

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

- Bediensteter richtet sich an ein Wandthermometer und veranlasst trotz Ankündigung von Minusgraden die Waschung einer Straße (ZVR 980/46; ZVR 1993/149)
- Eine Fremdenverkehrsgemeinde hat eine Vertiefung eines Kanaldeckels auf einem stark frequentierten Gehsteig im Ortskern trotz Kenntnis nicht beseitigt (ZVR 1980/230)
- Bei bestehender Schneeglätte wurde auf die Bestreuung der Straße vergessen (ZVR 1984/94)
- Ein Wintersportort lässt aufgrund eines schöneren Ortsbilds durch verschneite Straßen die Salzstreuung an einer kurvenreichen, abfallenden Straße entfallen und spricht keine Schneekettenpflicht aus (2Ob93/89; JBl 1990,181; ZVR 1990/15)

3.2.5 Rechtliche Absicherung des Wegehalters

Bei der Analyse der Rechtsurteile fällt rasch auf, dass bei folgenden Voraussetzungen eine Verpflichtung zum Schadenersatz äußerst unwahrscheinlich ist:

- vorhandener Einsatzplan
- durchgeführte Betreuung
- Dokumentation

Während bei kleinen Gemeinden im Allgemeinen ein einfacher Einsatzplan mit festgelegten Routen, Wetterprognosen aus Zeitung/Rundfunk und die handschriftliche Aufzeichnung, wann welche Route gefahren wurde, ausreicht, ist die Anforderung bzw. die Zumutbarkeit von Maßnahmen an größere Straßenhalter wie Länder deutlich höher. Die höchsten Anforderungen hat in dieser Hinsicht die ASFiNAG, welche durch die Mauteinnahmen bereits bei leichter Fahrlässigkeit haftet und die Beweislast trägt. In Folge sind es genau diese drei, für die Rechtssicherheit des Wegehalters entscheidenden, Punkte, die bei der Erstellung eines umfassenden Modells zum Winterdienst zu beachten sind. Der allgemeine Einsatzplan kann unter Beachtung der Straßenverhältnisse detailliert und nachvollziehbar auf Basis vorhandener Messwerte aus der Zustandserfassung erstellt werden.

3.2.6 Arbeitnehmerschutz und Lenkzeiten im Winterdienst

Generell sieht der Gesetzgeber Ruhepausen für den Arbeitnehmer vor. So ist etwa gemäß §11 AZG bei mehr als sechs Stunden Tagesarbeitszeit die Arbeitszeit durch eine Ruhepause von mindestens 30 Minuten zu unterbrechen und nach §12 AZG nach Beendigung der Tagesarbeitszeit eine ununterbrochene Ruhezeit von mindestens elf Stunden vorzusehen.

Zeitpunkt und Dauer von Winterdiensteinsätzen richten sich jedoch nach den Witterungsbedingungen und sind daher oft auch an Sonn- und Feiertagen bzw. während der Nacht notwendig. Dieser Umstand ist für das Winterdienstpersonal eine Belastung und kann in der Praxis bis zu 20 Arbeitsstunden am Tag bzw. 140 Stunden Wochendienstzeit ohne entsprechende Ruhepausen führen [53]. Dies ist gesetzlich dadurch möglich, dass Bedienstete einer Gebietskörperschaft vom Arbeitszeitgesetz ausgenommen sind. Eine Reduktion der Arbeitszeit kann aufgrund der Räum- und Streupflicht nur durch die Vergabe von Leistungen an Fremdfirmen geschehen und ist naturgemäß kaum länger als 3 bis 5 Tage im Voraus (Wetterprognose) zu planen.

§1 Arbeitszeitgesetz, Geltungsbereich

- (1) Die Bestimmungen dieses Bundesgesetzes gelten für die Beschäftigung von Arbeitnehmern (Lehrlingen), die das 18. Lebensjahr vollendet haben.
- (2) Ausgenommen vom Geltungsbereich dieses Bundesgesetzes sind: 1. Arbeitnehmer, die in einem Arbeitsverhältnis zu einer Gebietskörperschaft, zu einer Stiftung, zu einem Fonds oder zu einer An-

stalt stehen, sofern diese Einrichtungen von Organen einer Gebietskörperschaft oder von Personen verwaltet werden, die hierzu von Organen einer Gebietskörperschaft bestellt sind; [...]

Aufgrund der Durchführung der Winterdienstseinsätze mittels Kraftfahrzeugen mit mehr als 3,5 t zulässige Höchstmasse sind neben dem AZG zusätzlich die Bestimmungen zu Lenk- und Ruhezeiten gemäß der Verordnung EG 561/2006 zu beachten. Dort ist u. A. die maximale tägliche bzw. wöchentliche Lenkzeit von 9 Stunden bzw. 56 Stunden sowie eine Fahrtunterbrechung von mindestens 45 Minuten nach 4,5 Stunden Lenkzeit festgeschrieben. Da gerade bei lange anhaltenden starken Schneefällen eine derartige Unterbrechung nicht ohne deutliche Verschlechterung des Straßenzustandes möglich ist, gibt es für Schneeräumfahrzeuge eine diesbezügliche Ausnahme mit einem vollständigen Entfall der Lenkpausen.

§ 7 Lenker/innen-Ausnahmereverordnung, Schneeräumfahrzeuge

Abweichend von Art. 7 der Verordnung (EG) Nr. 561/2006 und §15 AZG kann bei Lenkerinnen und Lenkern an Tagen, an denen sie ausschließlich von Straßenbauämtern für den Winterdienst eingesetzt werden, die Lenkpause entfallen.

In der Planung von Winterdienstseinsätzen ist jedoch zu beachten, dass Arbeits- und Ruhezeiten von Bediensteten Dritter gemäß AZG eingehalten werden müssen. Eine Ausnahme besteht nur bei dem Entfall von Lenkpausen. Ebenso darf auf die Lenkpause nicht verzichtet werden, wenn etwa ein Frächter zuerst 4 Stunden in eigenem Interesse fährt und danach weitere 4 Stunden im Winterdienst. In diesem Fall ist jedenfalls nach 4,5 Stunden eine Lenkpause einzulegen.

3.2.7 Winterdienst und Umweltschutzgesetze

In dem seit 1997 geltenden Immissionschutzgesetz Luft sind u. A. Grenzwerte für Staubpartikel in der Luft festgesetzt, bei deren Überschreitung der Landeshauptmann bzw. Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, entsprechende Maßnahmen zur Vermeidung der Umweltbelastung anzuordnen hat.²¹ Typische, den Verkehr betreffende Maßnahmen sind dabei eine Reduktion der Höchstgeschwindigkeit auf Autobahnen oder ein Fahrverbot für Fahrzeuge mit überdurchschnittlich hohem Schadstoffausstoß.

Auswirkungen auf den Winterdienst hat etwa die Festlegung von Feinstaubsanierungsgebieten bei der Wahl möglicher abstumpfender Streumittel. So ist gemäß RVS 12.04.16 (2011) in Feinstaubsanierungsgebieten nur die Verwendung von besonders hochwertigem Streusplitt des Typs 1-S zulässig. Die Kosten für einen Hartsplitt dieser Güte liegen etwa 1 €/t über den Kosten für bisher übliche Streusplitt [53]. In einer fünf Gesteine umfassenden Studie im Auftrag der Stadt Wien (MA 48) erwies sich Basalt aufgrund seiner hohen Abriebfestigkeit als geeignetster Streusplitt [39]. Daraus ergibt sich auch in Hinblick auf ein flächendeckendes Modell die Frage, wo welche Streumittel eingesetzt werden sollen bzw. dürfen. Für die Planung von Winterdienststrouten ist dieser Aspekt auf jeden Fall zu beachten um spätere Probleme mit dem Umweltschutz bereits im Vorfeld zu vermeiden.

Bei der Verwendung von auftauenden Streumitteln (i. A. Natriumchlorid) bestehen besonders aufgrund der umweltschädigenden Wirkung Bedenken, die sich etwa in Form von Salzstreuverboten wiederfinden. So ist in Wien die Verwendung von NaCl nicht überall zulässig, wobei Ausnahmen hinsichtlich der Präventivstreuung vorgesehen sind.²² Besonderer Wert wird dabei auf den innerstädtischen Baumbestand gelegt, der zum Teil die Verwendung teurerer und weniger wirksamer chloridfreier Taumittel notwendig macht. Ein ebenfalls mit dem Waldsterben begründetes Salzstreuverbot in Niederösterreich wurde 2011 vom VwGH²³ mit dem Hinweis auf die erhöhte Verkehrssicherheit und die Priorisierung der Unfallvermeidung vor dem Schutz des Waldes wieder aufgehoben.

²¹ Vgl. §10 IG-L; BGB. I Nr. 115/1997

²² Vgl. §4f Wiener Winterdienst-Verordnung 2003

²³ Vgl. VwGH 2010/10/0092

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

In Wasserschutzgebieten ist die Belastung des Grundwassers mit Natrium bzw. Chlorid dann ein großes Problem, wenn die Mächtigkeit des Grundwasserstroms nicht ausreicht, um die anfallende Belastung ausreichend zu verdünnen. Die Grenzwerte für die Verwendung von Grundwasser als Trinkwasser sind dabei in der Trinkwasserverordnung Anhang I Teil C mit 200 mg/l für Chlorid und ebenfalls 200 mg/l für Natrium festgelegt. In Verbindung mit Grundwasserkennzahlen ist eine Modellierung der Streustrategien also insofern von Vorteil, um drohende Überschreitungen des Grenzwertes frühzeitig zu erkennen und rechtzeitig Gegenmaßnahmen ergreifen zu können.

3.3 Klimabedingungen in Österreich

Winterdienst, im Konkreten die Beseitigung von Schnee und Eis auf Straßen, ist mit den vorherrschenden Klimabedingungen untrennbar verbunden. In nördlichen Breiten, etwa Skandinavien mit dauerhaft tiefen Temperaturen, ist beim Winterdienst oft nur die mechanische Beseitigung des Schnees notwendig, da der kalte Schnee dauerhaft griffig bleibt. Zudem sind die Bewohner dieser Regionen mit winterlichen Straßenverhältnissen vertraut und die Gesetze bzw. Fahrzeugausstattung entsprechend angepasst. In südlicheren Gebieten mit nur selten auftretenden Schneefällen sind oft Straßennutzer oder auch Straßenbetreiber im Schnitt verhältnismäßig schlecht auf winterliche Verhältnisse vorbereitet. Dementsprechend kommt es in diesem Fall zu größeren akuten Problemen, die aber aufgrund der zumeist kurzen Dauer der Ereignisse rasch wieder lösbar werden.

In Mittel- oder Zentraleuropa ist der Winterdienst durch die regelmäßig auftretenden Schneefallergebnisse gut vorbereitet und die Straßennutzer sind entsprechend an winterliche Straßenverhältnisse gewohnt. Durch die Frost-Tau-Wechsel bleibt der Schnee jedoch nicht lange hart und griffig, sondern schmilzt teilweise und friert dann wieder mit deutlich glatterer Oberfläche beim Absinken der Temperaturen. Dadurch wird der Einsatz von Streumittel unumgänglich, um die Griffbarkeit zu erhöhen, bis Schnee oder Eis entweder durch Taumittel oder durch Sonneneinstrahlung bzw. Temperaturanstiege gänzlich von der Straße entfernt sind.

Schneefallintensität, Dauer eines Schneefallereignisses und die dabei herrschenden Temperaturverhältnisse sind jene Einflussgrößen, welche die Einsatzstrategie im Winterdienst grundlegend bestimmen. Für die Planung von Einsätzen hat das Wetter jedoch die unangenehme Eigenschaft, sich nicht beeinflussen zu lassen und lokal oft schwer prognostizierbar zu sein. In der Wasserwirtschaft wird dieser Umstand durch die Schaffung von statistisch bestimmten Bemessungsniederschlägen für das gesamte Bundesgebiet umgangen. Je nach Planungsaufgabe kann dabei auf verschiedene Niederschlagsdauern oder Auftretenswahrscheinlichkeiten (Jährlichkeiten) zurückgegriffen werden. Ein Beispiel für die Werte solcher Bemessungsniederschläge mit einem Netzraster von 6 mal 6 Kilometer ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Basis dafür sind Modellrechnungen, die eher zu hohe Werte liefern, und Messreihenauswertungen, die eher zu geringe Werte liefern, wodurch sich ein Bemessungsniederschlag zwischen diesen beiden Extremwerten ergibt.

3.3.1 Häufigkeit, Intensität und Verteilung von Schneefällen

Diese Bemessungsniederschläge beziehen sich auf maßgebende Niederschläge mit hoher Menge bzw. Intensität, die in der Regel in den Sommermonaten in Form von Starkregen stattfinden. Eine entsprechende Statistik für Schneefallintensitäten ist in den hydrographischen Jahrbüchern nicht vorgesehen. Was jedoch enthalten ist, ist die Anzahl der Tage mit einer Schneehöhe von 0 cm, 1 bis 14 cm, 15 bis 29 cm und weiteren Abstufungen bis ≥ 250 cm sowie Beginn und Ende der Schneeabdeckung und Dauer der längsten durchgehenden Schneedecke (Winterdecke). Über Intensität und Dauer der Schneefallereignisse kann auf Basis dieser, lange zurückreichend veröffentlichten Daten jedoch keine Aussage getroffen werden. Basierend auf dieser Datengrundlage ist eine Einteilung in Schneefallkategorien auf Basis der

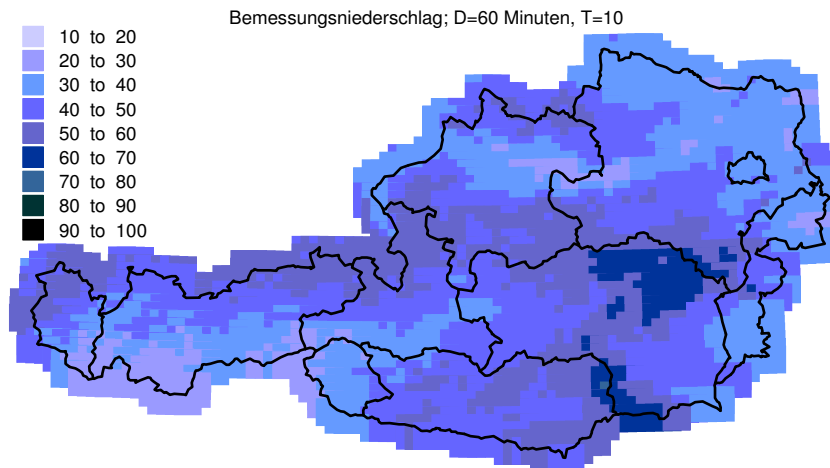
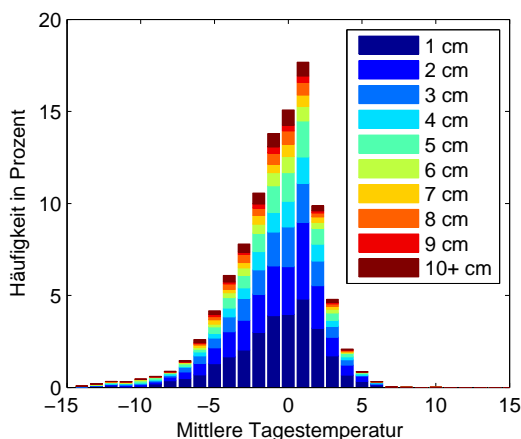


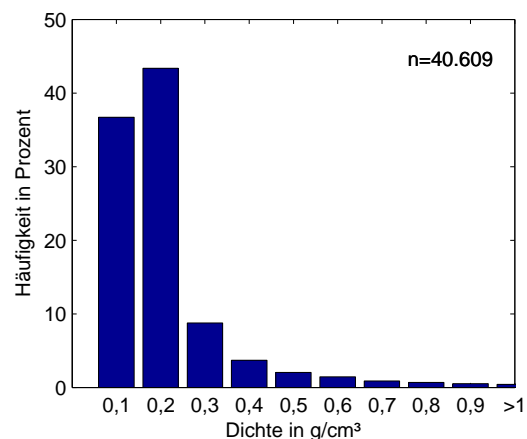
Abbildung 3.3: Bemessungsniederschlagswerte in mm für Österreich (Dauer 60 Minuten, Jährlichkeit 10 Jahre) Quelle: [12]

Häufigkeit der Dicke der Schneedecke, welche neben der Schneefallmenge auch die Temperaturverhältnisse abbildet.

Zielführender ist hier jedoch die Auswertung historischer Wetteraufzeichnungen, basierend auf einem österreichweiten Stationsnetz. Für den Straßenwinterdienst problematisch sind die Aufstellungsorte der Messstationen, die oft in unwegsamem Gelände, weitab größerer Straßen stehen und damit für den Winterdienst kaum relevante Daten liefern. Einen groben Überblick über die Verhältnisse in Österreich liefert die Betrachtung der durchschnittlichen täglichen Neuschneemenge bezogen auf die Temperatur in Abbildung 3.4a. Es zeigt sich sehr deutlich, dass die überwiegende Zahl an Schneefällen in einem Temperaturbereich von etwa -3°C bis $+1^{\circ}\text{C}$ vorkommt. Für den Winterdienst ist dies insofern ein Vorteil, als dass in diesem Temperaturbereich die Wirksamkeit von Tausalz noch sehr hoch ist. In höheren Lagen verschiebt sich die Verteilung in Richtung tieferer Temperaturen mit zusätzlich höheren durchschnittlichen täglichen Schneefallmengen.



(a) Häufigkeit von täglichen Schneefallmengen nach Temperatur in Österreich



(b) Durchschnittliche (tägliche) Dichte des Schnees bei Schneefallereignissen

Abbildung 3.4: Schneefallereignisse in Österreich (Datengrundlage: Nov.-März 2005-2010)

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

Aus Daten über die Niederschlagsmenge (in mm) und die Neuschneemenge (in cm) lassen sich auch Schlussfolgerungen über die Dichte des Schnees ziehen. In den Monaten November bis März der Jahre 2005 bis 2010 wurden an 283 in ganz Österreich verteilten Stationen 67.722 Tage mit Niederschlag (40,8 %) von insgesamt 165.958 Tagen an Messstationen gezählt. Davon waren wiederum 60 % Tage mit Neuschnee. Die Dichte des Schnees ist aus der in cm gemessenen Neuschneemenge und der in mm gemessenen Niederschlagsmenge je Tag berechenbar und in Abbildung 3.4b dargestellt. Der Mittelwert liegt bei $0,13 \text{ g/m}^3$, grob kann für jeden Millimeter Niederschlag also mit 10 mm bzw. 1 cm Schneedecke gerechnet werden. Dies gilt noch viel mehr, als der Median der Dichtedaten bei nur $0,07 \text{ g/m}^3$ liegt. Grund dafür sind starke Ausreißer, die auf den Median keine großen Auswirkungen haben.

Betrachtet man die Häufigkeit von täglichen Schneefallmengen nach Temperatur, getrennt nach verschiedenen Höhenlagen, ergibt sich die in Abbildung 3.5 dargestellte Verteilung. Der Temperaturbereich in dem es zu Schneefällen kommt vergrößert sich von etwa -2°C bis $+1^\circ\text{C}$ in tiefen Lagen bis 350 m.ü.NN. bis zu -6°C bis $+1^\circ\text{C}$ bei Höhen von 701 m ü. NN bis 1.500 m ü. NN. In höhergelegenen Gebieten sind auch Schneefälle bei bis zu -15°C noch in Abbildung 3.5c erkennbar.

Gleichzeitig mit der Verschiebung des Temperaturbereiches nimmt auch die tägliche Schneefallmenge mit zunehmender Höhe zu. Während bis 350 m ü. NN. Schneefälle mit 1 cm je Tag mit einem Anteil von 25,2 % noch häufig sind, nehmen diese mit der Höhe auf 20,8 % zwischen 701 m ü. NN bis 1.500 m ü. NN ab, während gleichzeitig die Häufigkeit von Schneefällen mit mehr als 10 cm von 13,9 % auf 18,6 % zunimmt.

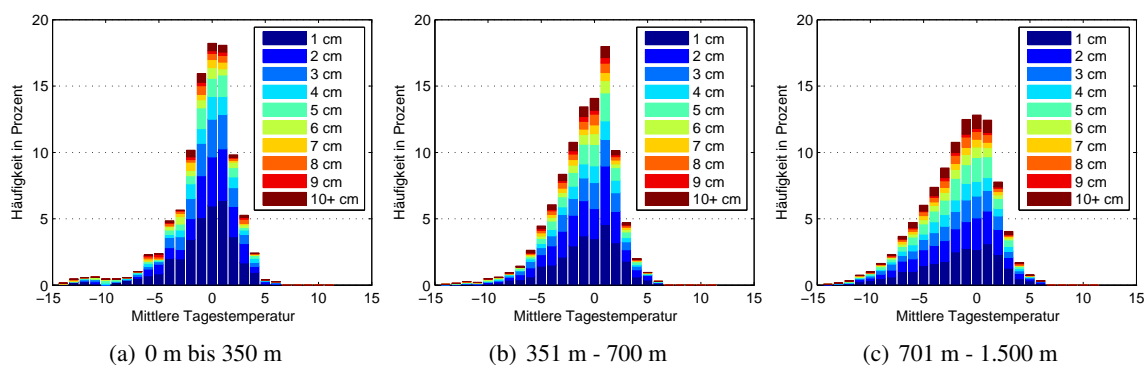


Abbildung 3.5: Schneefallereignisse nach Höhenlagen in Österreich (Datengrundlage: Nov.-März 2005-2010)

3.3.2 Mikroklima auf der Straße

Der Begriff *Mikroklima* soll hier als Beschreibung der Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnisse in Bereichen knapp über bzw. auf der Fahrbahnoberfläche in Bereichen von etwa 50 m Länge dienen. Für den Winterdienst ist dieser Bereich entscheidend, da bei unterschiedlichen Verhältnissen des Mikroklimas Schneefallmengen von beispielsweise 10 cm vollständig auf der Fahrbahn verbleiben oder innerhalb kurzer Zeit zur Gänze ohne Zutun des Straßenbetreibers schmelzen.

Um das Mikroklima auf der Straße in einem Modell abbilden zu können, ist insbesondere in Hinblick auf den Winterdienst die Oberflächentemperatur von enormer Wichtigkeit. Diese wird in den derzeitigen Modellen basierend auf der Berechnung der Strahlungsbilanz ermittelt. Unter Anwendung des Energieerhaltungssatzes wird ein Gleichgewicht zwischen eingebrachter Energie durch Sonneneinstrahlung, Reflexion an Wolken bzw. Böden, und Energieabsorption in verschiedenen Schichten der Atmosphäre bzw. der Erdoberfläche hergestellt. Dabei lassen sich, wie in Abbildung 3.6 zu erkennen ist, die Einflüsse kurzweiliger bzw. langweiliger Strahlung unterscheiden. Unter Berücksichtigung von Ausformung und Absorptionswerten einzelner Phänomene und Bedachtnahme von Parametern wie Bewölkung, Ver-

schattung (etwa durch Bäume oder Lärmschutzwände), Winkel der Sonneneinstrahlung u. Ä. kann so die Abkühlung bzw. Erwärmung der Erdoberfläche ermittelt werden. Dies bedingt die Kenntnis dieser Parameter, um aus einer Prognose atmosphärischer Wetterdaten auch die Oberflächentemperatur prognostizieren zu können. Für verschiedene Arten von Fahrbahnbelägen kann der Albedo als Maß für das Reflexionsverhalten der Oberfläche etwa in [67] gefunden werden.

Um die Strahlungsbilanz etwas besser beschreiben zu können, wurde in Abbildung 3.6 versucht eine grafische Darstellung zu schaffen, welche den komplexen Vorgang schemenhaft abzubilden vermag. Dabei wurde die zwischen dem Weltraum und der Erde ausgetauschte Strahlung in eintreffende kurzwellige und ausgehende langwellige Strahlung und Wärmeströmung geteilt. Aus den Unterschieden der Wellenlänge ergeben sich Unterschiede bei den Effekten, welche in der Erdatmosphäre auftreten.

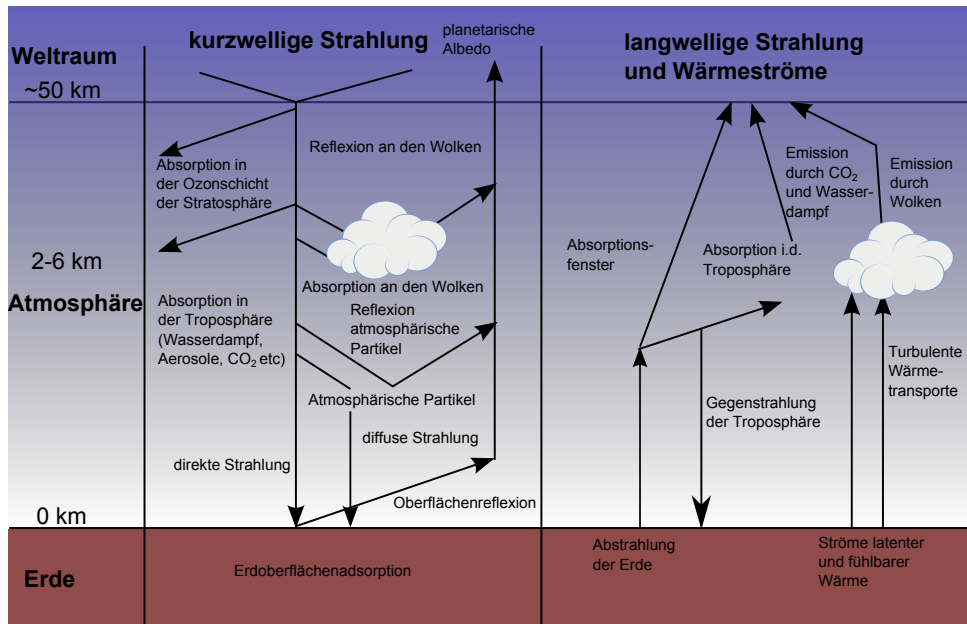


Abbildung 3.6: Energiehaushalt der Straßenoberfläche

Aus dem Weltraum, vorrangig von der Sonne, eintreffende Strahlung wird zum Teil bereits in der Ozonschicht bzw. Stratosphäre absorbiert und an Wolken reflektiert. Im weiteren Verlauf geschieht eine weitere Absorption in der Troposphäre durch Wasserdampf, Aerosole oder CO_2 . Atmosphärische Partikel sorgen für eine teilweise Reflexion bzw. diffuse Strahlung, die an der Erdoberfläche auftrifft und dort von dieser teilweise absorbiert wird, womit eine Temperaturerhöhung einhergeht. In welchem Ausmaß die Strahlung absorbiert wird, hängt vom Albedo, dem Rückstrahlwert ab, der zwischen 0 (totale Absorption) und 1 (totale Reflexion) liegt.

Die Erdoberfläche selbst strahlt in gewissem Ausmaß Wärme bzw. langwellige Strahlung ab. Diese wird durch ähnliche Vorgänge wie schon beim Eintreffen der Strahlung absorbiert bzw. reflektiert. Der Bewölkungsgrad spielt in diesem Fall eine besonders hohe Rolle, da eine dicke Wolkendecke viel Wärmestrahlung reflektiert und so ein starkes Abkühlen verhindert. Klare Nächte ohne eine solche Wolkendecke führen in der Regel zu einem stärkeren Abfall der Temperatur während des Verlaufes der Nacht.

In dieser Arbeit sei nur der generelle Aufbau der Strahlungsbilanzrechnung Gegenstand der Betrachtungen, da bereits einige gut ausgearbeitete Konzepte wie etwa METRo, FASST oder SNThERM dazu publiziert wurden.²⁴ Die Formeln 3.1 bis 3.3 sollen hier nur den allgemeinen Zusammenhang andeuten und auf die wichtigsten Parameter hinweisen. Speziell im Winter ist durch die niedrig stehende Sonne und den kurzen Zeitraum mit Tageslicht der Einfluss von Verschattungen stark ausgeprägt.

²⁴Ein Überblick und Vergleich dieser Systeme findet sich etwa in [50].

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

$$Q_k = G - R = D + H - R = (1 - \alpha) * G \quad (3.1)$$

$$Q_l = A_E = A_O - A_G \quad (3.2)$$

$$Q = Q_k - Q_l = G - R - A_E \quad (3.3)$$

Es bedeuten:

- Q_k - kurzweilige Strahlungsbilanz [kWh/m²]
- G - Globalstrahlung [kWh/m²]
- D - direkte Strahlung [kWh/m²]
- H - diffuse Strahlung (Himmelsstrahlung) [kWh/m²]
- R - Reflexstrahlung [kWh/m²]
- α - Albedo [-]
- Q_l - langweilige Strahlungsbilanz [kWh/m²]
- A_E - effektive Ausstrahlung [kWh/m²]
- A_O - Ausstrahlung der Oberfläche [kWh/m²]
- A_G - Gegenstrahlung [kWh/m²]

Zur Prognose der Fahrbahntemperatur sind in [50] mehrere Modelle (METRO, FASST und SNTHERM) verglichen worden (siehe Abbildung 3.7), mit dem Ergebnis, dass die Software METRO die besten Vorhersagen trifft. Alle Modelle basieren dabei auf den hier vorgestellten Grundlagen, beziehen jedoch unterschiedliche Parameter ein.

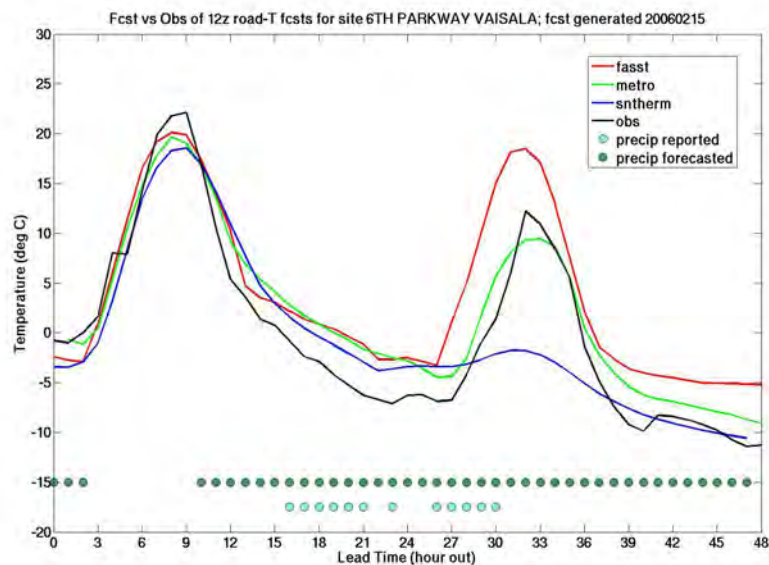


Abbildung 3.7: Vergleich verschiedener Prognosemodelle der Fahrbahntemperatur (Quelle: [50])

3.3.3 Qualität ausgewählter Wetterprognosen

Der zum Teil große Unterschied in benachbarten Mikroklimazonen spiegelt sich auch in vielen speziell für den Winterdienst erstellten *Wetterprognosen* wieder. Hierbei werden basierend auf den Erfahrungen der Straßenbetreiber und Meteorologen spezielle Prognosegebiete festgelegt, für welche separate Prognosen angefertigt werden. Wie bei anderen Spezialwetterprognosen wie etwa für Unwetterwarnungen, Steuerung von Wasserkraftwerken etc. auch ist dabei die Qualität der Prognose für den Erfolg der getroffenen Maßnahmen entscheidend. Um diese Qualität von Wetterprognosen zu beurteilen, wurden im Projekt WinterFIT mit der ASFiNAG und der ZAMG ausgewählte Spezialprognosen für den Straßenwinterdienst untersucht, welche gegenüber gewöhnlichen Prognosen an die Anforderungen des Winterdienstes angepasst sind. [58]

Wesentliche Parameter sind Zuverlässigkeit der Prognosewerte, Zeitintervall der Prognoseschritte sowie räumliche Auflösung. Zudem erfolgt eine Unterscheidung der Prognosen nach Einsatzgebiet für Personalplanung (3-Tagesprognose), Einsatzplanung (3 bis 5 h im Voraus) und Echtzeitmodellierung (Stromungen). Die Auswertung der Daten erfolgte aufgrund der enormen Datenmenge teilautomatisiert und erforderte daher eine gut strukturierte Datenbank, um Auswertungen rasch durchführen zu können. Da die Daten in unterschiedlicher Dichte und Auflösung vorlagen, wurden räumliche Straßenabschnittslängen von 50 m und eine zeitliche Auflösung von 10 Minuten als kleinste Einheiten gewählt. Datensätze in kleineren Zeit- bzw. Längeneinheiten wurden gemittelt bzw. bei größeren Zeit- und Längeneinheiten entsprechend interpoliert bzw. für den Einflussbereich der jeweiligen Messeinrichtung (z. B. Verkehr) festgelegt.

Die Überprüfung der Luft- und Fahrbahntemperatur erfolgte anhand einer Gegenüberstellung der Prognosewerte mit den Messwerten der verbauten Sensoren auf der Teststrecke der A2 im Abschnitt Pack. In Hinblick auf eine repräsentative Abbildung der Temperaturverhältnisse auf der betrachteten Strecke ist zu beachten, dass es naturgemäß kleinräumig messbare Schwankungen der Temperatur geben kann, die mit einem Wetterprognosemodell geringerer Auflösung naturgemäß nicht erfassbar sind. Insgesamt geht es daher um die Qualität der Prognosen in Hinblick auf eine repräsentative Temperaturverteilung sowie um die Aufdeckung möglicher systematischer Abweichungen.

Für die Überprüfung der Niederschlagsprognosen wurde in dem Versuchsgebiet eine unabhängige Wetterstation durch die TU Wien eingerichtet. Die prognostizierten und gemessenen Niederschlagswerte wurden in eine Datenbank eingespielt und von der TU Wien unabhängig von den Wetteranbietern ausgewertet. Ziel der Auswertung war es, die Abweichungen zwischen kalibrierten Messwerten und Prognosedaten darzustellen, um daraus deren Eignung und Zuverlässigkeit für den Winterdienst beurteilen zu können.

Vergleich Lufttemperatur

Die ausgewerteten Daten der Lufttemperatur umfassen den Zeitraum vom 01.12.2012 bis 15.04.2013 und werden nachstehend beispielhaft vorgestellt. Die Auswertung der Lufttemperatur basiert auf der Gegenüberstellung der tatsächlichen bzw. gefilterten Sensormesswerte und den 2-h-Prognosen der Wetteranbieter für den jeweils gleichen Zeitpunkt. Sofern keine Aktualisierung der Prognosen erfolgte, wurden die entsprechenden älteren Werte in der Auswertung verwendet. Abbildung 3.8 gibt einen Überblick über den Verlauf der Lufttemperatur auf der A2 im Bereich des Sensors #9 am 13.03.2013.

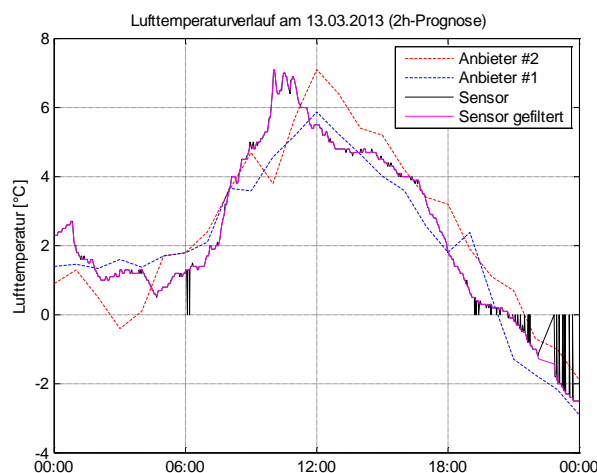


Abbildung 3.8: Bsp. Ergebnisse der tatsächlich gemessenen Lufttemperatur (Sensor #9) und 2h Prognosen auf der A2 am 13.03.2013. Quelle: [33]

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

Die Abbildung zeigt die Notwendigkeit der Filterung der Sensormessdaten, um allfällige Fehlinterpretationen von Fehlmessungen mit einem Rücksetzwert auf 0°C vermeiden zu können. Dazu wurden alle Messungen mit dem exakten Wert 0, welcher unglücklicherweise auch dem Fehlwert entspricht, gelöscht und durch einen zwischen den beiden benachbarten Werten interpolierten Wert ersetzt. Die gemessene Lufttemperatur sinkt demnach von +2°C auf +1°C zwischen 02:00 Uhr und 06:00 Uhr ab und erreicht gegen 11:00 Uhr ein Maximum mit +7°C, um kontinuierlich bis 24:00 Uhr auf -2,5°C abzusinken.

Trotz der starken Temperaturschwankungen geben die Prognosewerte der beiden Anbieter die Temperaturentwicklung zeitlich gut wieder. Die Höchstwerte der Tagestemperatur treten schon um 11:00 Uhr ein, wurden aber einheitlich für 12:00 Uhr in ähnlicher Größenordnung vorhergesagt. Der für den Winterdienst kritische Nulldurchgang wird im angeführten Beispiel auf eine halbe Stunde genau prognostiziert. Um momentane Schwankungen auszugleichen, werden in der Folge die gemittelten Stundenwerte von Messungen und Prognose in Hinblick auf ihre absoluten Abweichungen betrachtet. Abbildung 3.9 zeigt, dass die Mehrzahl der Temperaturabweichungen der Stundenwerte am 13.03.2013 kleiner als $\pm 1^\circ\text{C}$ ist, aber in Einzelfällen durchaus um $\pm 2^\circ\text{C}$ und mehr abweichen kann.

Bei der Gegenüberstellung der prognostizierten Lufttemperatur mit den Messwerten von allen Sensoren am 13.03.2013 zeigt sich, dass es an allen Sensoren zu Fehlmessungen mit Rücksetzung auf den Wert 0°C kommt. Im ungünstigsten Fall am Messtag kommt dies zusätzlich im annähernd gleichen Zeitfenster in den Abendstunden vor, wodurch eine Fehlinterpretation ohne entsprechende Filterung nicht zuverlässig ausgeschlossen werden kann.

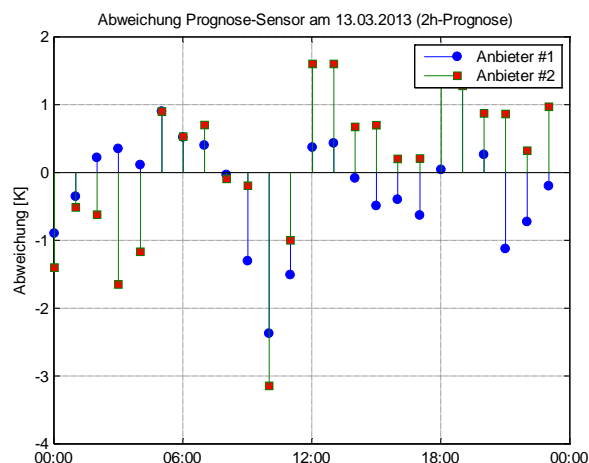


Abbildung 3.9: Beispielhafte Abweichung der Ergebnisse der tatsächlich gemessenen Lufttemperatur (Sensor #9) und 2-h-Prognosen auf der A2 am 13.03.2013. Quelle: [33]

Die Ergebnisse der Sensormesswerte #9, #11, #12, #14, #15, #17, #19 und #20 zeigen einen nahezu identen Verlauf der Lufttemperatur am 13.03.2013 mit weitgehend konstanten Abweichungen von $\pm 0,5^\circ\text{C}$ bis $\pm 1^\circ\text{C}$. Da die relativen Abweichungen im Verhältnis zur Genauigkeit der Sensormessungen vergleichsweise groß sind, kann die Entwicklung der Lufttemperatur mit hoher Zuverlässigkeit aus den Ergebnissen mehrerer Sensormessungen vor Ort abgeleitet werden. Die konstanten Abweichungen der Sensormesswerte untereinander sind aus der lokalen Situierung der Sensoren bzw. der jeweiligen Exposition und gegebenenfalls durch systematische Abweichungen nicht ausreichend kalibrierter Sensoren erklärbar.

Die 1-h-Mittelwerte der Prognosen im Bereich der Sensoren zeigen im Vergleich zu den Sensorwerten vergleichsweise hohe Abweichungen in beide Richtungen mit einer leichten Tendenz zu tiefen Temperaturen an. Die typischen Abweichungen übersteigen dabei regelmäßig eine Bandbreite von $\pm 1^\circ\text{C}$ und können Werte von $\pm 3^\circ\text{C}$ in Einzelfällen erreichen. Die präsentierten Ergebnisse eines Wintertages erlauben naturgemäß keine statistisch validen Aussagen zur Prognosequalität der einzelnen Anbieter, sondern dienen vielmehr der Veranschaulichung der vorgenommenen Auswertungen im Winter 2012/2013.

Für die Frage nach der Zuverlässigkeit der prognostizierten Lufttemperatur im Verhältnis zur tatsächlich gemessenen Temperatur ist eine systematische Analyse der auftretenden Einzelabweichungen zum jeweiligen Zeitpunkt über die gesamte Messperiode von Interesse. Die Einzelabweichungen sind vor allem für die Zuverlässigkeit der einzelnen konkreten Entscheidungen im Winterdienst wesentlich. Für den Vergleich der Qualität von Wetterprognosen ist hingegen die mittlere Gesamtabweichung bzw. der mittlere Prognosefehler eine geeignete Kennzahl, da einzelne Abweichungen zufälliger Natur sind und entsprechend streuen. Bilden die Prognosen das Wettergeschehen adäquat ab, so muss der Median der Abweichungen annähernd bei Null liegen, da Abweichungen in beide Richtungen gleich wahrscheinlich sind. Eine Abweichung des Median in eine Richtung deutet dagegen auf einen systematischen Fehler im Prognosemodell hin.

Um die Qualität der Prognosen zur Lufttemperatur im Pilotgebiet besser abschätzen zu können, ohne lokale Unterschiede zu hoch zu bewerten, wurden die Abweichungen der Prognosen zu allen Sensormesswerten eines Tages analysiert. Abbildung 3.10 zeigt diese Abweichungen für die Prognosen von Anbieter #1 und Anbieter #2 für alle Märztagte 2013. Der Median der Prognosewerte für Anbieter #1 liegt an allen Tagen innerhalb einer Bandbreite von $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ oder besser, wobei 50 % der prognostizierten Stundenwerte (Box) beinahe ohne Ausnahmen Abweichung von weniger als $\pm 1^{\circ}\text{C}$ aufweisen. Der Median der Prognosewerte von Anbieter #2 weist deutlich größere Abweichungen bis zu $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ auf und zeigt am 21.03.2013 einen um -2°C zu tiefen Wert. Aus dem Vergleich der Länge der Interquartilsdistanzen zeigt sich ebenfalls die deutlich größere Abweichung der Prognosen von den tatsächlichen Messwerten.

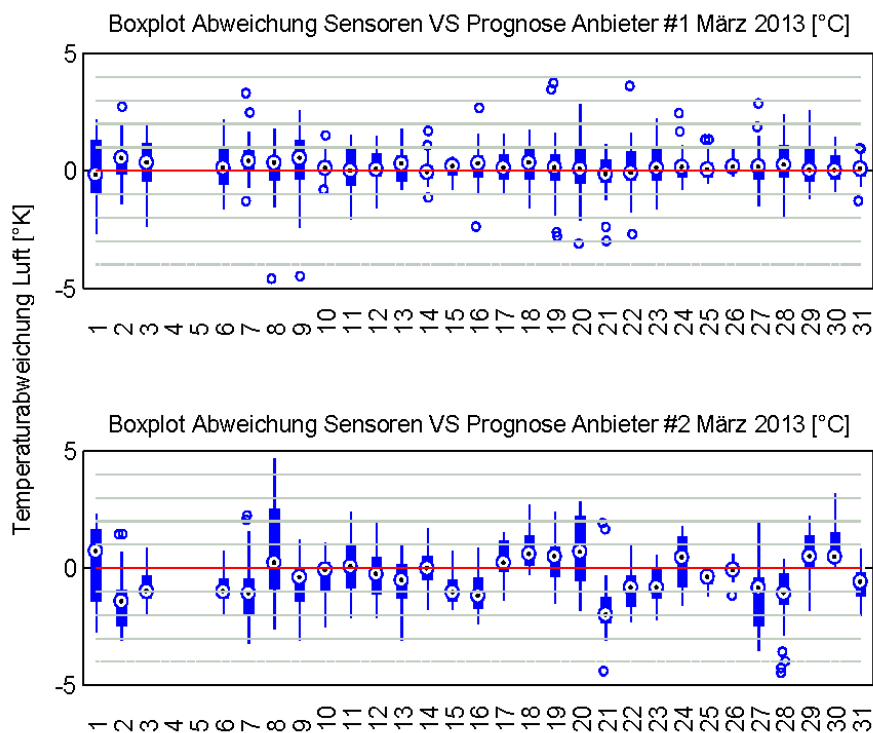


Abbildung 3.10: Boxplot Abweichung der Lufttemperatur von allen Sensormessungen je Tag und den zugehörigen 2-h-Prognosen vom 01. bis 31.03.2013. Quelle: [33]

Die Gesamtauswertung der Abweichungen in Abbildung 3.11 zeigt, dass es im Wesentlichen keine systematischen Fehler in den Prognosen der Lufttemperatur gibt. In Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Prognosen sind die Abweichungen bei Anbieter #1 deutlich geringer als bei Anbieter #2. Zur Verdeutlichung des Unterschieds werden die Abweichungen in Abbildung 3.12 in Form eines Histogramms dargestellt und durch eine Normalverteilung angenähert. Je breiter die Streuung, umso weniger treffsi-

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

cher sind die Prognosen. Mit einer Standardabweichung von $\pm 0,93^\circ\text{C}$ weist Anbieter #1 deutlich treffsicherere Prognosen auf als Anbieter #2 mit $\pm 1,75^\circ\text{C}$. Praktisch bedeutet das, dass man sich zu 68,8 % sicher sein kann, dass die tatsächliche Lufttemperatur innerhalb einer bzw. zu 95 % innerhalb von zwei Standardabweichungen ($\pm 1,86^\circ\text{C}$ bzw. $\pm 3,5^\circ\text{C}$) liegt.

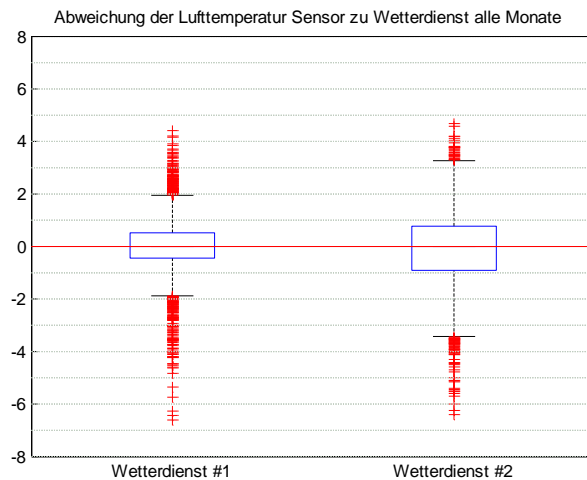


Abbildung 3.11: Boxplot Gesamtabweichung der Lufttemperatur aus allen Sensormessungen von den Ergebnissen der 2 h Prognosen im gesamten Messzeitraum. Quelle: [33]

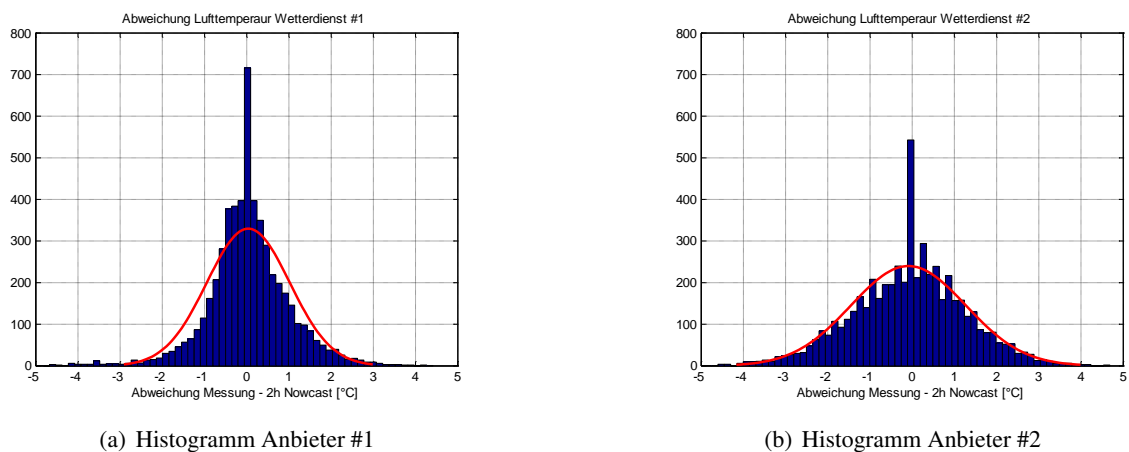


Abbildung 3.12: Histogramm und gefittete Normalverteilung zur Gesamtabweichung der Lufttemperatur aus allen Sensormessungen von den Ergebnissen der 2-h-Prognosen im Monat März 2013. Quelle: [33]

Die Prognosen der Lufttemperatur sind eine wichtige Information für den Winterdienst als Vorbereitung auf mögliche Einsatzszenarien. Die Prognosen von Anbieter #1 berücksichtigen im Gegensatz zu Anbieter #2 die Sensordaten der ASFiNAG in Ergänzung zu den, beiden Anbietern zur Verfügung stehenden Daten der Wetterstationen in Österreich. Zusätzlich werden die Prognosen von Anbieter #1 deutlich häufiger aktualisiert. Die sich ergebenden Differenzen sind daher nur begrenzt ein Hinweis auf die Qualität der Prognosemodelle, sondern eben auch wesentlich auf die Unterschiede in der Aktualisierung, der Dichte der Messstationen und die höhere Auflösung des Modells von Anbieter #1 zurückzuführen.

Unter Berücksichtigung dieser Umstände können die Ergebnisse aus dem Vergleich zwischen Lufttemperaturprognosen und Sensormessungen wie folgt zusammengefasst werden. Die Mehrzahl der Abweichungen der stündlichen Lufttemperaturprognosen ist kleiner als 1°C , größere Abweichungen in beide Richtungen kommen jedoch vor. Die Prognosemodelle beider Anbieter weisen keine systematische Ab-

weichung in eine Richtung auf und sind somit methodisch in Ordnung. Insgesamt sind die Prognosen der Lufttemperatur eine gute Orientierungshilfe, weisen jedoch noch Unschärfen auf.

Qualität Fahrbahntemperatur

Die Daten der Fahrbahntemperatur umfassen ebenfalls den Zeitraum vom 01.12.2012 bis 15.04.2013 und werden nachstehend beispielhaft vorgestellt. In der Auswertung werden die Temperaturwerte der tatsächlichen Sensormesswerte der Fahrbahn den 2-h-Prognosen der Wetteranbieter gegenübergestellt. Wie bereits bei den Messungen der Lufttemperatur wurden hier die Fehlwerte (Wert exakt 0) durch Interpolationswerte der Nachbarn ersetzt. Abbildung 3.13 zeigt den Verlauf der Fahrbahntemperatur auf der A2 im Bereich des Sensors #9 am 13.03.2013. Um Fehlinterpretationen von Messfehlern mit einem Rücksetzwert auf 0°C vermeiden zu können, wird auch hier eine entsprechende Filterung durchgeführt. Die gemessene Fahrbahntemperatur sinkt demnach von $+4^{\circ}\text{C}$ auf $+3^{\circ}\text{C}$ zwischen 04:30 Uhr und 05:30 Uhr ab und erreicht gegen 11:00 Uhr ein Maximum mit $+14^{\circ}\text{C}$, um kontinuierlich bis 24:00 Uhr auf $-0,5^{\circ}\text{C}$ abzusinken.

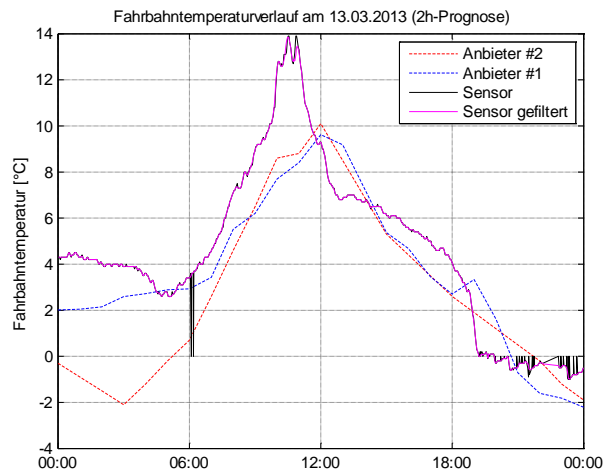


Abbildung 3.13: Beispielhafte Ergebnisse der tatsächlich gemessenen Fahrbahntemperatur (Sensor #9) und 2-h-Prognosen auf der A2 am 13.03.2013. Quelle: [33]

Die Prognosewerte der beiden Anbieter geben die Grundtendenz der Temperaturentwicklung bei Sensor #9 wieder, wobei der Zeitpunkt von Höchst- und Tiefstwerten deutlich von den Messwerten abweicht. Der für den Winterdienst kritische Nulldurchgang erfolgt tatsächlich gegen 19:00 Uhr und wird in den Prognosen erst um 21:00 Uhr bzw. 22:00 Uhr vorhergesagt. Die Prognosen von Anbieter #2 weisen im angeführten Beispiel beträchtliche Abweichungen zu Tageshöchst- und tiefstwerten von bis zu 6 K aus und sind bei Anbieter #1 zwar im Schnitt deutlich geringer, aber immer noch erheblich. Werden die Abweichungen der Prognosen auf Basis der mittleren Stundenwerte gemäß Abbildung 3.14 näher analysiert, zeigen sich die erheblichen Abweichungen in beide Richtungen mit deutlicher Tendenz zur Angabe tieferer Temperaturen in der Prognose.

Die Entwicklung der gemessenen Fahrbahntemperaturen zeigt wie bei der Lufttemperatur eine hohe Übereinstimmung im zeitlichen Verlauf mit lediglich geringen Abweichungen aufgrund der lokalen Verhältnisse bzw. Messunsicherheiten. Der charakteristische Verlauf der Fahrbahntemperatur im Untersuchungsgebiet ist somit zuverlässig aus den Ergebnissen der Sensormessungen ablesbar.

Die bereits vorher festgestellten Abweichungen der Prognosen zeigen sich einheitlich bei allen Messstellen, wobei eine systematische Tendenz zur Angabe tieferer Temperaturen besteht. Mit regelmäßigen Abweichungen von bis zu -6°C von den tatsächlich gemessenen Werten bei Anbieter #2 bzw. -5°C bei Anbieter #1 erscheint eine Verwendung im Winterdienst als problematisch (Abbildung 3.15). Eine Verbesserung scheint hier nur möglich, wenn der Berechnungsansatz zur Prognose der Fahrbahntemperatur

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

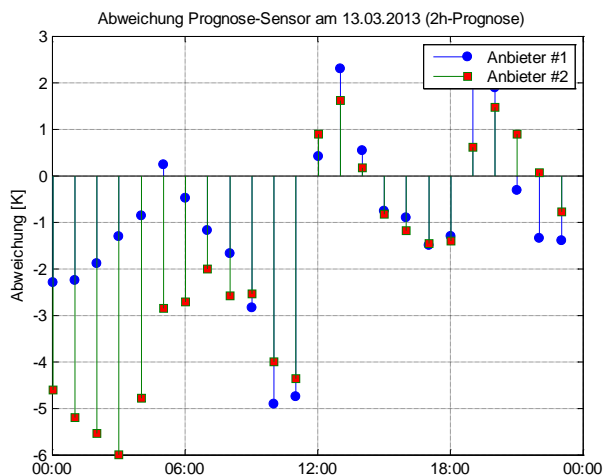


Abbildung 3.14: Abweichung der tatsächlich gemessenen Fahrbahntemperatur (Sensor #9) und 2-h-Prognosen für gemittelte Stundenwerte auf der A2 am 13.03.2013. Quelle: [33]

deutlich verbessert wird und die Intervalle zur Kalibration mit tatsächlichen Messwerten auf maximal 2 bis 3 Stunden verkürzt werden.

Gemäß dem Winterdienstmodell ist die Temperatur der Straßenoberfläche von wesentlicher Bedeutung für die Wahl der richtigen Streumenge. Wettersituationen wie Reifbildung oder gefrierender Nebel erfordern keinen unmittelbaren Eingriff, sofern eine präventive Streuung bereits erfolgt ist. Die Entscheidungen über solche präventive Einsätze basieren vielfach auf Daten von Glättemeldeanlagen bzw. generell der Straßenoberflächentemperatur. Da solche Sensoren ausschließlich Messungen aus der Vergangenheit abbilden, kann dies für einen rechtzeitigen Einsatz bzw. eine optimale Einsatzentscheidung bereits zu spät sein. Daher haben möglichst exakten Prognosen der Straßenoberflächentemperatur eine hohe Bedeutung. Wie bereits dargelegt, sind die Abweichungen im Einzelfall maßgebend für die konkrete Einsatzplanung bzw. den einzelnen Winterdienstesinsatz während die mittlere Abweichung ein gutes Maß für die Qualität der Prognosen insgesamt ist.

Abbildung 3.15 gibt einen Überblick über die Abweichungen der Prognosen der Fahrbahntemperatur im Verhältnis zu den Messwerten der beiden Anbieter. Der Median von Anbieter #1 liegt systematisch um etwa $0,5^{\circ}\text{C}$ bis $1,5^{\circ}\text{C}$ unter der tatsächlich gemessenen Temperatur. Die Bandbreite der Abweichungen (50%-Box) ist je nach Tag unterschiedlich und bewegt sich in etwa von $\pm 0,5$ K bis ± 3 K. Der Median von Anbieter #2 zeigt noch deutlich größere Abweichungen und bewegt sich in einer Bandbreite von 0 K bis 5 K unter den tatsächlich gemessenen Werten. Die Bandbreite der Abweichungen von Anbieter #2 liegt noch etwas über der von Anbieter #1. Insgesamt sind die regelmäßig auftretenden Abweichungen der Prognosewerte in Relation zu den tatsächlich gemessenen Temperaturen der Fahrbahnoberfläche für einen effizienten Winterdienst problematisch, wobei die Prognosen von Anbieter #1 deutlich besser als die von Anbieter #2 zu bewerten sind.

In Abbildung 3.16 sind die Abweichungen von Prognosen und Messwerten der Fahrbahntemperatur aller Sensoren für den Monat März 2013 in einem Boxplot zusammengefasst. Der Median der Prognosen von Anbieter #1 liegt mit einer systematischen Abweichung von $-1,0^{\circ}\text{C}$ sowie geringerer Streuung der Prognosewerte deutlich besser als die Ergebnisse von Anbieter #2 mit einer systematischen Abweichung des Median um $-2,5^{\circ}\text{C}$. Noch deutlicher kommen diese Unterschiede im Histogramm bzw. der Häufigkeitsverteilung in Abbildung 3.16 hervor. Anbieter #1 ist mit einem Mittelwert von $-1,36^{\circ}\text{C}$ und einer Standardabweichung von $\pm 2,01^{\circ}\text{C}$ deutlich exakter als Anbieter #2 mit einem Mittelwert von $-3,01^{\circ}\text{C}$ und einer Standardabweichung von $\pm 2,91$ K. Eine Verbesserung der verwendeten Prognosemodelle sowie laufende Kalibrierung auf Basis von Sensormessungen und Temperaturprofilen ist als Voraussetzung für einen effizienten Winterdienst dringend zu empfehlen.

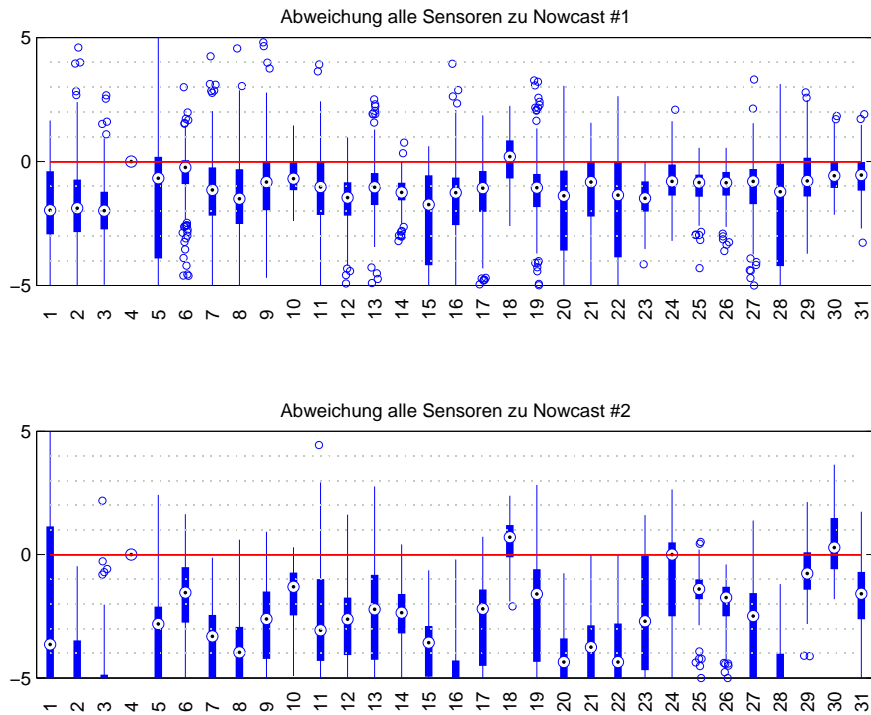


Abbildung 3.15: Boxplot der Abweichung der Fahrbahntemperatur von allen Sensormessungen je Tag und den zugehörigen 2-h-Prognosen vom 01. bis 31.03.2013. Quelle: [33]

Die Prognosen der Fahrbahntemperatur sind gemeinsam mit den Niederschlagsprognosen die wichtigste Information für den Winterdienst sowie die konkrete Einsatzplanung und Streumitteldosierung. Unter Berücksichtigung dieser Umstände können die Ergebnisse aus dem Vergleich zwischen Fahrbahntemperaturprognosen und Sensormessungen wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Mehrzahl der stündlichen Abweichungen ist größer als $\pm 1,0$ K und damit sehr unsicher. Größere Abweichungen in beide Richtungen bis $\pm 5,0$ K kommen vor.
- Die Prognosemodelle beider Anbieter weisen eine systematische Abweichung in Richtung tieferer Temperaturen auf und sind damit methodisch zu hinterfragen
- Anbieter #1 weist eine systematische Abweichung des Mittelwerts von $-1,36^\circ\text{C}$ und eine Standardabweichung von $\pm 2,01$ K auf
- Anbieter #2 weist eine größere systematische Abweichung des Mittelwerts von $-3,01^\circ\text{C}$ und eine Standardabweichung von $\pm 2,91$ K auf
- Neben einer möglichst genauen Prognose ist auch die Angabe von Unsicherheiten bei entsprechender Schulung des Personals erfolgversprechend
- Die Prognosen des Anbieters #1 sind zwar deutlich zuverlässiger als die aus den errechneten Sondenwerten #2. Für die Praxis ist derzeit eine Orientierung an Fahrbahntempersensoren zu empfehlen.

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

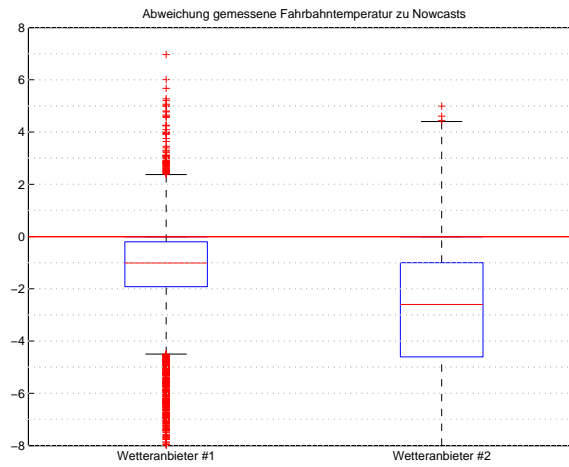
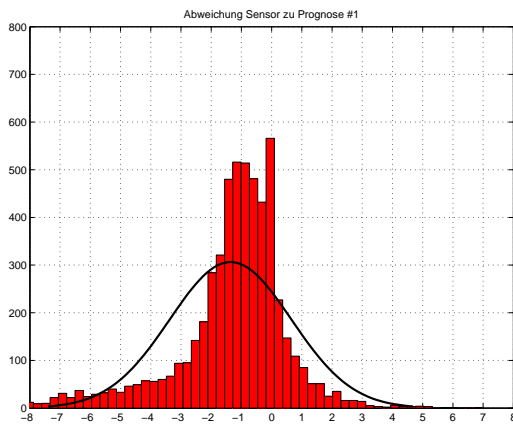
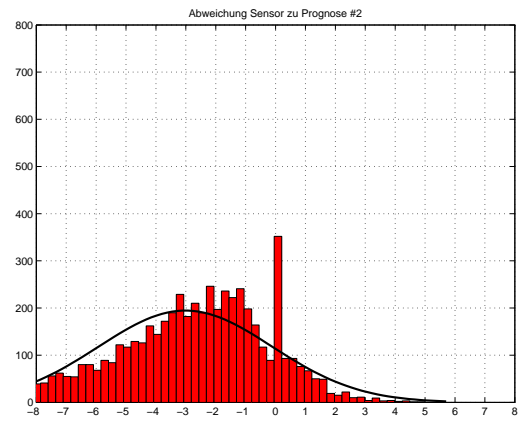


Abbildung 3.16: Boxplot der Abweichung der Fahrbahntemperatur von allen Sensormessungen und den zugehörigen 2-h-Prognosen vom 01. bis 31.03.2013. Quelle: [33]



(a) Histogramm Anbieter #1



(b) Histogramm Anbieter #2

Abbildung 3.17: Histogramm und gefittete Normalverteilung zur Gesamtabweichung der Fahrbahntemperatur aus allen Sensormessungen von den Ergebnissen der 2-h-Prognosen im Monat März 2013. Quelle: [33]

Qualität der Niederschlagsprognosen

Die Vorhersage von Niederschlagstyp, Niederschlagsmenge bzw. -intensität und Niederschlagsbeginn ist von entscheidender Bedeutung für einen präventiven Streumittelinsatz bzw. einen effizienten Winterdienst. Daher wurden die Prognosen ausgewählter Wetteranbieter mit den Messungen an einer unabhängigen Wetterstation näher untersucht.

In Abbildung 3.18 ist der Verlauf eines Niederschlagsereignisses beispielhaft über die Niederschlagsintensität in Millimeter pro Stunde von 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr am 13.03.2013 dargestellt. Die gemessene Intensität weist etwa von 13:00 Uhr bis 17:00 Uhr einen Wert und ungefähr 0,5 mm/h auf und steigert sich danach auf ein Maximum von 3,0 mm/h zwischen 21:00 Uhr und 22:00 Uhr, um danach wieder abzufallen. Die Prognose der Anbieter zeigt eine grundsätzlich vergleichbare Tendenz in Hinblick auf die Charakteristik der Niederschlagsintensität. Ein klarer Beginn des Niederschlagsereignisses kann jedoch nicht anhand dieser Darstellung abgelesen werden.

Oftmals gibt es keinen klar definierten Beginn von Niederschlagsereignissen. Vielmehr muss aus Sicht des Winterdienstes eine Niederschlagsmenge definiert werden, deren Überschreitung in Abhängigkeit von der Fahrbahntextur zu kritischen Zuständen führen kann. Da auch die Fahrbahntextur bzw. das Texturvolumen streut, kann gemäß den Ergebnissen in [55] eine Grenzbedingung von etwa 0,5 mm Gesamtniederschlag zu Vergleichszwecken definiert werden.

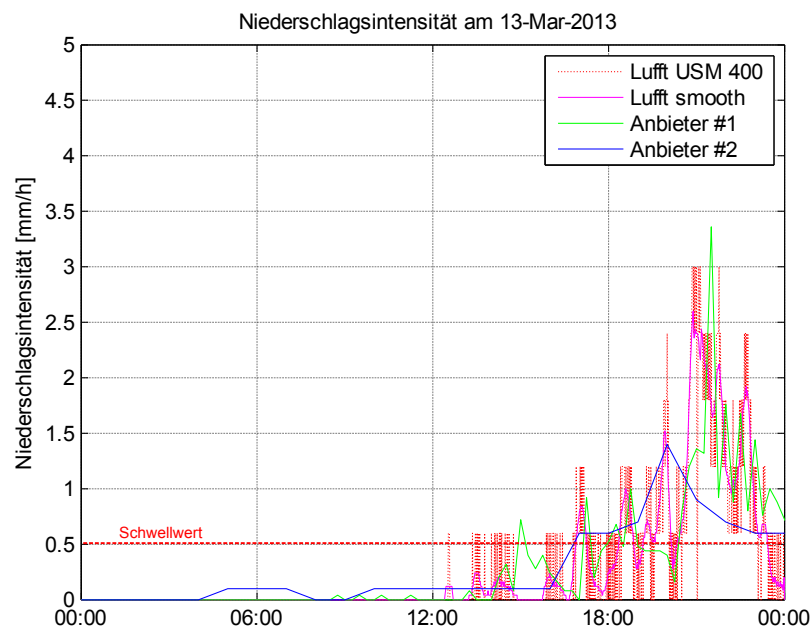


Abbildung 3.18: Prognostizierte und tatsächlich gemessene Niederschlagsintensität (LUFFT - Wetterstation) auf der A2 am 13.03.2013. Quelle: [33]

Abbildung 3.19 gibt einen Überblick über die Entwicklung der Niederschlagssumme sowie den sich aus der Grenzbedingung ergebenden Niederschlagsbeginn. Für das gewählte Beispiel stimmen die Prognosen der Niederschlagssumme für das Gesamtereignis mit rund 7 mm nahezu exakt mit den Messwerten überein. Aufgrund der prognostizierten Charakteristik des Niederschlagsereignisses sowie der gewählten Grenzbedingung kommt es zu erheblichen Abweichungen zwischen gemessenem und prognostiziertem Niederschlagsbeginn.

Die Messwerte zeigen, dass die Ereignisse in Hinblick auf Niederschlagsintensität, Niederschlagssumme und Dauer deutliche Unterschiede untereinander aufweisen. Der Mangel an übereinstimmenden charakteristischen Merkmalen erschwert naturgemäß eine adäquate Bewertung der Prognose hinsichtlich

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

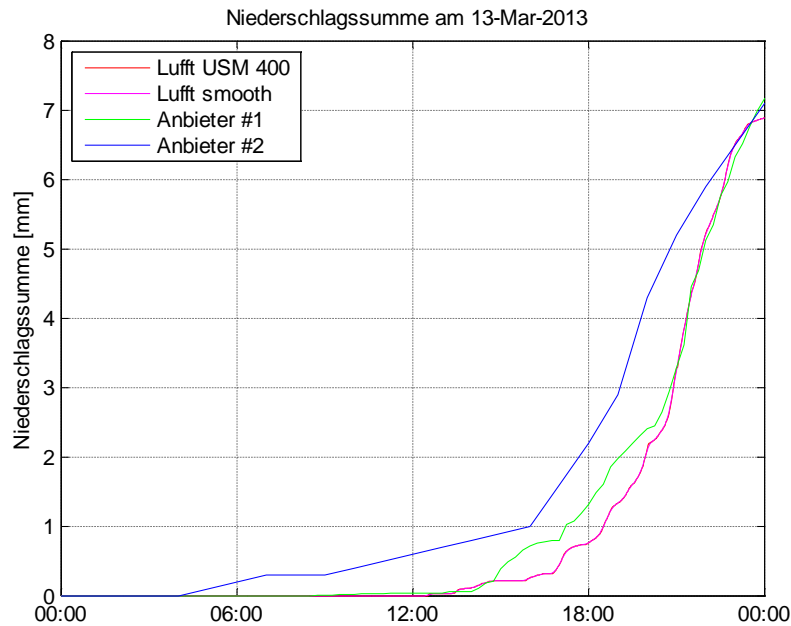


Abbildung 3.19: Prognostizierte und tatsächlich gemessene Niederschlagssumme (LUFFT - Wetterstation) auf der A2 am 13.03.2013. Quelle: [33]

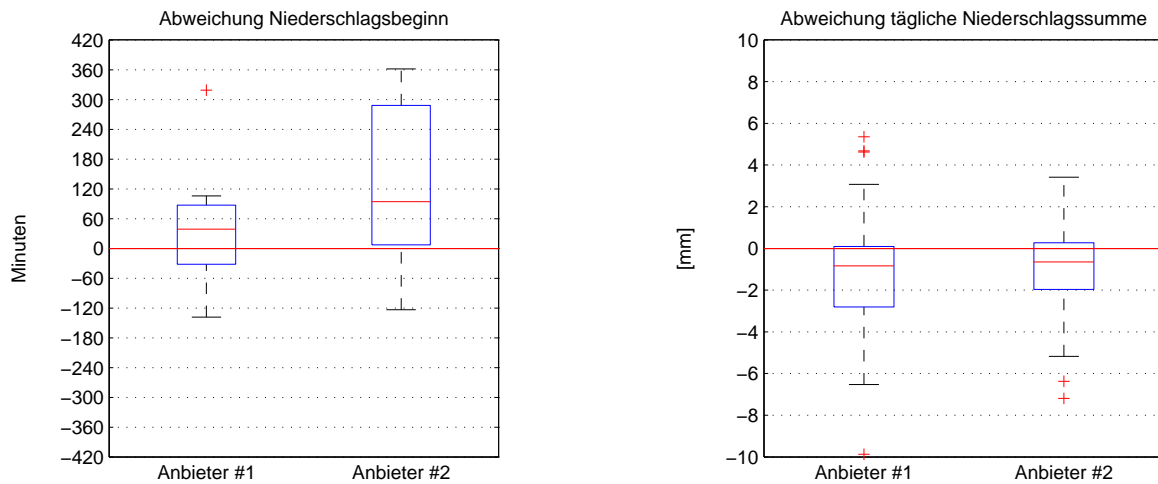
winterdienstrelevanter Zusammenhänge. Der Vergleich der Prognosen mit den Messwerten zeigt zum Teil erhebliche Abweichungen in allen relevanten charakteristischen Merkmalen. Trotz dieser Abweichungen geben die Prognosen doch deutliche Hinweise auf grundsätzlich zu erwartende Niederschlagsereignisse und sind damit eine unverzichtbare Hilfe für grundsätzliche Diensterteilung, Aufmerksamkeit und Planung von Einsatzfahrten.

Eine Dosierung der Streumengen auf Basis dieser Prognosen erscheint derzeit aufgrund der gezeigten Abweichungen nur als begrenzt sinnvoll. Vielmehr kann aufgrund der vorhandenen Texturreserve bei zeitnaher Präventivstreuung zugewartet werden, bis die Beobachtungen vor Ort bzw. der Wetterstationen den Beginn des Niederschlagsereignisses anzeigen. Sofern es sich nicht um ein durch Beobachtung vor Ort leicht erkennbares Extremereignis handelt, kann auf diese Weise ein rechtzeitiger Einsatz erfolgen. Die prognostizierten Niederschlagsereignisse dienen in diesem Sinne als Hinweise für Zeiträume besonderer Bereitschaft für die Beobachtung und schnelle Ausfahrt im Anlassfall.

Für die Frage nach der Zuverlässigkeit der prognostizierten Niederschlagsereignisse im Verhältnis zu tatsächlich gemessenen Ereignissen ist eine systematische Analyse der auftretenden Abweichungen für die jeweiligen Einzelereignisse von Interesse.

Um die Qualität der Niederschlagsprognosen im Untersuchungsgebiet bewerten zu können, wurden die Abweichungen für die Kennzahlen Niederschlagssumme und Niederschlagsbeginn im Vergleich zu den Messwerten näher analysiert. Abbildung 3.20a zeigt die Abweichungen der Prognosen von Anbieter #1 und Anbieter #2 an den 13 untersuchten Niederschlagsereignissen im März 2013. Die gesamte Niederschlagsmenge wird bei Anbieter #1 (Mittelwert $-0,24 \text{ mm} \pm 4,74 \text{ mm}$) und Anbieter #2 (Mittelwert $-0,39 \text{ mm} \pm 4,72 \text{ mm}$) im Schnitt etwas unterschätzt. Die Abweichungen zu den Niederschlagsmengen im Einzelfall gehen in beide Richtungen und sind erheblich.

Der Niederschlagsbeginn ist bei Anbieter #1 (Mittelwert $+1,5 \text{ h} \pm 4,3 \text{ h}$) relativ ungenau und daher durch lokale Beobachtung zu ergänzen. Bei Anbieter #2 ist der Niederschlagsbeginn (Mittelwert $+2,8 \text{ h} \pm 4,4 \text{ h}$) noch ungenauer und ohne lokale Beobachtung zu ungenau. Insgesamt geben beide Anbieter den Beginn von Niederschlagsereignissen systematisch früher an, als dieser tatsächlich eintritt (Abbildung 3.20b).



(a) Niederschlagssumme: Abweichung der Messungen (unabhängige Wetterstation) von 2-h-Prognosen für alle Tage (n = 13)

(b) Niederschlagsbeginn: Abweichung der Messungen (unabhängige Wetterstation) von 2-h-Prognosen für alle Tage (n = 13)

Abbildung 3.20: Abweichung von Niederschlagssumme und Niederschlagsbeginn aus 13 Einzelereignissen im März 2013. Quelle: [33]

Aus Sicht der Winterdiensteinteilung ist der Niederschlagsbeginn jedenfalls die maßgebende Kenngröße. Insbesondere für den präventiven Einsatz ist der Zeitpunkt des Niederschlags von großer Bedeutung. Nach dem Einsetzen des Niederschlags sind die Winterdienstfahrzeuge in der Regel bis zum Ende des Niederschlags in Einsatz. Dabei wird die Streumenge nach dem Straßenzustand und der erkennbaren und vom Fahrer abgeschätzten Niederschlagsmenge gewählt.

Die Prognose der Niederschlagsereignisse in Hinblick auf Niederschlagsbeginn, -art, -intensität und -dauer sind entscheidende Informationen für den Winterdienst sowie für die konkrete Einsatzplanung und Streumitteldosierung. Unter Berücksichtigung dieser Umstände können die Ergebnisse aus dem Vergleich zwischen Niederschlagsprognosen und Sensormessungen wie folgt zusammengefasst werden:

- Die gesamte Niederschlagsmenge ist bei Anbieter #1 (Mittelwert $-0,24 \text{ mm} \pm 4,74 \text{ mm}$) und Anbieter #2 (Mittelwert $-0,39 \text{ mm} \pm 4,72 \text{ mm}$) fast gleich
- Der Niederschlagsbeginn ist bei Anbieter #1 (Mittelwert $+1,5 \text{ h} \pm 4,3 \text{ h}$) relativ ungenau, zu früh und daher durch lokale Beobachtung zu ergänzen
- Der Niederschlagsbeginn ist bei Anbieter #2 (Mittelwert $+2,8 \text{ h} \pm 4,4 \text{ h}$) noch ungenauer, erheblich zu früh und ohne lokale Beobachtung zu ungenau
- Insgesamt sind die Prognosen der Niederschlagsereignisse eine gute Orientierungshilfe, ohne zusätzliche lokale Beobachtung sind keine ausreichenden Ergebnisse für ein Winterdienstmodell zu erwarten
- Für die Praxis sind lokale Beobachtungen und Warnungen von Wetterstationen bei Niederschlagsbeginn zielführend, wenn eine Präventivstreuung rechtzeitig erfolgt
- Die Fahrbahntextur bietet in der Regel Reserven, welche jedoch nicht überschätzt werden dürfen
- Trotz möglicher vorhandener Reserven darf sich ein Straßenbetreiber, aufgrund der Unsicherheit der Größe der Reserve, auf diese nicht verlassen

3.4 Ausstattung und Organisation

Nicht nur Einsatzfahrten zählen zum Winterdienst, auch die notwendige Vor- und Nachbereitung und die Organisation des laufenden Betriebes sind wesentliche Aufgaben des Straßenbetreibers. Im Folgenden sollen die wichtigsten Arbeiten, die neben dem Räumen und Streuen im Rahmen des Winterdienstes durchzuführen sind, kurz beschrieben werden, wobei diese Aufzählung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Diese Arbeiten beeinflussen wesentlich die für einen ordnungsgemäßen Einsatz notwendigen Ressourcen. Der Winterdienst ist dabei oft jener Aufgabenbereich, der die Spitzenlast an Gerät und Personal benötigt. Regional kann es durch die unterschiedlichen klimatischen Bedingungen auch zu intensiver Beschäftigung oder gänzlichem Fehlen einiger der genannten Arbeiten kommen.

3.4.1 Winterdienstausrüstung typischer Straßenmeistereien

Die Anzahl an Streuautomaten und Schneeräumgeräten stimmt in der Regel mit den in Tabelle 3.3 auf Seite 58 angeführten Zahlen an LKWs und Unimogs überein. Hier kommt der gesamte Fuhrpark zum Einsatz, der geeignet ist mit einem Streuautomaten ausgestattet zu werden. Die Ausstattung ist jedoch stark von den klimatischen Bedingungen abhängig, so gibt es für die gesamte Stadt Wien nur eine Schneefräse zur Beseitigung sehr hoher Schneedecken, während für die Arlbergstraße alleine drei zu Verfügung stehen.



Abbildung 3.21: Im Winterdienst eingesetzte Fahrzeuge

Prinzipiell können für den Winterdienst beinahe alle zweispurigen Fahrzeuge verwendet werden, an welche ein Schneepflug montiert werden kann. Diese Spanne reicht von 4-achs LKW mit 40 Tonnen Gesamtgewicht bis zu Kleintraktoren mit 1,5 Tonnen. Generell gilt dabei, je höherrangig und breiter die zu betreuenden Straßen sind, um so höher ist das Gesamtgewicht. Häufig sind 2 oder 3-achs-LKW bzw. 2-achs-Unimog in Verwendung. Eine höhere Zuladung bedeutet für den Winterdienst längere Strecken, die ohne Laden von Salz bzw. Sole betreut werden können.

Nachteilig an der hohen Zuladung und höheren Achszahl ist aber die geringe Wendigkeit der Fahrzeuge bzw. je nach Strecke eventuelle Fahrverbote für schwere Fahrzeuge. Im städtischen Umfeld sind die Fahrzeuge gewöhnlich kleiner, um die engen Straßen und Kreuzungen noch befahren zu können. Für kleine Straßen bzw. Radwege werden oft auch Kleingeräte oder Traktoren verwendet. Diese zeichnen sich vor allem durch ihre Vielseitigkeit aus, die in dem großen Angebot an Geräten für andere Aufgaben zu erkennen ist. Um Kontrollfahrten durchzuführen, wird oft auch auf PKW zurückgegriffen, die

deutlich geringere Kosten verursachen als LKW oder Kleingeräte. In Abbildung 3.21 sind einige solche Fahrzeuge zu erkennen, die einer Straßenmeisterei zur Verfügung stehen.

Ein Überblick über die Fahrzeugausstattung der Bundesländer ist in Abbildung 3.22 dargestellt. Unterschieden wird dabei einerseits zwischen LKW und Geräteträgern und andererseits zwischen Besitz der jeweiligen Länder und Anmietung der Fahrzeuge. Auffallend dabei ist der hohe Anteil an privaten Fahrzeugen in Vorarlberg, während Salzburg und Steiermark keine Fahrzeuge anmieten. Das zeigt die unterschiedlichen Herangehensweisen an die Optimierung des Fuhrparks bzw. die dafür anfallenden Kosten. Weiters fällt auf, dass in Wien der Anteil an Geräteträgern, welche kleiner und wendiger sind als LKWs, aufgrund der urbanen Verhältnisse des Straßennetzes vergleichsweise hoch ist. Generell ist der Fuhrpark an die Anforderungen jedes einzelnen Straßenbetreibers anzupassen.

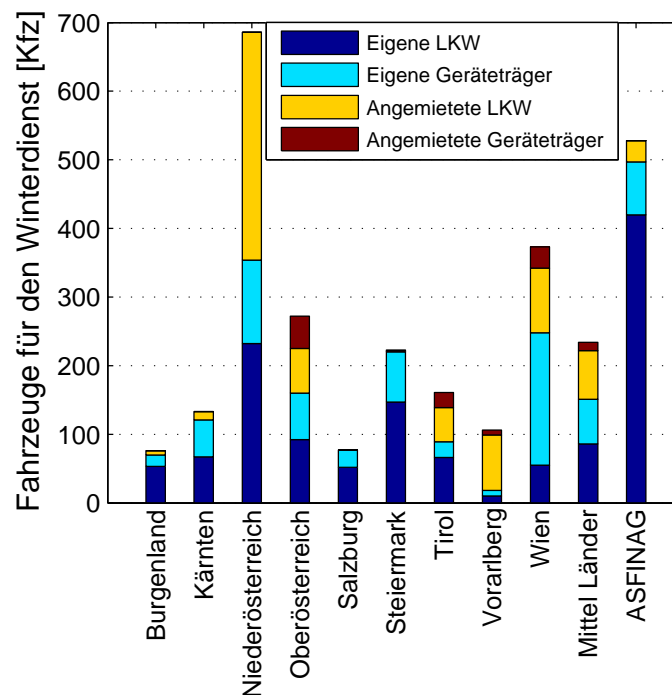


Abbildung 3.22: Für den Winterdienst verfügbare Fahrzeuge nach Bundesländern (Quelle: [11])

Die Personal- bzw. Fahrzeugausstattung einer Meisterei hängt stark von dem zu betreuenden Straßennetz ab. So sind Schneefräsen zur Bewältigung großer Schneemassen etwa in alpinen Lagen sehr viel verbreiteter als in tieferen Lagen, die im Gegenzug aber oft mit Schneeverwehungen zu kämpfen haben. Als Beispiel für eine typische Ausstattung einer Straßenmeisterei ist in Tabelle 3.3 die durchschnittliche Ausstattung einer Meisterei in Niederösterreich dargestellt. Zu beachten ist dabei, dass zu diesem Zeitpunkt (2009) in Niederösterreich die Fahrzeuge doppelt besetzt waren [53]. Von einer Doppelbesetzung wird vermehrt Abstand genommen, in Süddeutschland finden sich in einigen Gemeinden jedoch noch Doppelbesetzungen im Jahr 2014. *Stremot* bezeichnet den motorisierten Streckenwart (PKW), der im Winterdienst Kontrollfahrten durchführt, wenn kein LKW notwendig ist. Neben den Fahrern ist auch Personal in der Meisterei wie Mechaniker bzw. Magazineur notwendig.

Um Personalengpässe zu vermeiden, ist eine gewisse Urlaubs-, aber vor allem Krankenstandsreserve unerlässlich, welche 2 bis 3 Fahrzeuge auch im Schichtdienst bewegen kann. Diese Reserve bezieht sich auf eine Meisterei mit der in Tabelle 3.3 angegebenen Größe. Für größere bzw. kleinere Einheiten ist eine entsprechende Anpassung der Reserven notwendig. Gerade bei kleinen Betrieben, wie beispielsweise einem Gemeindebauhof, ist die Ausfallsicherheit sehr problematisch, da oft nur ein oder zwei Fahrzeuge bzw. Mitarbeiter zur Verfügung stehen. Im Fall eines längerfristigen Geräte- bzw. Personalausfalls ist es in dieser Konstellation oft schwierig für geeigneten Ersatz zu sorgen, um die vorgeschriebenen Winter-

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

diensteseinsätze durchführen zu können. Eine über die Zumutbarkeit hinausgehende Reserve, welche die Größe der Organisation und die damit zumutbare Reserve berücksichtigt, sieht jedoch auch die Judikatur nicht vor.

Fahrzeuge und handwerkliches Personal		Mitarbeiter
3	LKW mit Fahrer und Beifahrer, doppelt besetzt	12
2	Unimog mit Fahrer und Beifahrer, doppelt besetzt	8
4	Mietfahrzeuge mit einem Beifahrer (inkl. Reserve)	6
2	Stremot Fahrzeuge, doppelt besetzt	4
1	Ladegerät, Bedienung und Mechaniker	2
1	Magazineur und Haustechniker	1
Grundausrüstung		33
Urlaubs- bzw. Krankenstandsreserve		5 - 6

Tabelle 3.3: Fahrzeug- und Personalausstattung einer durchschnittlichen Straßenmeisterei in Niederösterreich (Quelle: NÖ LRH Bericht 12/2009)

3.4.2 Salzbevorratung

Die Bevorratung von Salz ist für einen zuverlässigen Winterdienst unerlässlich, wie die europaweite Salzknappheit im Winter 2010/11 deutlich gezeigt hat. Diese Engpasssituation hat mit dem weiter steigenden Salzverbrauch dazu geführt, dass in vielen Ländern Europas die Salzlager deutlich vergrößert werden. Kapazität und Standort sind dabei von strategischer Bedeutung für den operativen Winterdienst und müssen daher sorgfältig geplant werden. Das in dieser Arbeit entwickelte Straßenzustandsmodell kann dazu einen wesentlichen Beitrag betreffend der benötigten Lagerkapazitäten leisten.



(a) Silos



(b) Halle

Abbildung 3.23: Lagerung von Streusalz in Silos bzw. Hallen

Bei der Salzlagerung haben sich zwei Methoden bewährt: die Lagerung in Hallen für größere Mengen an Salz und die Lagerung in Silos, die grundsätzlich teurer ist, aber eine Reihe von Vorteilen bietet. In Abbildung 3.23a sind zwei Holzsilos zur Lagerung von Salz bzw. Splitt abgebildet. Salz wird über die an der linken Seite erkennbare Leitung aus einem Silofahrzeug mittels Druckluft in den Silo eingeblasen. Dabei ist eine sehr niedrige Feuchtigkeit des Salzes für den Befüllungsvorgang von hoher Bedeutung, weshalb in RVS 12.04.12 (2010) mit 0,5 % ein im internationalen Vergleich strenges Kriterium eingeführt wurde.

Die Schwierigkeiten bei zu hoher Feuchtigkeit sind neben Problemen beim Einblasen des Salzes vor allem das Verkrusten des Salzes im Silo. Dabei bildet sich ausgehend von der Silowand ein harter Salzbelag, der immer weiter in die Mitte wandert und damit das nutzbare Silovolumen verkleinert. Abhilfe kann durch Ansetzen von Vibrationsplatten oder die Verwendung schwerer Hämmer geschaffen

werden. Die Größe der Silos geht von einigen wenigen Tonnen bis zu einer Maximalmenge von derzeit 750 Tonnen Lagerkapazität. Zu den großen Vorteilen der Silos zählt die Beladung der Streufahrzeuge mittels der Verschlussklappe im Boden des Silos. Der Fahrer muss lediglich sein Fahrzeug unter dem Auslass positionieren und kann dann ohne weiteres Personal sein Fahrzeug selbst beladen.

Sollen größere Salzmengen gelagert werden, wird dazu meist eine Lagerhalle verwendet, wobei die Kapazitäten praktisch beliebig variieren können (siehe Abbildung 3.23b). Eine der größten Lagerhallen für Streusalz und gleichzeitig größte Holzkuppel Europas ist der „Salzdom II“ der Schweizer Salinen AG mit einer Grundfläche von 11.300 m³ und einer Lagerkapazität von über 100.000 t. Ähnlich wie Silos werden Lagerhallen meist von einer zentralen Stelle aus über Fördereinrichtungen mit Salz beladen. Die Verladung von Salz aus der Halle in Streufahrzeuge erfolgt zumeist über Radlader. Vorteil der Hallen gegenüber Silos ist neben der wesentlich höheren Kapazität, dass teilbeladene Streufahrzeuge relativ einfach das Salz wieder in die Halle entladen können, während bei Silos spezielle Salzurückführungsgeräte notwendig sind.

Die Messung der in Hallen bzw. Silos aktuell gelagerten Salzmenge im Zuge einer Lagerstandskontrolle muss regelmäßig durchgeführt werden, um rechtzeitig für Nachschub sorgen zu können. Automatische Messsonden können über festgelegte Routinen und intelligente Nachbestellmechanismen im Bedarfsfall für eine vollautomatische Meldung an den Lieferanten sorgen. Über die ideale Lagerkapazität wurden in Deutschland Untersuchungen von [22] angestellt, die zu folgendem Ergebnis kommen:

Straßennetz	Mindestmenge	anzustrebende Menge
Autobahn	10 t/km	20 t/km
Landesstraßen	3,5 t/km	5,0 t/km
Kommunal	3,5 t/km	5,0 t/km

Tabelle 3.4: Empfohlene Lagerkapazität von Streusalz, berechnet auf Basis von Lieferfristen und Verbrauch pro Volleinsatztag (5 Volleinsatztage mit Extremwetterlage; Bezug Salznetz, 2 Fahrstreifen). Quelle: [22]

3.4.3 Räumtechniken und ihre Anwendungsbereiche

Das Räumen als mechanische Beseitigung des Schnees von der Fahrbahn steht durch neue Materialien und leistungsfähige Maschinen im Zeichen einer ständigen Weiterentwicklung. Dabei kommt die *Pflügräumung* ohne bewegliche Teile aus, während die *Schneefräse* bzw. *Schneescheuler* zumindest einen angetriebenen Bauteil besitzt, der den Auswurf des Schnees bewirkt (siehe Abbildung 3.24). Schneefräsen oder -scheulern werden in der Regel nur bei Schneehöhen ab etwa 20 cm eingesetzt, wenn die Schneemenge nicht mehr von einem Pflug beseitigt werden kann. Ein weiteres Einsatzgebiet ist die Verfrachtung von Schnee, der im Zuge mehrerer Räumfahrten von Pflügen an den Fahrbahnrand geschoben wurde und entfernt werden muss. Dies kann insbesondere bei Lärmschutzwänden oder ähnlichen Bauten der Fall sein. Zudem sind große Schneemengen direkt neben der Fahrbahn eine mögliche Quelle von Schmelzwasser und dabei ein Risiko bei Temperaturschwankungen.

Die häufigste Art der Schneeräumung ist das Pflügen, wo durch die kinetische Energie des Fahrzeuges der Schnee entlang des Pfluges von der Fahrbahn gelöst und durch die Wölbung bzw. Schrägstellung an einer oder beiden Seiten des Fahrzeugs vorbei verfrachtet wird. Die Pflugscharbreite reicht von ca. 1 m für die Gehsteigräumung bis über 4 m, die durch zusätzliche Klapppflüge an der Fahrzeugseite (3.25(a)) oder Teleskopplüge auf bis zu 6 m Räumbreite erweitert werden können. Für die Schneeräumung von Flughäfen oder anderen großen Flächen sind Geräte verfügbar, die noch höhere Räumbreiten aufweisen. Die Räumgeschwindigkeit liegt zwischen 10 km/h und 70 km/h, wobei sie auf Autobahnen und Schnellstraßen im Idealfall zwischen 40 km/h und 50 km/h liegt.

3 Rahmenbedingungen im Winterdienst

Kennzahlen der Räumart	Systemskizze	Draufsicht	Gerätebild
Schneepflug Räumgeschwindigkeit: 10 – 70 km/h Räumleistung: - Maximale Schneehöhe: (Keilpflug) max. 0,8m Wurfweite: bis 1m			
Schneefräse Räumgeschwindigkeit: 1 - 12 km/h Räumleistung: bis 2.500 t/h Maximale Schneehöhe: ~ 1,4m Wurfweite: bis 20m Wurfhöhe: bis 12m			
Schneesleuder Räumgeschwindigkeit: 1 - 12 km/h Räumleistung: bis 1.600 t/h Maximal Schneehöhe: bis 3,5m Wurfweite: über 40m Wurfhöhe: bis 18m			

Abbildung 3.24: Grundlegende Möglichkeiten zum Räumen von Schnee von der Fahrbahn



(a) Räumung auf einer Autobahn mit Pflug und Seitenpflug (Foto: Kahlbacher)



(b) Zusätzliche Räumverbesserung durch zweite Leiste (Foto: Kahlbacher)

Abbildung 3.25: Schneepflüge im Einsatz

Die Qualität des Räumbildes bestimmt maßgeblich die notwendige Salzmenge. Schnee, der nicht mechanisch beseitigt wird, muss in weiterer Folge durch Taumittel getaut werden, um eine sicher befahrbare Fahrbahn zu erreichen. Spurrinnen, Längsunebenheiten oder ein allgemein schlechter Fahrbahnzustand wirken sich negativ auf die erzielbare Räumqualität aus. Deshalb werden auch bei der Pflugtechnik Anstrengungen zur Verbesserung des Räumbildes angestellt. Eine zusätzliche Nachräumleiste hinter der eigentlichen Pflugschar hilft dabei, den nach der ersten Räumung verbleibenden Schnee zu entfernen (siehe Abbildung 3.25(b)). Dabei können wesentlich weichere bzw. flexibler gelagerte Räumleisten verwendet werden, die zum Teil auch Unebenheiten ausgleichen können.

3.5 Prinzipien der Routenplanung und Routenarten

Eine der wichtigsten Aufgaben bei der Planung und Organisation des Winterdienstes ist die Routenführung der Winterdienstfahrzeuge. Unter dem auch für den Winterdienst herrschenden allgemeinen Einsparungsbedarf ist es notwendig, die verfügbaren Ressourcen so einzuteilen, dass das öffentliche Straßennetz möglichst effizient betreut wird. Diese Aufgabe ist nicht zu unterschätzen, da Planungsfehler unter Umständen als grobe Fahrlässigkeit des Straßenerhalters angesehen werden können und damit ein Organisationsverschulden vorliegen würde. Neben der eigentlichen Routenplanung für die Fahrzeuge nach Bedeutung der Straßen ist auch die stationäre Infrastruktur (Stützpunkte) zu berücksichtigen.

Der Zusammenhang der Routenführung und der Stützpunkte wird von der Art des Straßennetzes bestimmt, das von linearen Strukturen wie etwa Autobahnen zu stark verzweigten, blockartigen Netzen wie etwa in städtischen Gebieten reicht. Routen auf Autobahnen bestehen in der Regel aus sehr langen geraden Streckenstücken, die an Anschlussstellen oder Betriebsumkehren enden. Die schwierige Aufgabe bei der Routenplanung auf Autobahnen ist die Betreuung der Auf- und Abfahrten, die hohen Geschwindigkeitsunterschiede, die hohe Fahrbahnbreite, sowie die kurze Umlaufzeit. In städtischen Gebieten ist das Hauptproblem der Platzmangel und das stark verzweigte Netz mit Einbahnen und anderen Geboten. Der Vorteil liegt in der höheren Flexibilität in der Routenplanung, da zumeist viele Alternativstrecken bestehen. Das Netz der Landesstraßen liegt zwischen diesen beiden Extremen und hat als zusätzliche Herausforderung zum Teil starke Höhenunterschiede in relativ kleinen Gebieten zu bewältigen.

Ziel einer effizienten Routenführung ist es, den Anteil an Leerfahrten möglichst gering zu halten. Dazu müssen Reichweite der Fahrzeuge und Versorgungsinfrastruktur (z. B. Silos) an das bestehende Straßennetz angepasst werden. Bei Autobahnen liegen Silos oft bei Knotenpunkten, um gleich mehrere Strecken versorgen zu können. Ansonst sind die Silostandorte so zu wählen, dass zu lange Leerfahrten zur nächsten Ladestation vermieden werden, was oft durch einige wenige Silos möglich ist. Durch die linienhafte Ausprägung von Autobahnen entsteht auch ein linienartiges Netz an Routenführungen (Abbildung 3.26a). Dabei ist jedoch darauf zu achten, dass Routen oft wiederholt werden müssen, um alle Fahrstreifen räumen zu können. Bei reinen Streufahrten können oft alle Fahrstreifen auf einmal betreut werden (Streubreite bis zu 12 m).

Ländliche Netze stellen eine große Herausforderung an die Platzierung von Siloanlagen dar, da aufgrund der großen Fläche und der relativ geringen Straßendichte zumeist lange Anfahrtswege die günstigere Lösung darstellen (Abbildung 3.26b). Je nach Topografie kann dabei neben dem kreisartigen Routenbild auch ein baumartiges entstehen. Dies ist insbesondere in Gebirgsregionen mit lediglich einer Durchzugsstraße je Tal der Fall.

Im städtischen Bereich wird die Wahl der Standorte in erster Linie durch die Verfügbarkeit von Flächen getroffen. Punkte wie gute Zufahrtsmöglichkeiten und strategisch günstige Platzierung stehen Anforderungen wie geringe Anwohnerbelästigung gegenüber. Aufgrund der blockartigen Stadtstruktur entstehen netzartige Routenpläne (Abbildung 3.26c). Diese sind auch vergleichsweise häufig an die Gegebenheiten anzupassen, wenn etwa Einbahnen geändert oder Abbiegerelationen geöffnet bzw. gesperrt werden.

Hilfe bei der Priorisierung der einzelnen Strecken im Landesstraßennetz und im urbanen Bereich gibt die RVS 12.04.12 (2010), welche Kategorien festlegt und damit die Intensität der Betreuung vorschreibt.

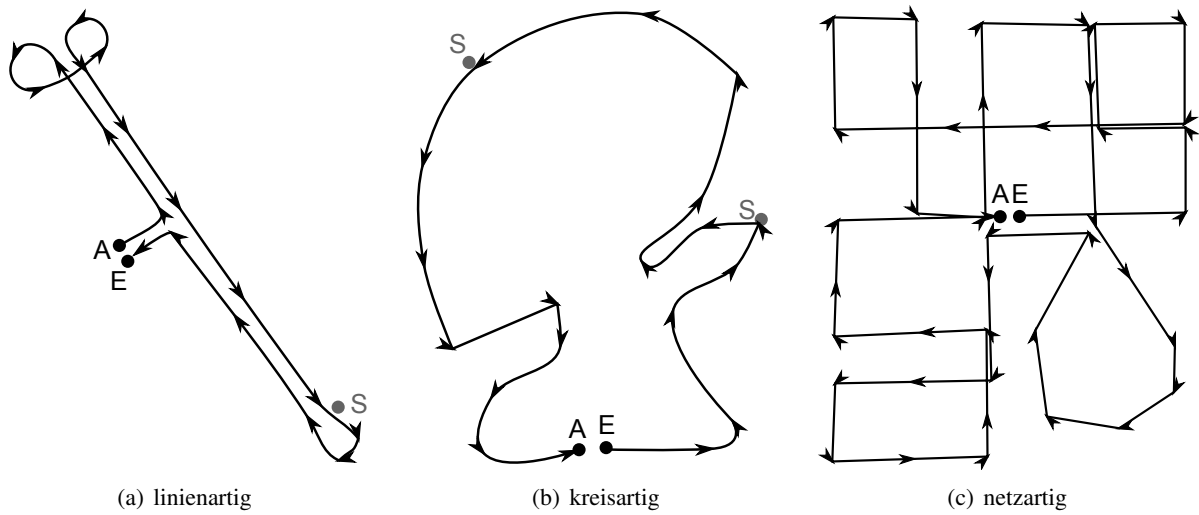


Abbildung 3.26: Beispiel einer Routenführung auf verschiedenen Netzen mit Anfangs- und Endpunkt (A, E) sowie Stützpunkten (S)

4 Streumittel

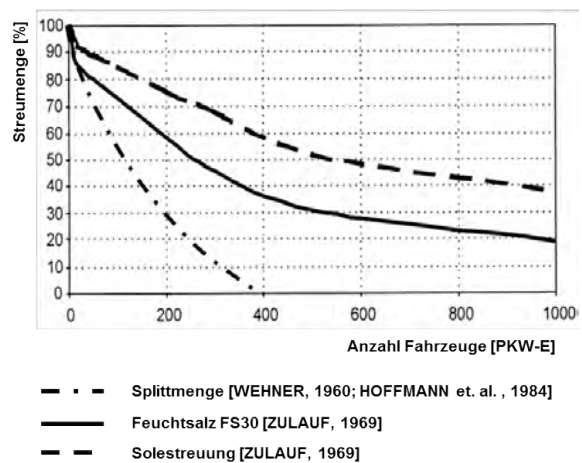
4.1 Abstumpfende Streumittel

Diese Bezeichnung umfasst alle zur Verbesserung der Griffigkeit ausgestreuten Splitte (gebrochenes Gestein oder andere splittartige Materialien wie etwa Schlacke). In der Regel sind Splitte der Korngruppen KK 1/4 oder KK 4/8 oder Gemische aus diesen Korngruppen einzusetzen. In Sonderfällen darf auch KK 8/16 gestreut werden. Anforderungen an Streusplitt für die Verwendung in Österreich finden sich in den „Richtlinien Streusplitt“ des Güteschutzverbandes der Österreichischen Kies-, Splitt- und Schotterwerke [20] und RVS 12.04.16 (2011).

Für Straßen mit einem DTV von mehr als etwa 1.000 KFZ/24h sind abstumpfende Streumittel nicht zu empfehlen, da sich nach ca. 400 KFZ-Überfahrten durch die Verteilungswirkung des Verkehrs gemäß dem Diagramm in Abbildung 4.1b kein Splitt mehr in den Rollspuren befindet [66], [29]. Das bedeutet, dass sich die Streumengen bzw. Streuintervalle in einem Bereich befinden, der auf Autobahnen und Schnellstraßen schwer logistisch durchführbar und insgesamt nicht wirtschaftlich ist. Neben der raschen Verdrängung des Splitts aus der Rollspur kommt bei höheren Geschwindigkeiten noch die Gefahr der Beschädigung von Fahrzeugen durch aufgewirbelten Splitt hinzu.



(a) Herstellung einer Verbindung zwischen Reifen und Fahrbahn durch eine Eisschicht mittels Streusplitt



(b) Austragung von Splitt und Salz aus der Radspur in nicht befahrene Bereiche der Fahrbahn bzw. die Umgebung

Abbildung 4.1: Wirkungsweise und Abnahme von Streusplitt auf der Fahrbahn

Im Gegensatz zu Streusalz, das durch Regen und Schmelzwasser ausgewaschen wird, verbleibt der ausgebrachte Splitt in den Randbereichen der Fahrbahn und muss vom Straßenbetreiber wieder eingekehrt werden. Streusplitt kann jedoch z.B. bei starken Schneefällen auf Steigungsstrecken gezielt eingesetzt werden, um den Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten. Während die Kosten des Streusplitts auch im Verhältnis zum Salz mit 10 bis 30 €/t (Stand 2010) noch vergleichsweise günstig sind, ist die Entsorgung des verbleibenden eingekehrten Materials mit 80 bis 100 €/t (Stand 2014) derzeit sehr teuer. Eine andere Nutzung ist aufgrund der hohen Schadstoffbelastung nur durch entsprechende Nachbehandlung möglich.

Ein weiterer Nachteil des Splitts liegt in der zusätzlich entstehenden Feinstaubbelastung der Luft aufgrund des Abriebs und der Aufwirbelung durch den Verkehr. Dies gilt besonders für Agglomerationen

4 Streumittel

und Städte, in denen es an vielen Straßen aufgrund der geringen Verkehrsstärke noch wirtschaftlich wäre Splitt zu streuen. Die zusätzliche Belastung ist aufgrund der bestehenden Feinstaubsituation jedoch gesundheitlich nicht zulässig.

Ebenso wurde bereits in [29] nachgewiesen, dass mit Taumitteln deutlich höhere Griffigkeiten und damit sicherere Verhältnisse als mit Splitteinsatz geschaffen werden können.

4.1.1 Wirkungsweise abstumpfender Streumittel

Im Gegensatz zu auftauenden Streumitteln wirken abstumpfende Streumittel auf mechanischer Ebene und damit unmittelbar nach dem Aufbringen und temperaturunabhängig. Die Wirkungsweise besteht darin, dem Reifen zusätzliche Gesteinsspitzen zu bieten, welche zur Übertragung horizontaler Kräfte genutzt werden können. Auf der Seite der Fahrbahn verkanten sich einzelne Splittkörner in Eis bzw. Schnee und übertragen hier die entsprechenden Horizontalkräfte, wie in Abb. 4.1a skizziert ist.

Der Vorteil der Splittstreuung liegt in der unmittelbaren Wirksamkeit nach der Streuung und der Erhöhung der Griffigkeit auch auf bereits festgefahrenen Schneedecken, da sich der Splitt beim Überfahren der Schneedecke durch die Kraftfahrzeuge in den Schnee bzw. in das Eis eindrückt. Ist die Schneedecke jedoch dicker als der Korndurchmesser, entfaltet der Splitt kaum Wirkung. Auftauende Streumittel brauchen dagegen eine gewisse Zeit (5 min bis 60 min), um ihre gesamte Wirkung im lockeren Schnee zu entfalten, beginnen jedoch sofort mit einer auftauenden Wirkung.

4.1.2 Verwendete Materialien

Gemäß RVS 12.04.16 (2011) wird der für den Winterdienst eingesetzte Splitt in drei Kategorien geteilt. Darin sind beispielsweise Grenzwerte für den Gehalt an Feinteilen und Widerstand gegen Zertrümmerung spezifiziert, die von den Splitten eingehalten werden müssen. Welcher Splitt eingesetzt werden kann, wird durch die Verkehrsbelastung bestimmt, wobei auf stärker befahrenen Straßen Splitt der Kategorie 1 zu verwenden ist. Der Typ 1-S ist qualitativ noch hochwertiger und wird in Feinstaubsanierungsgebieten eingesetzt, um die Staubbildung durch Abrieb zu beschränken.

Die Eignung verschiedener Splitte für den Winterdienst sowie die Unterschiede in toxikologischer Hinsicht samt dem resultierenden Emissionspotential wurden ebenfalls an der TU Wien [39] untersucht und bewertet. In den drei untersuchten Kategorien erwies sich Basalt aufgrund der geringsten Staubbildung als geeignetstes Gestein, wobei durch die geringe Auswahl an Proben und das eingeschränkte Versuchsprogramm keine endgültige Aussage getroffen werden kann.

4.1.3 Einsatzbereiche abstumpfender Streumittel

Durch die relativ rasche Verdrängung des Splitts aus der Rollspur eignen sich abstumpfende Streumittel in erster Linie für schwach befahrene Gemeindestraßen. Darüber hinaus kann Splitt auch auf Strecken mit einem Verbot für Salzstreuung genutzt werden, wobei die genannten Nachteile in Kauf genommen werden müssen. Weiters kann bei Steigungsstrecken eine Mischung aus Splitt und Salz verwendet werden, die eine sofortige Wirkung durch den Splitt und ein danach folgendes Tauen des Schnees durch das Salz ermöglicht. Dies ist jedoch aufgrund der logistischen Schwierigkeiten und der notwendigen Mehrkammerstreuer nur in Sonderfällen praktikabel. Im urbanen Bereich wird Splitt zum Teil für die Betreuung von Gehwege eingesetzt.

4.2 Auftauende Streumittel

Die Bezeichnung *auftauende Streumittel* umfasst alle Streustoffe, die durch einen chemischen Vorgang den Gefrierpunkt von Wasseraggregaten unter die Fahrbahntemperatur absenken und so Fahrbahnglätte verhindern. Im Allgemeinen sind dies Salze, die auf die Fahrbahn aufgebracht werden und mit Regen, Schnee, Reif bzw. Tau eine Lösung bilden. Das Ziel der Salzstreuung besteht darin, eine Eisbildung durch die herbeigeführte Gefrierpunktniedrigung zuverlässig zu verhindern, indem der Gefrierpunkt der Lösung bzw. Sole unter jene der Fahrbahntemperatur abgesenkt wird.

Die im Winterdienst verwendeten Taumittel (NaCl , CaCl_2 und MgCl_2) senken den Gefrierpunkt bei steigender Konzentration immer weiter ab, bis der sogenannte eutektische Punkt erreicht ist. Dieser Punkt bezeichnet jene Konzentration mit zugehörigem Gefrierpunkt, ab dem weitere Erhöhungen der Konzentration zu keiner weiteren Gefrierpunktabenkung führen. Die Menge an Schnee oder Eis, die von einem Taumittel in Flüssigkeit umgewandelt werden kann, ist daher begrenzt und stark von der Umgebungstemperatur abhängig.

4.2.1 Natriumchlorid

Natriumchlorid (auch Kochsalz oder Speisesalz) mit der chemischen Formel NaCl ist Hauptbestandteil und dominantes Streumittel in Österreich bzw. ganz Europa. Natriumchlorid wird über Verdunstung von Meerwasser, aus dem Bergbau oder bei chemischen Prozessen als Nebenprodukt gewonnen. Die weltweite jährliche Salzproduktion 2013 lag bei 264 Mio. Tonnen. Die größten salzproduzierenden Länder sind gemäß [42] China (71 Mio. Tonnen), die USA (40,1 Mio. Tonnen) und Indien (18 Mio. Tonnen) .

Der wichtigste Lieferant für Salz in Österreich ist die Salinen Austria AG, die jährlich etwa 1,1 Mio. Tonnen Salz (Kennzahlen für das Wirtschaftsjahr 2011/12) bei einer maximalen Tageskapazität von 3.350 Tonnen produziert. Die Salinen Austria AG gewinnt NaCl bergmännisch im Salzkammergut und bereitet es am Standort Ebensee auf. Zur Salzgewinnung im Bergbau wird Wasser in einen Stollen gepumpt, die Lösung von Steinsalz im Wasser abgewartet und diese Sole dann abgepumpt. In der Saline wird das Salz durch Verdunsten und Zentrifugieren aus der Sole gewonnen und gereinigt.

Es zeigt sich insgesamt, dass sich der Verbrauch durchaus um den Faktor 3 je nach Winter ändern kann. So wurden im milden Winter 2006/07 von der ASFiNAG nur 45.700 Tonnen Streusalz verbraucht, im strengen Winter 2008/09 stieg der Verbrauch auf 126.900 Tonnen. Der Preis für Natriumchlorid für den Winterdienst liegt üblicherweise bei etwa 80 bis 90 €/t (ohne USt.). Im Vergleich dazu kosten 500 g jodiertes Speisesalz im Einzelhandel ca. 0,39 €, was einem Preis von 624 €/t (ohne USt.) oder knapp dem 7-fachen entspricht.

Weiters kann es aufgrund von Lieferengpässen wie z. B. im Winter 2010/2011 aufgrund anhaltender Schneefälle und der daraus entstehenden europaweiten Knappheit von NaCl zu extremen Preissteigerungen auf 200 - 240 €/t kommen, denen nur durch ein gut organisiertes Salzmanagement und entsprechende Bevorratung sowie effiziente Ausbringung entgegen gewirkt werden kann.

Natriumchlorid hat eine Dichte von $2,17 \text{ g/cm}^3$ bei 20°C und eine Löslichkeit in Wasser von 359 g/l bei 20°C . Eine Salzlösung leitet durch die freien Ionen elektrischen Strom, während weder reines H_2O noch reines NaCl elektrisch leitfähig sind. Eine Sole mit einem Salzgehalt von 23,4 M-% bildet ein eutektisches Gemisch, das bei $-22,6^\circ\text{C}$ ohne Entmischung gefriert. Wie wichtig und vielseitig Natriumchlorid ist, lässt sich an dem sehr breit gefächerten Einsatzgebiet darstellen. Die Produktpalette der Salinen Austria AG mit Speisesalz, Auftausalz, Gewerbesalz, Industriesalz, Pharmasalz und Viehsalz spiegelt dabei die typischen Verwendungszwecke von NaCl wieder. Diese Produkte unterscheiden sich vor allem in den Punkten Reinheit, Korngröße, Gebindegröße sowie Zusätze und resultierende Preise.

Welche Mengen NaCl je nach Einsatzgebiet verbraucht werden, lässt sich aus Tabelle 4.1 ablesen. Der Anteil von Speisesalz ist mit 4% vergleichsweise gering. Dominant sind die Anteile an industriellem

Salzverbrauch und an Auftausalz. In Österreich liegt der durchschnittliche Streusalzverbrauch für den Winterdienst der letzten Jahre bei 345.000 Tonnen pro Jahr, wobei keine vergleichbaren Zahlen über den Einsatz in anderen Sektoren zur Verfügung stehen.

Chemische Industrie	Nahrungsmittel	Generelles Industriesalz	Agrarindustrie	Wasserbehandlung	Winterdienst
43 %	4 %	2 %	4 %	1 %	46 %

Tabelle 4.1: Anteil einzelner Verwendungsbereiche von Natriumchlorid in den USA. Quelle: [41]

Kristallbildung und eutektisches Diagramm von NaCl

Unabhängig davon, ob das aufgebrachte Natriumchlorid Siedesalz, Steinsalz oder Meersalz ist, bilden sich nach der Auftrocknung der Niederschlagswässer Kristalle aus Restsalz, die bei entsprechender Schichtstärke einen negativen Einfluss auf die Fahrbahngriffigkeit haben. Gemäß mineralogischer Untersuchungen bilden sich zwei Arten von Kristallen in Abhängigkeit von der Temperatur, die jedoch ohne mineralogische Untersuchung nicht zu unterscheiden sind und in Bezug auf den Straßenverkehr ähnliche Auswirkung haben.

Bei einer Luftfeuchtigkeit unter 100 % an der Fahrbahnoberfläche sowie Plusgraden verdunstet das Wasser auf der Straße, das Streusalz bleibt als Halit (NaCl-Kristall) zurück. Diese Kristalle bleiben auch bei erneuter Abkühlung stabil, können aber mit Niederschlag wieder eine Sole bilden. Durch das Zusammenklumpen einzelner Kristalle beim Auftrocknen entsteht jedoch besonders in den Vertiefungen der Textur und bei großen Streumengen eine feste Ansammlung an Halit, die durch den Verkehr nicht gelöst werden kann. Dadurch bleibt die spezifische Oberfläche gering und der Lösungsvorgang bei erneutem Niederschlag geht nur langsam vor sich. Während dieser Zeit bildet sich jedoch an der Oberfläche ein Film aus gelöstem Salz und Schmutz aus und die Fahrbahn wird durch die gefüllte Textur glatter.

Bleibt die Temperatur unter 0°C und die Luftfeuchtigkeit unter 100 % kann es zur Bildung von Hydrohalit (NaCl·2H₂O) kommen, das bei tiefen Temperaturen aus der Sole ausfällt. Hydrohalitkristalle weisen eine ähnliche Struktur auf wie herkömmliche NaCl-Kristalle, haben aber neben Na und Cl auch Wasser in die Kristallstruktur aufgenommen. Ab Temperaturen von -15°C beginnen sich signifikante Mengen an Hydrohalit zu bilden. Bei Temperaturen unter -23°C steigt das Kristallwachstum sprunghaft an. Diese Art der Kristallbildung ist aus Sicht des Winterdienstes sehr ungünstig, da Hydrohalit keine Tauwirkung aufweist und die Kristalle zudem Ansatzpunkte für Eisbildung darstellen. Diese Eis-Hydrohalitkonglomerate bilden eine schmierige Masse, die bei hohen Streumengen die Griffigkeit herabsetzt. Hydrohalit ist zudem ein stabiles Mineral, das erst bei einer Erwärmung auf über 0°C wieder in Halit und Wasser zerfällt, wodurch erneute Solebildung möglich wird.

Die Temperaturbereiche für eine Kristallbildung von NaCl-Sole sind in Abbildung 4.2 dargestellt und zeigen ein typisches eutektisches Diagramm. Im hellen Bereich „Sole“ ist die Sättigung der Sole ausreichend hoch, so dass es zu keiner Bildung von Eis oder Hydrohalit kommt. Im dunklen Bereich „Sole + Eis“ friert die Sole nach entsprechender Zeit vollständig durch und bildet Eis, während es im Bereich „Eis + NaCl·2H₂O“ so lange zur Bildung von Hydrohalit kommt, bis die Sole zu Eis gefroren ist. Im hellen Bereich „Sole + NaCl·2H₂O“ ist die Sole flüssig, es kommt jedoch zur Bildung von Hydrohalit bis eine Solekonzentration erreicht ist, die im Bereich „Sole“ liegt. Für den Winterdienst ist die durchgezogene Linie interessant, da diese den Gefrierpunkt der NaCl-Lösung (Sole) beschreibt, während die strichlierten Linien die mineralogischen Abläufe markieren.

In der chemischen Diktion wird nur bei Salzlösungen von Natriumchlorid von einer Sole¹ gesprochen. In der Praxis wird der Begriff Sole jedoch auch für Lösungen von CaCl oder anderen Salzen verwendet.

¹Definition im Duden: Sole; Substantiv, feminin - [in stärkerem Maße] Kochsalz enthaltendes Wasser

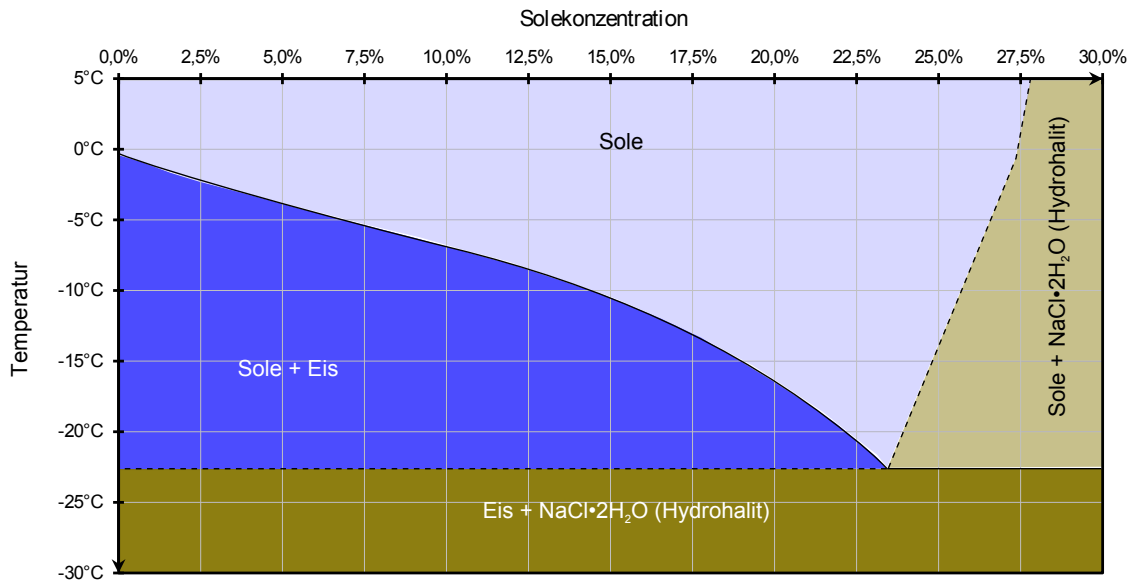


Abbildung 4.2: Eutektisches Diagramm für NaCl und Wasser

4.2.2 Kalziumchlorid

Kalziumchlorid (auch Calciumchlorid) mit der chemischen Formel CaCl_2 hat eine Dichte von $2,16 \text{ g/cm}^3$ bei 20°C und eine Löslichkeit in Wasser von 740 g/l bei 20°C . CaCl_2 kommt zwar in der Natur als Lösung vor, wird aber für die industrielle Verwendung hauptsächlich aus Salzsäure (HCl) und Calciumcarbonat (CaCO_3) hergestellt bzw. als Nebenprodukt bei der Sodaherstellung gewonnen. Die Kristallbildung ist unregelmäßiger als bei NaCl , was zu einer flockigen Form in trockenem Zustand führt.

Kalziumchlorid ist stark hygroskopisch, d. h. es zieht Wasser an (Feuchtigkeit aus der Luft), was es zu einem guten Trocknungsmittel in der Industrie und Lebensmittelverarbeitung macht. Für den Winterdienst führt diese Eigenschaft aber zu dem Problem, dass eine mit CaCl_2 gestreute Fahrbahn auch dann feucht aussieht, wenn kein Niederschlag fällt bzw. sich kein Reif bildet. In der Wahrnehmung vieler Fahrer ist die dadurch entstehende feuchte Fahrbahn bei niedrigen Temperaturen eine Gefahrenquelle, obwohl die Feuchtigkeit erst durch das Salz auf die Fahrbahn gelangt ist und ohne weiteren Niederschlag in der Regel keine Gefahr besteht. Dadurch kann es zu vermehrten Streuungen aufgrund einer subjektiv wahrgenommenen Gefahr, welche in dieser Form jedoch nicht besteht, kommen.

Wie NaCl hat auch CaCl_2 einen eutektischen Punkt, unter dem eine weitere Herabsetzung des Gefrierpunktes nicht möglich ist und der weit unter dem von NaCl liegt. Deswegen wird CaCl_2 vor allem bei sehr tiefen Temperaturen angewendet. In solchen Fällen wird CaCl_2 jedoch meist nur in der Sole bei der Feuchtsalzstreuung FS 30 (70 % Trockensalz, 30 % Sole verwendet), wodurch diese „aggressiver“ sein soll. Als wesentlich wird vor allem der Umstand angesehen, dass die Sole im Tank des Streufahrzeuges nicht während der Streufahrt friert, was bei zu stark verdünnter Natriumchloridsole vereinzelt vorkommen kann. Dies wird durch die Verwendung von CaCl_2 bei der Soleherstellung zuverlässig bis zu -45°C bei Sättigung der Sole verhindert.

Durch die starke Hygroskopizität nimmt Kalziumchlorid leicht Wasser aus der Umgebung auf und bildet dabei einen Hydrat-Komplex, der im Wesentlichen aus Kalziumchlorid-Dihydrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) besteht. Die Konzentration von reinem CaCl_2 in diesem Dihydrat lässt sich anhand der molaren Masse und der Anzahl der einzelnen Elemente in einem Molekül bestimmen. Die in RVS 12.04.16 (2011) geforderte Reinheit von 77 M-% entspricht dabei grob dem in Tabelle 4.2 berechneten Anteil von CaCl_2 an dem erwähnten Dihydrat. Bei der manuellen Soleherstellung muss dieser Umstand berücksichtigt werden, da ein 25-kg-sack Kalziumchloridflocken nur 77 M-% CaCl_2 enthält und das Mischungsverhältnis daher angepasst werden muss.

4 Streumittel

Zur Vermeidung zu schwach konzentrierter Solen ist es ratsam eine tabellarische Zusammenstellung verschiedener Mischungsverhältnisse und resultierender Solelösungen bei der Solemischanlage sichtbar anzubringen und das Personal darauf aufmerksam zu machen. In der Praxis erfolgt eine Anwendung von CaCl_2 in der Feuchtsalzstreuung vielfach bereits ab Temperaturen von weniger als -6°C , was die Streukosten bei einem Preis von ca. 250 bis 310 €/t deutlich erhöht.

Element	Molmasse [g/mol]	Atomanzahl	Elementmasse [g]	Anteil	Taumittel
Ca	40,07800	1	40,07800	27,26%	tauwirksam
Cl	35,45270	2	70,90540	48,23%	tauwirksam
H	1,00794	4	4,03176	(2,74%)	Wasser
O	15,99940	2	31,99880	(21,77%)	Wasser
			147,01396	75,49%	tauwirksamer Anteil

Tabelle 4.2: Molare Masse von Kalziumchlorid-Dihydrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

4.2.3 Magnesiumchlorid

Magnesiumchlorid mit der chemischen Formel MgCl_2 hat eine Dichte von $2,32 \text{ g/cm}^3$ bei 20°C und eine Löslichkeit in Wasser von 542 g/l bei 20°C . Magnesiumchlorid kommt in der Natur mineralisch gebunden und gelöst in Meerwasser vor. Wie Kalziumchlorid ist es stark hygroskopisch mit vergleichbaren Nachteilen. Der eutektische Punkt einer gesättigten MgCl_2 -Lösung liegt bei -33°C . Es wird aus Magnesiumoxid (MgO), Chlor (Cl_2) und Koks (C) gewonnen und dient als Grundlage zur Gewinnung elementaren Magnesiums sowie als Lebensmittelzusatzstoff. Weiters ist eine Verwendung in einer Vielzahl an industriellen Produkten wie z. B. in Legierungen und Brennstoffen üblich.

Magnesiumchlorid wird als fester Stoff ähnlich wie Kalziumchlorid in Form von Schuppen geliefert, die überwiegend aus Magnesiumchlorid-Hexahydrat ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) bestehen. Der vorgeschriebene Mindestanteil an MgCl_2 von 47 M-% (RVS 12.04.16, 2011) liegt etwas über dem berechneten Massenanteil von 46,8 M-%. Eine exakte Berechnung des Massenanteils ist über die chemische Zusammensetzung und die molare Masse der einzelnen Elemente möglich und in Tabelle 4.3 für $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ zusammengefasst. Demgemäß ist nur technisch reines Magnesiumchlorid-Hexahydrat als Streumittel zugelassen, womit es zu keinerlei Verunreinigung der gelieferten Flocken kommen darf. Besonders beim Erzeugen von Solen ist darauf zu achten, dass nur etwa die Hälfte der Flockenmasse Magnesiumchlorid ist. Der Preis für eine Tonne Magnesiumchlorid liegt mit etwa 180 bis 220 €/t ebenfalls deutlich über dem von NaCl . Die Anteile des nicht tauwirksamen Hydratanteils sind in Tabelle 4.3 angegeben.

Element	Molmasse [g/mol]	Anzahl	Elementmasse [g]	Anteil	Taumittel
Mg	24,30500	1	24,30500	11,96 %	tauwirksam
Cl	35,45270	2	70,90540	34,88 %	tauwirksam
H	1,00794	12	12,09528	(5,95 %)	Wasser
O	15,99940	6	95,99640	(47,22 %)	Wasser
			203,30208	46,83 %	tauwirksamer Anteil

Tabelle 4.3: Molare Masse von Magnesiumchlorid-Hexahydrat

4.2.4 Weitere Taumittel

Kalziummagnesiumacetat $\text{Ca}_x\text{Mg}_y(\text{CH}_3\text{COO})_2(x+y)$

Kalziummagnesiumacetat (CMA) ist eine aus gebranntem Dolomit und Essigsäure hergestellte Substanz, die in wässriger Lösung (25%ige CMA-Lösung) klebrig ist und eine leichte Tauwirkung besitzt. Diese Eigenschaften werden dazu verwendet, auf innerstädtischen Straßen entstehenden Feinstaub zu binden

und so die Luftgüte zu verbessern. Die Tauwirkung ist allerdings nicht groß genug, um bei Temperaturen von unter -6°C ohne zusätzliche Streumittel auszukommen, wodurch die gewünschte Doppelwirkung als „Taubmittel und Feinstoffkleber“ nicht immer erreicht werden kann.

Da CMA nur als Flüssigkeit ausgebracht wird, kann es nicht mit den herkömmlichen Streumaschinen gestreut werden. Es sind reine Solestreugeräte zu verwenden, die so adaptiert sind, dass die Klebrigkeit von CMA keine Probleme verursacht. CMA wird nicht nur als Taubmittel, sondern auch als reines Bindemittel für Feinstaub in den Sommermonaten verwendet. Durch den unangenehmen Geruch von CMA kann es trotz der geringen in freier Natur ausgebrachten Mengen unter Umständen zu Geruchsbelästigungen kommen.

Versuche und praktische Erfahrungen zeigen, dass CMA bei Einhaltung der vom Hersteller angegebenen maximalen Streumengen keine negative Auswirkung auf die Griffigkeit hat [62]. Die erlaubte Höchststreuemenge liegt bei 10 g/m^2 und die Geschwindigkeit ist mit 30 km/h zu begrenzen. Zusätzlich muss die Teststrecke noch als solche durch entsprechende Beschilderung ausgewiesen werden. Die Europäische Kommission begann 1992 mit der Einführung eines Programmes zur Finanzierung umweltrelevanter Projekte, unter anderem auch dem EU Life+ Projekt CMA. Unabhängige Untersuchungen in [38] haben jedoch gezeigt, dass der Einsatz von CMA zu einer Verringerung der Griffigkeit um $\delta\mu=0,2$ führen kann.

Nach mehrmaliger Weiterführung wurde 2007 das Programm Life+ gestartet. Seit 1992 wurden mehr als 3.000 Projekte mit einem Gesamtbudget von etwa 2 Mrd. Euro mitfinanziert. Das EU-Programm Life+ gliedert sich in drei Gruppen: LIFE+ Nature and Biodiversity, LIFE+ Environment Policy and Governance sowie LIFE+ Information and Communication. Ziel der Life+ Programme ist es, die Umwelt nachhaltig zu schützen und somit die Lebensqualität für EU Bürger zu verbessern. Das Projekt CMA+ läuft von 2009 bis 2012 mit einem Gesamtbudget von etwa 2,7 Mio. Euro wovon etwa 50 % über Fördermittel des EU Life+ Programmes finanziert werden. Die teilnehmenden Städte waren Klagenfurt, Lienz in Österreich sowie Bruneck in Südtirol. Der Preis für CMA liegt bei etwa 1.200 bis 1.800 €/t und ist damit um ein Vielfaches teurer als alle anderen Streumittel auf dem Markt.

Kaliumkarbonat K_2CO_3

Kaliumkarbonat hat eine Dichte von $2,428\text{ g/cm}^3$ bei 20°C und eine Löslichkeit in Wasser von 1.120 g/l bei 20°C . Kaliumkarbonat wird in einer Vielzahl von Produktionsprozessen benötigt, spielt im Winterdienst aber eine eher untergeordnete Rolle. Der Vorteil von Kaliumkarbonat liegt darin, dass weder Chlor noch Natrium enthalten ist, da diese oft ortspolizeilich verboten sind. Der Nachteil liegt im zuletzt stark gestiegenen Preis, die auch als Grundstoff für Düngemittel verwendet wird und der Markt hier starken Schwankungen unterliegt. Kaliumkarbonat wird auf Teilen des Straßennetzes in Wien eingesetzt. Der Preis für Kaliumkarbonat liegt bei etwa 320 bis 540 €/t.

Safecote und andere Zuckerderivate

Abfallprodukte aus der Zuckerproduktion haben ebenfalls eine Tauwirkung. Die Ausbringung auf der Straße erfolgt ähnlich wie bei CaCl_2 in der Sole bei der Feuchtsalzstreuung. Als wesentliche Vorteile werden die Gefrierpunktabenkung, der geringere notwendige Salzverbrauch sowie eine Verringerung von Korrosion (Inhibitorwirkung) genannt. Als Nachteil kann der ebenfalls deutlich höhere Preis gegenüber NaCl mit ca. 300 bis 350 €/t sowie der Patentschutz (keine Alternativenanbieter) gesehen werden.

Weitere potentielle Streumittel mit tauenden Eigenschaften aber ohne praktische Bedeutung im Straßenbetrieb sind:

- Harnstoff $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$

4 Streumittel

- Ammoniumsulfat $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- Natriumacetat $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO})$
- Kaliumformiat $\text{K}(\text{HCOO})$

4.2.5 Übersicht über Taumittel

Tabelle 4.4 gibt einen Überblick über die wichtigsten Kennwerte² der im Winterdienst eingesetzten Taumittel.

	Natrium- chlorid	Kalzium- chlorid	Magnesium- chlorid	CMA (25%ige Lösung	Kalium- karbonat
Molare Lösungsenthalpie [J/(K·mol)]	+4	-81	-46	+15	
Chemische Formel	NaCl	CaCl ₂	MgCl ₂	s.o.	K ₂ CO ₂
Hygroskopizität	gering	stark	stark	stark	mittel
Löslichkeit in Wasser [g/l]	359	740	542	k.A.	1.120
eutektischer Punkt [°C]	-21,3	-55,0	-33,0	-19,0	-36,5
eutektische Konzentration [%]	22,4	30,2	21,4	k. A.	39,5
spez. Masse [g/cm ³]	2,17	2,16	2,32	1,12	2,43

Tabelle 4.4: Gegenüberstellung der chemischen Eigenschaften und Kosten der häufigsten Tausalze

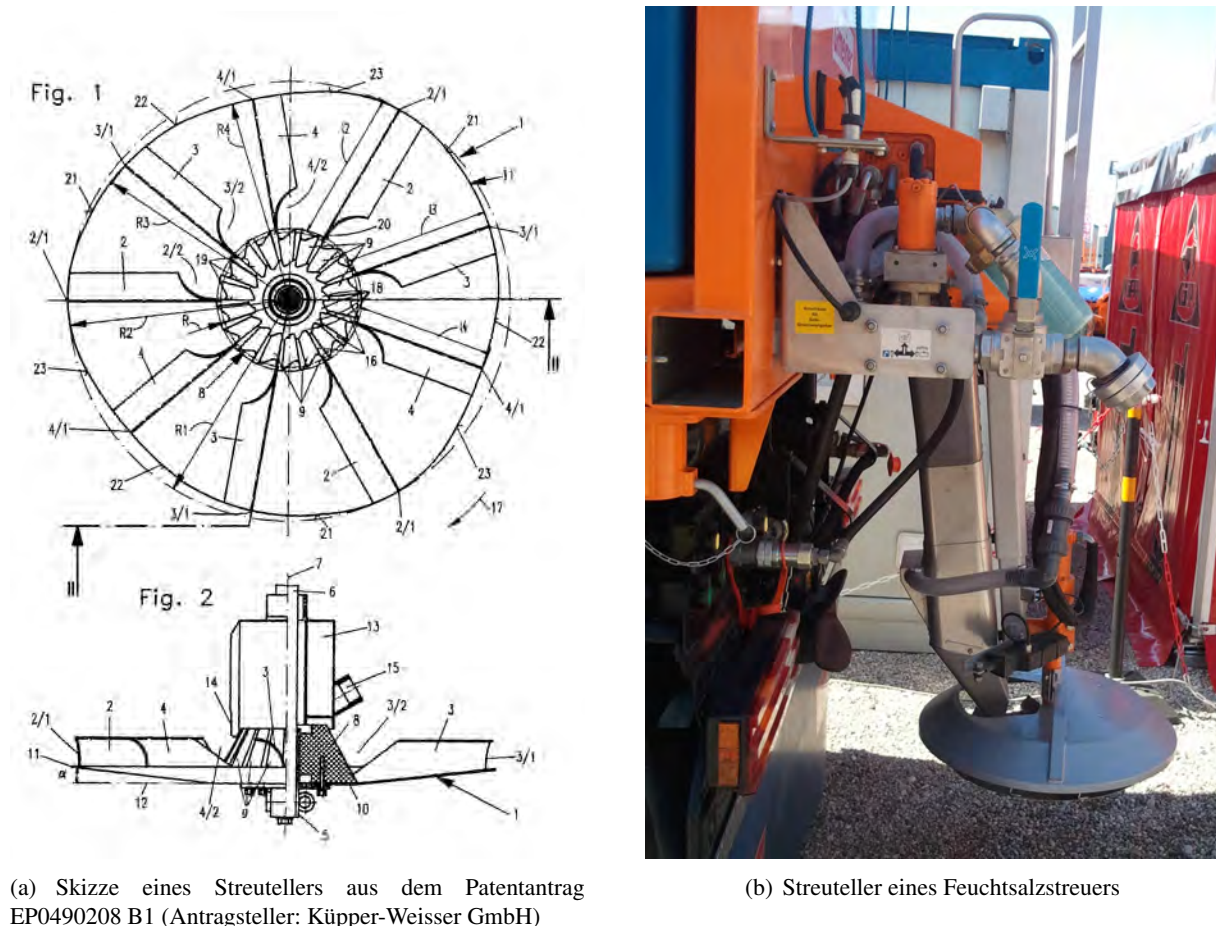
Einsatzbereiche auftauender Streumittel

Auftauende Streumittel sind auf Autobahnen, Schnellstraßen, Landesstraßen und in größeren Städten in Europa die Mittel der Wahl. Durch die rasche Weiterentwicklung der Feuchtsalztechnik und den damit verbundenen geringen Salzverbrauch ist generell ein Trend zu auftauenden Streumitteln erkennbar.

²Negative Werte der molaren Lösungsenthalpie bedeuten eine exotherme Reaktion

4.3 Arten der Taumittelausbringung

Die einfachste, aber auch ineffizienteste Art Streumittel auszubringen ist die manuelle Verteilung per Hand, die praktisch nur noch von Einzelpersonen zum Streuen von kleineren Flächen angewandt wird. Für den Einsatz im Straßenwinterdienst hat sich die maschinelle Ausbringung über einen *Streuteller* durchgesetzt, welcher für eine gleichmäßige Ausbringung des Streumittels sorgt (Abbildung 4.3). Das Streumittel wird über Schnecken bzw. Bänder aus dem Behälter in ein Fallrohr gefördert und fällt auf den rotierenden Streuteller und wird von diesem auf die Fahrbahn geschleudert. Während der Streuteller bei alten bzw. einfacheren Geräten fix montiert ist und mit starr gekoppelter Drehzahl läuft, wird bei modernen Streuern die Neigung des Streuers und die Drehzahl elektronisch gesteuert. Dadurch kann der Fahrer Streubreiten und Streumengen festlegen, welche bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten weitgehend konstant gehalten werden können. Mittels Streuteller lassen sich prinzipiell alle rieselfähigen Streumittel ausbringen, wobei Splitt und Natriumchlorid die häufigsten Streumittel sind.



(a) Skizze eines Streutellers aus dem Patentantrag EP0490208 B1 (Antragsteller: Küpper-Weisser GmbH)

(b) Streuteller eines Feuchtsalzstreuers

Abbildung 4.3: Streuteller zum Ausbringen von Streumitteln

Die dargestellten Streuteller sind nur eine Auswahl der am Markt befindlichen Systeme, die in Form und Größe je nach Einsatztyp und Hersteller variieren. In der Regel sind die Streuteller so weit abgedeckt, dass nur jener Bereich frei bleibt, der zum Auswurf notwendig ist. Ziel der Hersteller ist die Entwicklung von Geometrien, welche ein gleichmäßiges, exakt einstellbares Streubild erzeugen und die in der Praxis vorkommenden Verklebungen von Streumitteln am Teller hintanhalten.

4.3.1 Trockensalzstreuung

Bei der Trockensalzstreuung wird, wie bei der Splittstreuung, nur das trockene, rieselfähige Streumittel (in diesem Fall Salz) über den Streuteller ausgebracht (Abbildung 4.4a). Diese ursprüngliche Art der Salzausbringung ist aufgrund der hohen Verluste durch Verwehung bei der Ausbringung nur noch in kleineren Gemeinden häufig. Die Streugeräte dieser Gemeinden sind oft noch auf Splitt ausgelegt und können damit ohne Aufwand zur Trockensalzstreuung herangezogen werden. Die Verwendung von Feuchtsalzstreuung ist bei Kleingeräten auch aufgrund der Beschränkungen durch die Nutzlast nicht zweckmäßig.

4.3.2 Feuchtsalzstreuung

Die hohen Verluste durch Verwehung des Salzes unmittelbar beim Ausbringen konnte durch die Einführung der Feuchtsalzstreuung ab den 1970er Jahren verringert werden. Bei der Feuchtsalzstreuung wird trockenes, rieselfähiges Salz auf dem Streuteller der Streufahrzeuge mit einer Salzlösung vermischt und gemeinsam ausgebracht. Dadurch kann eine bessere Ausbringung bzw. ein gleichmäßigeres Streubild bei geringeren Anfangsverlusten ermöglicht werden. Durch die Feuchtigkeit der Sole kleben die einzelnen Salzkörner zusammen und bilden größere Klumpen, die durch Wind weniger verweht werden und zusätzlich besser auf der Fahrbahn haften als trockene Salzkörner. In der Praxis bedeutet das, dass mehr Salz zum Tauen von Schnee oder Eis im Vergleich mit einer Trockensalzstreuung zur Verfügung steht bzw. die gleiche Tauwirksamkeit bei geringeren Salzverbräuchen erzielt werden kann.



(a) Trockensalzstreuung mit feinkörnigem Salz



(b) Feuchtsalzstreuung FS 30 mit 70 % rieselfähigem Salz und 30 % Sole, zusammengemischt auf dem Streuteller

Abbildung 4.4: Trockensalzstreuung im Vergleich zu Feuchtsalzstreuung FS 30

Die zur Befeuchtung des Trockensalzes eingesetzte Salzlösung hat in der Regel eine Konzentration zwischen 18 % und 23 %. Zur Herstellung der Lösung kann Natriumchlorid, Kalziumchlorid oder Magnesiumchlorid verwendet werden. Um bessere Streuergebnisse zu erreichen, werden versuchsweise diverse Zusatzmittel (z. B. Safecote oder Melasse) beigemischt. Es konnten jedoch weder in [32] noch in [24] Verbesserungen der Liegedauer des Salzes durch diese Zusatzmittel nachgewiesen werden.

Die Salzlösung wird in einem am Streugerät befestigten Tank, meist in einer Salzkonzentration von etwa 23 % als gesättigte Sole mitgeführt, ursprünglich um die Gefahr des Frierens bei sehr tiefen Temperaturen hintanzuhalten. Die Salzlösung wird entweder als Fertigmischung in Tankwagen bzw. Großkanistern geliefert oder an den Stützpunkten selbst hergestellt. Die Materialkosten der fertig gemischten und gelieferten Sole sind etwas höher, dafür fallen die Anschaffungskosten einer geeigneten Mischanlage sowie die Personalkosten weg. In der Regel ist jedoch der Betrieb einer automatischen Solemischanlage, die direkt mit einem Salzsilo und einer Frischwasserversorgung gekoppelt ist, bei größeren Straßenbetreibern am wirtschaftlichsten.

Salzlösung und trockenes Salz werden erst unmittelbar vor dem Ausbringen am Streuteller zusammengeführt, um eine schwierig zu behebbende Klumpenbildung im Gerät zu vermeiden. Je nach Hersteller geschieht dies bereits im Fallrohr oder erst direkt am Streuteller. Grund dafür ist die schwierige Lagerung von feuchtem Salz, das nicht rieselfähig bleibt und damit nicht mehr ausgebracht werden kann. Der Streuteller muss vor jeder Streufahrt augenscheinlich auf Schäden bzw. Salzurückstände kontrolliert werden, um ein gleichmäßiges Streubild gewährleisten zu können. Die Ausbringungsmenge und gleichmäßige Verteilung durch den Streuteller ist gemäß den Herstellerangaben und Dienstvorschriften laufend augenscheinlich zu überprüfen und gegebenenfalls zu justieren. Die bei der Ausbringung entstehenden, in Abbildung 4.4b erkennbaren Streufahnen sind bei den derzeit am Markt erhältlichen Streutellern nicht zu verhindern. Die Längs- und Querverteilung auf der Fahrbahn erfolgt in weiterer Folge durch den Verkehr.

Das Mischungsverhältnis zwischen Salzlösung und trockenem Salz ist von 0 % Salzlösung (Trockenstreuung) bis 100 % Salzlösung (reine Solestreuung) möglich, wobei sich ein Mischungsverhältnis von 70 % trockenem Salz und 30 % Salzlösung (FS 30) in der Praxis bewährt hat. Auch wissenschaftliche Untersuchungen, etwa von [6] weisen auf das gute Verhältnis zwischen ausgebrachter Salzmenge und geringen Streuverlusten bei FS 30 hin. Wird der Anteil der Salzlösung deutlich über 30 % erhöht, führt dies zu Klumpenbildung und einer Verschlechterung des Streubildes. Weiters wird die Menge an effektivem Tausalz bei gleicher Streumenge durch die Wasserzugabe reduziert, wodurch die taubare Schneemenge stark absinkt.

Neuere Untersuchungen aus der Saison 2013/2014 in Niederösterreich [52] zeigen jedoch, dass sich mit einem Anfeuchtungsgrad von 50 % bis 70 % ebenfalls sehr gute Ergebnisse erzielen lassen, sofern die Streuer korrekt kalibriert wurden. Bei diesen Untersuchungen wurde die Restsalzmenge bei unterschiedlichen Anfeuchtungsgraden untersucht sowie die Wirkung durch die Fahrer bewertet. Aufgrund der geringen Schneemengen im Untersuchungszeitraum im Winter 2013/14 sind jedoch noch Ergebnisse bei hohen Schneemengen ausständig. Insgesamt zeigt sich ein hohes Optimierungspotential in der Technik zur Streumittelausbringung.

4.3.3 Solestreuung

Trotz deutlicher Verringerung der Anfangsverluste durch den Wechsel von Trockensalzstreuung zu Feuchtsalzstreuung sind diese mit bis zu 60% weiterhin sehr hoch (siehe Kapitel 6.1.1 bzw. [31]). Die naheliegende Lösung einer weiteren Erhöhung des Flüssigkeitsanteils bei der Feuchtsalzstreuung ist aufgrund der ungünstigen Ausbringung von Flüssigkeit über den Streuteller eingeschränkt. Seit etwa 2008 wird in Deutschland verstärkt über den Einsatz von Solesprüngeräten nachgedacht, die Sole über Düsen ausbringen. Der Salzbehälter am Fahrzeug wird durch einen großen Tank ersetzt und der Streuteller durch Düsen bzw. Sprühbalken (Abbildung 4.5). Aufgrund des direkten Aufsprühens der Sole auf die Fahrbahn können die Austragungsverluste gering gehalten werden.

Als größter Nachteil der Solestreuung hat sich in der bisherigen Praxis die geringe Menge an tauwirksamer Substanz bei gleichem Ladungsgewicht ergeben. Dies führt einerseits zu geringen Mengen an ausgebrachtem tauwirksamem Salz bei gleicher Reichweite bzw. verkürzter Reichweite bei Ausbringung der gleichen Menge an tauwirksamer Substanz. Dies gestaltet den Einsatz reiner Sprühfahrzeuge in Österreich schwierig, da aufgrund der Topographie starke Schneefälle keine Seltenheit sind. In Städten wie Hamburg, die durch die Lage am Meer auch im Winter Niederschläge häufig in Form von Regen erwarten und wo die Bekämpfung der Reifglätte ein wichtiges Thema ist, wird seit einiger Zeit reine Solestreuung durchgeführt.

Ob Feuchtsalzstreuung oder reine Solestreuung sinnvoller ist, muss anhand einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung je nach Einzelstandort geklärt werden, wie etwa in [57].

4.3.4 Variable Streuung

Um die Vorteile der reinen Solestreuung nutzen zu können, ohne die Nachteile in Kauf nehmen zu müssen, wurden von einigen Herstellern Streugeräte entwickelt, die sowohl Feuchtsalzstreuung als auch Flüssigkeitssprühung und Kombinationen aus beiden beherrschen. Dazu hat etwa unter anderem die Firma Küpper-Weisser neben dem Streuteller zur Ausbringung von Feuchtsalz eine Reihe von Sprühdüsen angebracht, die eine Ausbringung von Sole auf einer Breite von 3,75 m direkt hinter dem Fahrzeug ermöglichen. Weiters wurden jeweils vier Strahldüsen links bzw. rechts angeordnet, um eine Gesamtstreubreite bis 11,25 m zu erzielen (Abbildung 4.5b).

Insgesamt soll mit dieser Anordnung ein gleichmäßiger „Vorhang“ aus Sole hinter dem Streufahrzeug erzeugt werden, der eine flächendeckend gleichmäßige Ausbringung ermöglicht. Aufgrund der Situierung der Fächerdüsen über dem Streuteller wird bei eingeschalteter Solestreuung der Vorhang über das mittels Streuteller ausgebrachte Streugut erzeugt. Dadurch ist es möglich, beliebige Verhältnisse aus Trocken- bzw. Feuchtsalz (voreingestellt auf FS 30) und Sole zu erzeugen und eine variable Dosierung zwischen FS 30 und FS 100 zu erreichen. Eine direkte Einstellung des Verhältnisses von Trocken- zu Feuchtsalzstreuung ist nicht möglich. Vielmehr kann die Streumenge trocken bzw. feucht separat über die ausgebrachte Menge Sole eingestellt werden. Soll ein exaktes Verhältnis (etwa FS 70) erreicht werden, müssen daher die jeweils auszubringenden Mengen im Voraus berechnet werden und Routenlänge sowie Ladekapazität abgestimmt werden.



(a) Reine Solestreuung über Fächerdüsen



(b) Kombination aus reiner Solestreuung und Feuchtsalzstreuung

Abbildung 4.5: Reine Solestreuung und Kombination aus Sole- und Feuchtsalzstreuung

Seit 2013 werden auch in Österreich (Untersuchungen in [57] oder [34]) vermehrt Allzweckstreugeräte eingesetzt, um den Salzverbrauch bei gleichbleibender Qualität des Winterdienstes zu senken. Neben der Anschaffung der Streuer ist oft auch die Infrastruktur, etwa durch automatische Solemischanlagen, an die neue Technologie anzupassen. Nicht zu vergessen sind die Fahrer, die neuen Technologien häufig kritisch gegenüberstehen und gut geschult werden müssen, um die Technik richtig einsetzen zu können. Nur so kann das notwendige Vertrauen aufgebaut werden, das notwendig ist, um das Einsparungspotential voll ausschöpfen zu können.

4.4 Tauvorgang

Werden anorganische Salze in Wasser gelöst, entsteht aus den Komponenten (flüssigem H₂O und festem Salz, beispielsweise NaCl) eine Lösung, die bis zum Erreichen der Sättigungskonzentration keine festen Teile enthält, jedoch andere physikalische Eigenschaften aufweist als die jeweiligen Einzelkomponenten. Beim Lösungsprozess werden die einzelnen Ionen der Salzkristalle von H₂O-Molekülen entsprechend den elektrischen Ladungen umlagert und schließlich aus der Kristallstruktur gelöst (Abbildung 4.6).

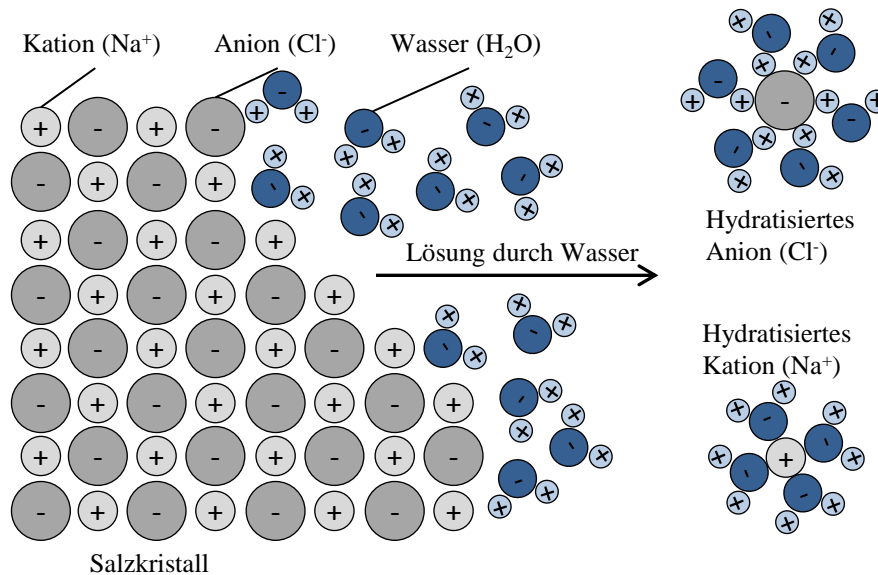


Abbildung 4.6: Schematisches Lösen eines NaCl-Kristalles in Wasser

4.4.1 Temperaturänderung beim Lösungsprozess

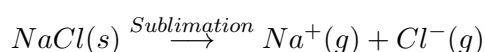
Die Enthalpie H ist eine thermodynamische Zustandsgröße und beschreibt die Wärmemenge, die ein System mit der Umgebung austauscht. Sie wird zweckmäßig als eine Funktion der inneren Energie U und der Volumenarbeit pV dargestellt (Gleichung 4.1).

$$H = U + pV \quad (4.1)$$

Es bedeuten:

- H - Enthalpie
- U - innere Energie
- pV - Volumenarbeit

Für den Winterdienst ist speziell die Reaktionsenthalpie von hohem Interesse, da mit dieser das Abkühlen der Straßenoberfläche nach der NaCl-Ausbringung bzw. die Erwärmung der Sole bei der Herstellung einer CaCl₂-Sole berechnet werden kann. Die beim Lösungsvorgang umgesetzte Energie wird *Lösungsenthalpie* genannt und äußert sich in einer Änderung der Temperatur der Lösung wobei eine Erwärmung als exotherme Reaktion, eine Abkühlung als endotherme Reaktion bezeichnet wird. Die Lösungsenthalpie von Salzen beinhaltet als ersten Schritt das Separieren der Ionen aus dem Ionengitter. Dabei wird der feste NaCl-Kristall(s) in die gasförmigen Ionen Na⁺(g) und Cl⁻(g) aufgespalten.



4 Streumittel

Die dafür notwendige Energie wird als Gitterenthalpie bezeichnet und kann aus den Standard-Bildungsenthalpien ΔH_f^0 der Einzelstoffe errechnet werden. Dazu wird der in Gleichung 4.2 angegebene *Satz von Hess* angewendet, der zur Berechnung der Enthalpieänderung herangezogen wird. Für NaCl beträgt die Gitterenthalpie +778 kJ/mol bei 25°C, womit die Bildung der gasförmigen Ionen ein extrem endothermer Prozess ist.

$$\Delta H_{\text{Reaktion}}^0 = \sum \Delta H_{f,\text{Produkte}}^0 - \sum \Delta H_{f,\text{Edukte}}^0 \quad (4.2)$$

Es bedeuten:

- $\Delta H_{\text{Reaktion}}^0$ - Reaktionsenthalpie [kJ/mol]
- $\Delta H_{f,\text{Produkte}}^0$ - Standardbildungsenthalpie der Reaktionsprodukte (Endstoffe) [kJ/mol]
- $\Delta H_{f,\text{Edukte}}^0$ - Standardbildungsenthalpie der Reaktionsedukte (Ausgangsstoffe) [kJ/mol]

Liegen die Salz-Ionen aus dem Gitter gelöst vor, kommt es zur *Solvatisierung*, in der sich weitere H₂O-Moleküle an die Ionen anlagern. Man spricht im häufigen Fall der Lösung in Wasser auch von der *Hydratisierung*, bei der dabei umgesetzten Energie von der *Hydratationsenthalpie*. Die Hydratationsenthalpie von Na⁺ und Cl⁻ Ionen basiert wiederum auf den Standard-Bildungsenthalpien bei 25°C, die bei +611 kJ/mol für Na⁺(g), -240 kJ/mol für Na⁺(aq), -244 kJ/mol für Cl⁻(g) und -167 kJ/mol für Cl⁻(aq) liegt.



Im Gegensatz zur Gitterenthalpie ist die Hydratationsenthalpie für NaCl mit -774 kJ/mol stark exotherm. Die Berechnung der Gitter- und Hydratationsenthalpie von NaCl aus den Standardbildungsenthalpien ist in Abbildung 4.7 schematisch, aber nicht maßstabsgetreu in der Form von Born-Haber-Kreisprozessen [43] skizziert, die bei bekannten Standardbildungsenthalpien die restlichen Größen ermitteln lassen. Dabei zeigt sich die entstehende Gitter- bzw. Hydratationsenthalpie als übrig bleibende Differenz nach Addition der Standard-Bildungsenthalpien wobei sowohl theoretische Rechenrichtung als auch eine an die Vorzeichen angepasste Berechnung dargestellt sind.

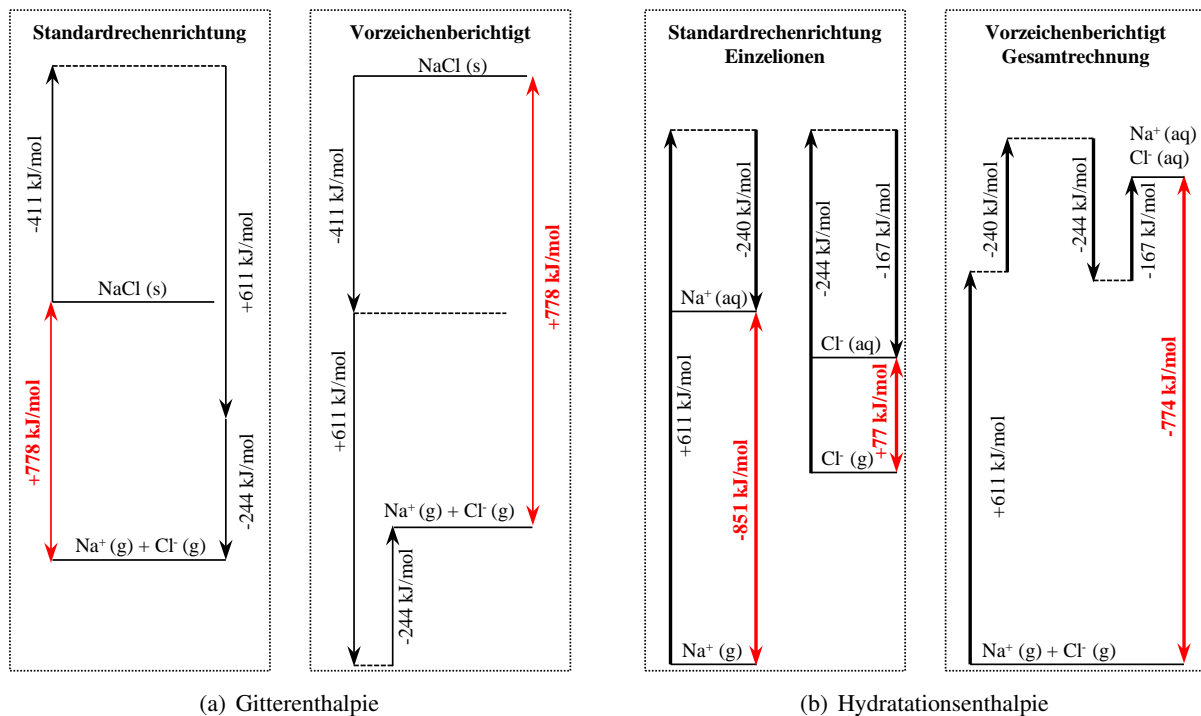


Abbildung 4.7: Gitterenthalpie und Hydratationsenthalpie von NaCl bei 25°C

Die im gesamten Lösungsvorgang umgesetzte Energie wird als Lösungsenthalpie bzw. Reaktionsenthalpie ΔH_R^0 bezeichnet und setzt sich aus der Gitterenthalpie und der Hydratationsenthalpie zusammen. Die Berechnung der Lösungsenthalpie von NaCl in Wasser bei 25°C in Gleichung 4.3 und Gleichung 4.4 zeigt, dass die Reaktion leicht endotherm ist, also Energie benötigt wird, wodurch eine leichte Abkühlung stattfindet. Da die Lösungsenthalpie eine temperaturabhängige Größe ist, sind die angeführten Berechnungen nur bei der angegebenen Temperatur von 25°C exakt. Die Abweichungen sind jedoch gerade für NaCl-Lösungen sehr gering, eine detaillierte Betrachtung zum NaCl-H₂O-System findet sich in [2].

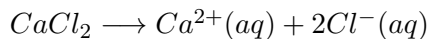
$$\Delta H_L = \Delta H_{gitter} + \Delta H_{hydr} \quad (4.3)$$

Es bedeuten:

$$\begin{aligned} \Delta H_L & - \text{Lösungsenthalpie [kJ/mol]} \\ \Delta H_{gitter} & - \text{Gitterenthalpie [kJ/mol]} \\ \Delta H_{hydr} & - \text{Hydratationsenthalpie [kJ/mol]} \end{aligned}$$

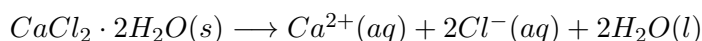
$$+778 \text{ kJ/mol} + (-851 \text{ kJ/mol} + 77 \text{ kJ/mol}) = +4 \text{ kJ/mol} \quad (4.4)$$

Mit Hilfe dieser Berechnungsmethode können Lösungsenthalpien für verschiedene Taumittel angegeben werden und endotherme bzw. exotherme Effekte berechnet werden. So kann die bei der Herstellung einer CaCl₂-Lösung typischerweise entstehende Wärme genau beziffert werden. Dabei muss unterschieden werden in welcher Reinheit bzw. chemischen Form das Salz vorliegt, da Hydratformen stark abweichende Enthalpien besitzen können. Die Lösungsenthalpie für reines Calciumchlorid kann nach Gleichung 4.5 mit -81 kJ/mol bestimmt werden, was einer relativ starken exothermen Reaktion entspricht. Tatsächlich werden beim Mischen einer 30%igen Sole unter Verwendung von CaCl₂-Pellets mit 94 % bis 98 % Reinheit Temperaturen über 80°C erreicht.



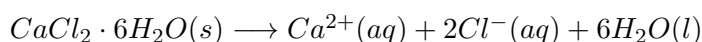
$$\Delta H_R^0 = -543 \text{ kJ/mol} - 2 \cdot 167 \text{ kJ/mol} - (-796 \text{ kJ/mol}) = -81 \text{ kJ/mol} \quad (4.5)$$

Die Lösungsenthalpie des Calciumchloriddihydrats CaCl₂·2 H₂O beträgt mit -46 kJ/mol nur noch knapp die Hälfte des reinen Salzes, ist jedoch immer noch exotherm. Die geringere Enthalpie wird durch die beiden H₂O-Moleküle verursacht, die sowohl bei der Gitterenergie, als auch bei der Hydratationsenthalpie berücksichtigt werden müssen.



$$\Delta H_R^0 = -543 \text{ kJ/mol} - 2 \cdot 167 \text{ kJ/mol} - 2 \cdot 286 \text{ kJ/mol} - (-1403 \text{ kJ/mol}) = -46 \text{ kJ/mol} \quad (4.6)$$

Das noch weiter hydratisierte Calciumchloridhexahydrat CaCl₂·6 H₂O hat bereits 6 H₂O-Moleküle in der Kristallstruktur aufgenommen, welche bei der Lösungsenthalpie berücksichtigt werden. Diese wird in Gleichung 4.7 mit +15 kJ/mol errechnet, womit im Gegensatz zu den beiden anderen Calciumchloridformen eine endotherme Lösungsreaktion vorherrscht.



$$\Delta H_R^0 = -543 \text{ kJ/mol} - 2 \cdot 167 \text{ kJ/mol} - 6 \cdot 286 \text{ kJ/mol} - (-2608 \text{ kJ/mol}) = +15 \text{ kJ/mol} \quad (4.7)$$

Die unterschiedlichen Lösungsenthalpien von CaCl₂ in Reinform bzw. in Hydratform sind ausschlaggebend für die Beschaffung von Tausalz, wenn mit einer Erwärmung der Sole im Zuge des Mischens gerechnet wird. Die Hydrate kommen vor allem in CaCl₂-Schuppen mit geringer Reinheit vor. Bei län-

gerer Lagerung von CaCl_2 kann es durch die Luftfeuchtigkeit zu Hydratbildung kommen, welche die Reinheit mit der Zeit herabsetzt.

Auf die gleiche Weise kann auch für andere Taumittel die Lösungsenthalpie berechnet werden. In Tabelle 4.5 sind Werte der Enthalpien für gängige Taumittel in Rein- bzw. Hydratform angeführt. Dabei zeigen positive Werte eine endotherme Reaktion an, die zu einer Abkühlung führt, negative Werte bedeuten eine exotherme Reaktion mit einer Erwärmung.

		NaCl	CaCl ₂	CaCl ₂ ·2H ₂ O	CaCl ₂ ·6H ₂ O
molare Lösungsenthalpie	[J/(K·mol)]	+4	-81	-46	+15
molare Masse	[g/mol]	58,44	110,98	147,01	219,08
spezifische Lösungsenthalpie	[kJ/(K·kg)]	68,44	-729,86	-312,89	68,47
spezifische Erwärmung ΔT	[K]	-4,09	43,59	18,69	-6,59
Soletemperatur ($T_{\text{Wasser}}=10^\circ\text{C}$)	[$^\circ\text{C}$]	5,91	53,59	28,69	3,41

Tabelle 4.5: Lösungsenthalpien gebräuchlicher Tausalze

Um den Tauvorgang und die stattfindenden thermischen Vorgänge abzubilden, wurde ein Streuvorgang mit NaCl in einem Schneefeld mit der Thermokamera dokumentiert (Abbildung 4.8). Dazu wurde auf eine abgegrenzte Fläche von etwa 2 mal 2 m Neuschnee mit einer Schneehöhe von etwa 7 cm per Hand Trockensalz (NaCl) ausgestreut. Die Tauwirkung setzt unmittelbar nach dem Streuen mit der Herabsetzung der Temperatur ein. Bei diesem endothermen Vorgang wird Energie benötigt, die aus der Wärme des Schnees bezogen wird, wodurch die Oberflächentemperatur der Schneedecke abfällt. Im konkreten Fall hat der Schnee ursprünglich eine Temperatur von -12°C (Abbildung 4.8(a)), die unmittelbar nach der Salzstreuung auf etwa -20°C sinkt. In Abbildung 4.8(b) ist noch eine unregelmäßige Temperaturverteilung zu erkennen, die durch die Ausbringung des Salzes per Hand entsteht. Bereits zwei Minuten später ist der Tauvorgang gemäß Abbildung 4.8(c) so weit fortgeschritten, dass sich ein gleichmäßigeres Temperaturbild mit einer konstanten Temperatur von $-22,6^\circ\text{C}$ ergibt.

In Abbildung 4.8(c) ist eine an der Oberfläche gesättigte Sole mit einer Temperatur von etwa -22°C sichtbar, die nicht weiter abkühlt. Bei der folgenden weiteren Verdünnung der Sole durch den getauten Schnee steigt die Temperatur wieder an, wobei die Temperatur in Abbildung 4.8(d) immer noch deutlich unter der ursprünglichen Schneetemperatur liegt.

Im weiteren Verlauf steigt die Temperatur, wobei sich der Tauvorgang und Temperaturanstieg mit der Abnahme der Temperaturdifferenz zwischen Lösung und Schneedecke weiter verlangsamt, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Schneetemperatur und zugehöriger Solekonzentration einstellt. Eine direkte Umlegung der gemessenen Temperaturabsenkung auf die Fahrbahntemperatur ist jedoch nicht zulässig, da nur die Temperatur der obersten Schichte gemessen wurde und die Fahrbahn allein schon aufgrund der höheren Masse eine entsprechend größere Wärmespeicherkapazität besitzt.

Um die Bedeutung dieser Reaktionswärme für die Praxis zu zeigen, ist in Tabelle 4.5 die rechnerische Soletemperatur nach dem Herstellen der Sole mit Wasser angegeben. Basis für die Berechnung der Soletemperatur nach dem Lösungsvorgang ist eine spezifische Wärmekapazität von Wasser bei 10°C $c = 4,192 \text{ kJ}/(\text{K} \cdot \text{kg})$ und die in Tabelle 4.5 angegebenen Lösungsenthalpien. Die starke Erwärmung bei Verwendung von reinem CaCl_2 wird beispielsweise beim Solesprüngerät *Firestorm* eingesetzt, um warme Sole auf die Fahrbahn auszubringen (Untersuchungen in [56]). Dazu wird die Sole erst direkt vor dem Einsatz im Tank des Fahrzeuges gemischt, wobei in der Praxis Soletemperaturen von bis zu 65°C erreicht werden.

Wärmeeintrag auf die Fahrbahn

Die spezifische Wärmekapazität einer 30%igen CaCl_2 -Sole bei 65°C beträgt $2,903 \text{ kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$, die Solumdichte $1,2816 \text{ g}/\text{cm}^3$. Für einen gefüllten Tank mit 9 m^3 ergibt sich daraus eine Solemenge von ca.

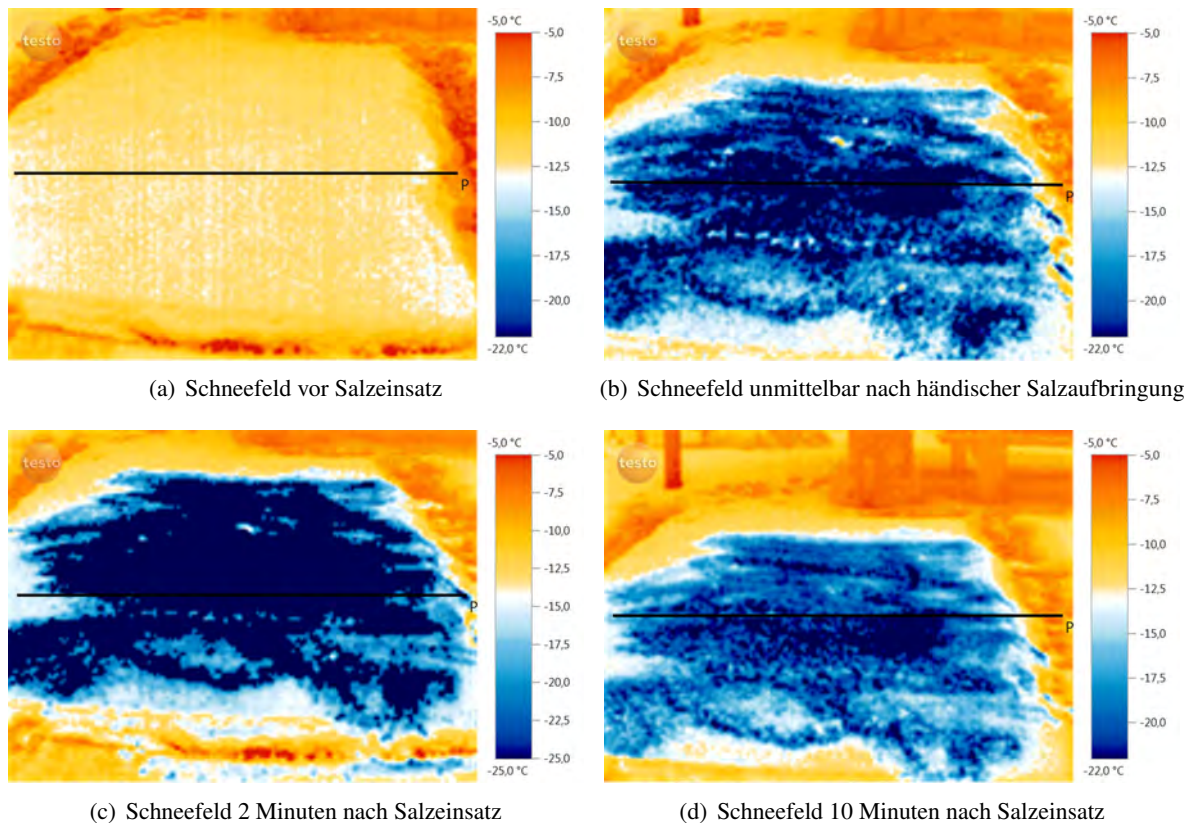


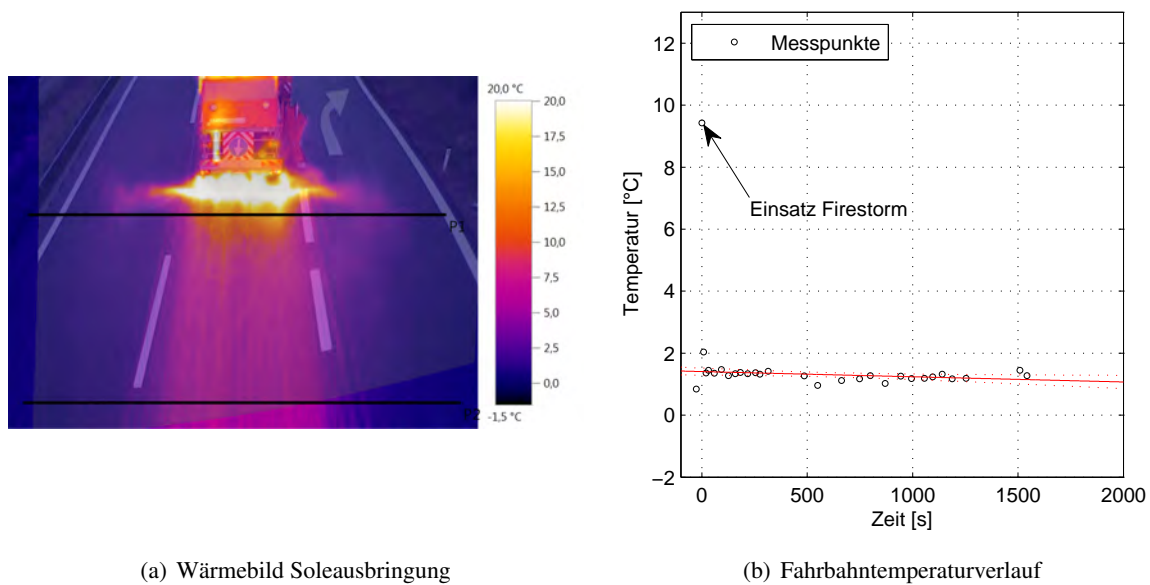
Abbildung 4.8: Thermografische Aufnahmen eines Schneefeldes vor und nach manueller Salzausbringung. Quelle: [31]

11.500 kg und eine gesamte Wärmemenge von ca. 33.500 kJ. Durch vergleichsweise geringe Streumengen von weniger als 100 g/m^2 , ist jedoch nur mit einer geringen Temperaturerhöhung der Fahrbahn zu rechnen.

Bei einer Ausbringungsmenge von 20 g/m^2 CaCl_2 effektivem Taumittel (entspricht ca. $66,67 \text{ g/m}^2$ 30%iger Sole) ergibt sich eine spezifische Wärmemenge von $12,58 \text{ kJ/m}^2$, die durch die Sole in die Fahrbahn eingebracht wird. Ein Teil dieser Energie erhöht die Temperatur der Fahrbahndecke, wobei an dieser Stelle einige Vereinfachungen vorgenommen werden. So wird vorausgesetzt, dass die gesamte Wärmeenergie in die Fahrbahn eindringt, wobei nur der oberste Zentimeter herangezogen wird.

Eine 1 cm starke Schicht aus Asphalt (Basaltsplitt) mit einer spezifischen Wärmekapazität von $0,88 \text{ kJ/(K}\cdot\text{kg)}$ und einer Dichte von 2.560 kg/m^3 hat eine spezifische Wärmekapazität von $22,53 \text{ kJ/m}^2$ [67]. Wird auf diese Fahrbahn Sole mit 65°C aufgebracht kommt es unter den getroffenen Vereinfachungen zu einer Erwärmung um $0,56^\circ\text{C}$. Eine weitere Verteilung in tiefere Schichten der Fahrbahn bzw. ein Abstrahlen von Wärme in die Atmosphäre wurden noch nicht miteinbezogen. Auf eine vertiefte Betrachtung der Wärmetransporte vom Streumittel auf die Asphaltdecke und die Umgebung wurde daher in weiterer Folge aufgrund des geringen Temperatureintrags verzichtet.

Zur Überprüfung dieser theoretischen Überlegungen wurden mittels einer Thermokamera in [56] Versuche durchgeführt, um den zeitlichen Verlauf der Fahrbahntemperatur nach einer Solesprühfahrt zu dokumentieren. Konkret wurden am 24.1.2012 in engen Zeitintervallen nach der Streufahrt mit dem Firestorm thermografische Aufnahmen der A 21 im Bereich der Anschlussstelle Heiligenkreuz gemacht. In Abbildung 4.9(a) ist in der Überlagerung aus thermografischer Aufnahme und Echtfarbbild die Fahrbahnerwärmung sehr gut zu erkennen.



(a) Wärmebild Soleausbringung

(b) Fahrbahntemperaturverlauf

Abbildung 4.9: Überlagerung Thermoaufnahme mit Echtfarbbild des Firestorm und Auswertung der Temperaturdifferenzen. Quelle: [56]

Der in Abbildung 4.9(b) deutliche Anstieg auf etwa 9,5 K zum Zeitpunkt $t=0$ stellt jene Messung dar, die direkt nach dem Aufsprühen der Sole erfolgte, und in Abbildung 4.9(a) der Temperatur im Profil P1 entspricht. Unmittelbar danach sinkt die Fahrbahntemperatur wieder auf den Ausgangszustand zurück. Eine etwaige Erhöhung der Fahrbahnoberflächentemperatur beschränkt sich auf Basis dieser Messungen wie aus der Berechnung erwartet auf wenige Minuten direkt nach der Streufahrt. Danach kehrt die Temperaturdifferenz zwischen viel befahrenen Fahrstreifen und anderen Fahrbahnteilen auf das Ausgangsniveau zurück.

Neben den thermografischen Messungen auf der Fahrbahn wurden auch an einem gesperrten Parkplatz Thermobilder von Streufahrten auf festgefahrener Schneedecke erstellt, um mögliche Auswirkungen zu dokumentieren. Exemplarische Aufnahmen in Echtfarben und Infrarot der Schneedecke mit unterschiedlichen Streuvarianten sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Dabei fällt vor allem die endotherme Lösungsreaktion von NaCl auf, das die Temperatur in den ausgebrachten Streufahrten punktuell deutlich absenkt. Durch die relativ hohe Streumenge von 30 g/m^2 ist das Salz ohne erkennbare Streufahrten relativ gleichmäßig verteilt. Während die Salzverteilung auf der thermografischen Aufnahme gut zu erkennen ist, bleibt die Verteilung auf der Echtfarbaufnahme unkenntlich. Die endotherme Reaktion von NaCl ist gut durch die blauen Punkte in Abbildung 4.10(a) erkennbar. Bei der Streuung mit warmer Sole und 7 bar Druck sind deutliche Streifen getauten Schnees in Abbildung 4.10(b) zu erkennen. Stellen mit Oberflächentemperaturen über der Umgebungstemperatur von -10°C treten jedoch nicht auf. Daraus lässt sich schließen, dass die gesamte Wärme unmittelbar für den Tauvorgang verwendet wurde.

Auf einer Fahrbahn mit Schneedecke sind die Temperaturunterschiede der Fahrbahndecke vernachlässigbar, da die Wärme unmittelbar zum Schmelzen von Schnee bzw. Eis verwendet wurde. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen zur Tauwirksamkeit. Ein Einsatz warmer Sole ist daher nur bei bereits vorhandener Schneefahrbahn sinnvoll, bei präventiven Streuungen geht der Vorteil der schnelleren Tauwirksamkeit infolge der höheren Soletemperatur bereits in kürzester Zeit verloren.

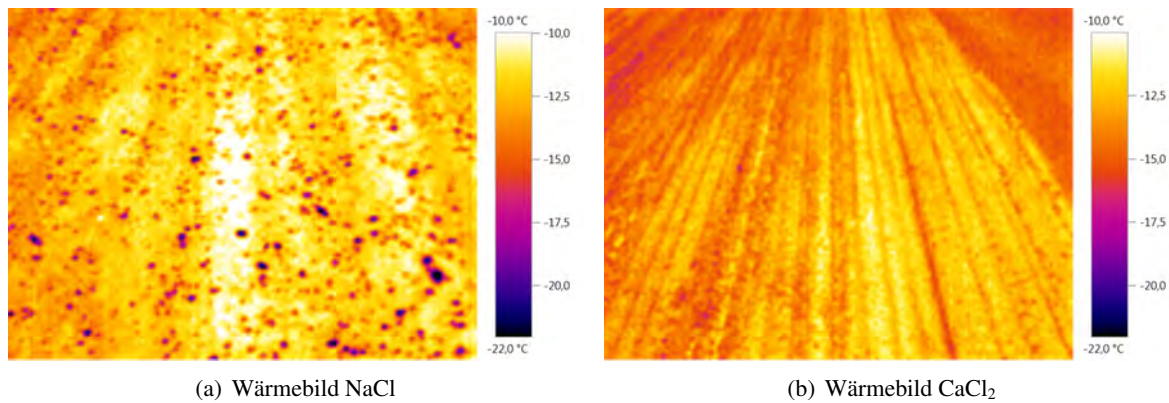


Abbildung 4.10: Thermografische Aufnahmen der Teststrecke mit festgefahrenem Schnee

4.4.2 Gefrierpunktniedrigung

Bei der Lösung eines Stoffes wird der relative Dampfdruck des Lösungsmittels in Abhängigkeit der darin gelösten Molmenge verringert. Dabei hat die Art des gelösten Stoffes kaum Einfluss auf die Änderung des Dampfdruckes, lediglich die Anzahl der unabhängigen Teilchen ist relevant, wie schon von *Raoult* empirisch gezeigt (siehe [43]). Mit der Abhängigkeit von der Anzahl der unabhängigen Teilchen ist bei der Berechnung auf die Dissoziation und Assoziation zu achten. Bei der Dissoziation von NaCl zählen also sowohl Na^+ als auch Cl^- als unabhängiges Teilchen, womit deren Anzahl bei vollständiger Lösung des Salzes verdoppelt wird. Für hinreichend verdünnte Lösungen kann die Aktivität durch den Molbruch ersetzt werden und der Dampfdruck nach dem Gesetz von Raoult (Gleichung 4.8) berechnet werden. Die Aktivität a ist ein korrigiertes Konzentrationsmaß, welches den Molbruch x bei der Bestimmung des chemischen Potentials beim Wechsel von idealem zu realem Verhalten ersetzt. Eine detaillierte Herleitung dieser Zusammenhänge kann u. A. [65] entnommen werden.

$$1 - \frac{p_1}{p_1^*} = \frac{p_1^* - p_1}{p_1^*} = \chi_2 = \frac{n_2}{n_1 + n_2} \quad (4.8)$$

Es bedeuten:

- p_1 - Partialdruck bzw. Dampfdruck über der Lösung
- p_1^* - Dampfdruck des reinen Lösungsmittels
- χ_2 - Molbruch
- n_i - Molzahl der Komponente i

Aus dieser Gleichung geht hervor, dass die relative Dampfdruckerniedrigung bei gleichbleibender Konzentration konstant ist und der Dampfdruck der Lösung immer unterhalb jenes des Lösungsmittels p_1^* liegt. Die Auswirkungen der Dampfdruckerniedrigung auf Gefrierpunktabenkung und die Siedepunkterhöhung sind im schematischen Phasendiagramm in Abbildung 4.11 dargestellt, wobei der Abstand der beiden Kurven mit steigender Konzentration und damit sinkendem Dampfdruck zunimmt. In der Darstellung ist deutlich zu erkennen, dass bis zu einer Konzentration von etwa 15 M-% die Gleichung von Raoult sehr gut die Realität abbildet. Die kleine Abweichung lässt sich dadurch erklären, dass für die Versuche Leitungswasser verwendet wurde, um die Aussagen für die Praxis zu verdeutlichen. Die Verwendung destillierten Wassers, mit weniger gelösten Stoffen, würde noch näher an der berechneten Kurve liegen.

Bei einem zweiphasigen (flüssig/fest) Zweikomponentensystem (Wasser/NaCl) sind entsprechend den Phasenregeln zwei Freiheiten gegeben, die unabhängig voneinander variiert werden können, ohne dass dadurch eine Phase verschwindet. Für die Anwendung im Winterdienst ist es zweckmäßig den Druck konstant zu wählen und damit den Zusammenhang Molbruch und Temperatur darzustellen. Nach der

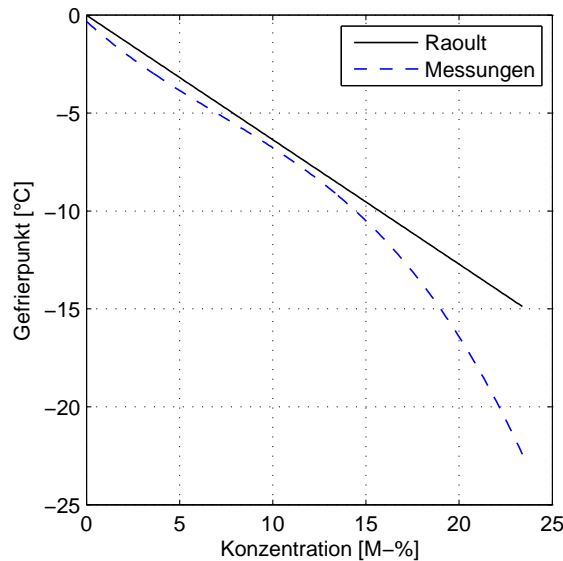


Abbildung 4.11: Phasenübergangsdiagramm einer Lösung und Gefrierpunktskurven für eine NaCl-Lösung

Einführung der Schmelzenthalpie $\Delta_m H$ und der Gaskonstante R lässt sich die Gefrierpunktniedrigung wie folgt formulieren:

$$T_m - T_m^* = -\frac{-R \cdot T_m^{*2}}{\Delta_m H} \cdot \chi_2 \quad (4.9)$$

Es bedeuten:

- T_m - Gefrierpunkt der Lösung
- T_m^* - Gefrierpunkt des Lösungsmittels
- $\Delta_m H$ - Schmelzenthalpie des Lösungsmittels
- R - Gaskonstante ($8,13451 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

Wird die Masse des Lösungsmittels m_1 mit 1 kg festgelegt, so kann für den Molenbruch χ_2 die in Gleichung 4.10 gezeigte Beziehung verwendet werden.

$$\chi_2 = \frac{M_1 \cdot m_2}{1 + M_1 \cdot m_2} \quad (4.10)$$

Es bedeuten:

- M_1 - Molmasse des Lösungsmittels
- m_2 - Molalität des Gelösten [mol je kg Lösungsmittel]

Schränkt man die Anwendung auf sehr starke Verdünnungen ein, ist $M_1 \cdot m_2 \ll 1$ und damit $\chi_2 \approx M_1 \cdot m_2$.

$$T_m - T_m^* = -\frac{-R \cdot T_m^{*2} \cdot M_1}{\Delta_m H} \cdot m_2 \quad (4.11)$$

Der Ausdruck vor m_2 ist dabei für ein Lösungsmittel stets gleich und wird als *kryoskopische Konstante* bezeichnet. Für H_2O beträgt diese Konstante $1,858 \text{ K} \cdot \text{kg/mol}$ womit eine weitere Vereinfachung der Formel für die Gefrierpunktniedrigung erreicht werden kann. Um in der Winterdienstpraxis gebräuchliche Größen zu verwenden wird die Molalität m_2 durch die Konzentration der Sole in g je kg Lösungsmittel

und die Molmasse des Taumittels in g je mol ausgedrückt. Die Dissoziation von Salzen wird dabei durch den Faktor n berücksichtigt, welcher die Anzahl der gelösten Ionen aus einem Molekül Taumittel angibt.

$$\Delta T = -\frac{K \cdot k \cdot n}{M_2} \quad (4.12)$$

Es bedeuten:

- K - kryoskopische Konstante [K·kg/mol]
- k - Konzentration des Lösung [g/kg]
- n - Anzahl der dissoziierten Ionen [-]
- M_2 - Molmasse des Taumittels [g/mol]

Dadurch wird der Phasenübergang, also der Übergang von festem, flüssigem oder gasförmigem in einen anderen Zustand verändert, wobei im Allgemeinen der Gefrierpunkt absinkt und der Siedepunkt steigt. Die Änderung des Dampfdruckes ist lediglich vom Molenbruch abhängig.

Dieser Zusammenhang gilt jedoch nur für geringe Konzentrationen, wodurch eine empirische Feststellung des Gefrierpunktes bei höheren Konzentrationen notwendig ist. Eine mathematische Beschreibung des Phasengleichgewichts ist für einige Stoffe in [17] enthalten, wobei speziell für Wasser und NaCl [2] die thermodynamischen Eigenschaften beschrieben haben.

Für die Winterdienstpraxis gebräuchliche Zusammenhänge zwischen Gefrierpunkt und Konzentration wurden daher empirisch über Versuche im Labor des Instituts für Verkehrswissenschaften an der TU Wien mit gebräuchlichen Taumitteln ermittelt (siehe Kapitel 5 und [68] bzw. [48]).

4.4.3 Tauwirksamkeit auftauender Streumittel

Die Tauwirksamkeit wurde mittels eigens entwickelter Laborversuche für verschiedene Taumittel empirisch untersucht. Der Schwerpunkt im Rahmen dieser Versuche lag in der Entwicklung neuer Versuchsmethoden, welche die Tauwirksamkeit verschiedener Taumittel unter Laborbedingungen vergleichbar machen. Zur Versuchsdurchführung wurde daher ein modifizierter Klimaschrank für das Labor des Instituts für Verkehrswissenschaften der TU Wien angeschafft. Mit diesem ist ein Hantieren mit den Proben innerhalb des Schrankes ohne Öffnen der Türe und damit ohne Veränderung der Innentemperatur möglich, wodurch erst eine entsprechende Wiederholgenauigkeit z. B. für Tau- und Gefrierversuche gewährleistet ist. Der Klimaschrank ist verglichen mit einer Kältekammer eine relativ kostengünstige Variante um Versuche bei konstanten Umgebungstemperaturen durchführen zu können.

Die zu entwickelnde Versuchsanordnung soll zudem die bei bisherigen Prüfmethode (etwa Einzel-Eisplattenversuch, ASTM) auftretenden Schwachstellen, ohne den Prüfaufwand unnötig zu erhöhen. Ziel der Versuche ist ein einheitliche, nachvollziehbare und vergleichbare Beurteilung wie schnell ein Taumittel wirkt und wie lange es seine Tauwirkung beibehält. Diese Untersuchungen werden getrennt für den Trockenanteil der Feuchtsalzstreuung, der in der Regel 70 % des ausgebrachten Streugutes ausmacht, sowie den verbleibenden Soleanteil durchgeführt. Wichtig ist diese Erkenntnis in der Praxis vor allem für die Abschätzung der Zeitspanne von der Ausbringung des Streumittels über das Einsetzen der Tauwirkung bis zur vollen Wirkungsentfaltung auf der Straße.

Ziel dieser Versuche ist es, den Prozess der Salzstreuung im Winterdienst möglichst realitätsnah in einem Labor zu simulieren und die Tauwirksamkeit unterschiedlicher Streustoffe zu vergleichen. Dazu wird die Menge an Eis bestimmt, die durch das Aufbringen eines Streustoffes von diesem in einer bestimmten Zeit abgetaut wird. Die Versuche werden bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt, um die Einflüsse der Umgebungstemperatur auf das Tauverhalten bzw. die Tauwirksamkeit zu untersuchen.

Tauwirksamkeitsversuche mit festen Taustoffen

Für praxisrelevante Aussagen ist die Tauwirksamkeit (getaute Eismenge pro Zeiteinheit) in Kombination mit der Tauwirkung (Eindringung und Taubild) bedeutend, die nach Möglichkeit durch den gleichen Versuch untersucht werden sollen, um nahe an der Praxis zu bleiben. Die Tauwirkung ist von hoher Bedeutung für Fälle von bestehenden Schnee- oder Eisflächen, die nur schwer durch das Aufbringen von Salz allein entfernt werden können. Erkenntnisse über Tauwirksamkeit und Tauwirkung können zu einem gezielten Einsatz ausgesuchter Taumittel und Körnung für die rasche Entschärfung dieser gefährlichen Situationen beitragen. Es wurden daher Versuche konzipiert und durchgeführt, die Aussagen über die tatsächliche Tauwirksamkeit von Taumitteln zulassen.

Im Wesentlichen geht es bei den Versuchen darum, unterschiedliche Salzarten und die damit verbundenen unterschiedlichen Korngrößen bezüglich ihrer Tauwirksamkeit zu vergleichen. Erste Untersuchungen aus Deutschland zeigen, dass sich größere Körner tiefer ins Eis einschmelzen und schwerer zu verwehen sind [9]. Feinere Körner besitzen hingegen eine größere spezifische Oberfläche und weisen dadurch eine raschere Tauwirkung auf. Bezüglich der im Winterdienst eingesetzten Tausalze (NaCl) werden ihrer Herkunft nach im Wesentlichen Meersalz, Steinsalz und Siedesalz unterschieden. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, unterscheiden sich die verschiedenen Salze im Wesentlichen durch die Reinheit, die Menge an Beistoffen und die Sieblinie.

Bereits bei den ersten Vorversuchen hat sich der deutliche Einfluss der Korngröße des Taumittels auf die Tauwirksamkeit gezeigt. Größere Körner tauen dabei primär einen Trichter bzw. einen vertikalen Gang durch das Eis während feinkörniges Material die Eisplatte gleichmäßiger von oben nach unten taut. Diese verschiedenen Mechanismen sind in Abbildung 4.17 auf Seite 89 dargestellt wobei auf ein korrektes Verhältnis der Kornanzahl bei gleicher Masse gelegt wurde. Ebenfalls in dieser Abbildung zu erkennen ist der sogenannten „Ice-Undercutting-Effekt“ bei dem die größeren Körner nach vollständiger Durchdringung der Eisplatte einen Trennfilm am Boden erzeugen. In der Praxis kann dieser Effekt dazu genutzt werden, bereits bestehende Schnee- oder Eisdecken rascher zu beseitigen, falls keine präventive Streuung durchgeführt wurde und der Schnee bzw. das Eis an der Fahrbahn angefroren ist.

Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsweise eines Taumittels bei verschiedener Korngröße wurden bei den Versuchen die Sieblinie der Salze berücksichtigt und bei Bedarf einzelne Kornfraktionen getrennt geprüft. Im Rahmen der Untersuchungen wurden Salze mit sehr gleichmäßigem Korndurchmesser von etwa 0,5 mm über Verteilungen von 0,125 mm bis etwa 4 mm bis hin zu Salzen mit Korndurchmessern von 8 mm getestet.

Laut RVS 12.04.16 (2011) darf der Anteil an Körnern mit einem Durchmesser von 3,15 mm 5 Masse-% nicht überschreiten, was auch für den Feinanteil von Körnern unter 0,125 mm gilt. Ein Größtkorn von mehr als 5 mm Durchmesser ist generell nicht zulässig. Ein Vergleich der Sieblinien der getesteten Salze ist in Abbildung 4.12 enthalten, bei dem sich die eng gestufte Sieblinie von Siedesalz bzw. Salz aus Industrieanlagen deutlich zeigt. Diese beiden Salztypen werden als „feine“ Salze verstanden, die eine gleichmäßigere Ausbringung am Streuteller erlauben. Während es bei Siedesalz nur wenige leistungsfähige Lieferanten am Markt gibt, findet sich eine größere Zahl an Anbietern für Steinsalz, was vor allem bei Engpasssituationen und den damit verbundenen Preissteigerungen von Bedeutung sein kann. Die Sieblinie ist nur eine von zahlreichen Anforderungen, die gemäß RVS 12.04.16 an Tausalze gestellt werden, um einen Vergleich verschiedener Anbieter auf Basis eines definierten Qualitätsstandards zu ermöglichen. Weiters ist auf dieser Basis erstmals eine Überprüfung der gelieferten Qualität möglich, wodurch sich vertragsrechtliche Vorteile ergeben.

Die Ergebnisse der Laborversuche zeigen den erwarteten Anstieg der Tauwirksamkeit in Gramm getautem Eis je Gramm Taumittel mit höher werdenden Umgebungstemperaturen gemäß Abbildung 4.13 für NaCl (grobes Salz). Der Verlauf der Tauwirksamkeitskurve kann durch eine Potenzfunktion gemäß Gleichung 4.13 angenähert werden. Die Wahl der Funktion ergibt sich aus der abnehmenden Konzentration der Taumittel bei fortschreitendem Tauvorgang bis hin zum eutektischen Gleichgewicht. Die schlech-

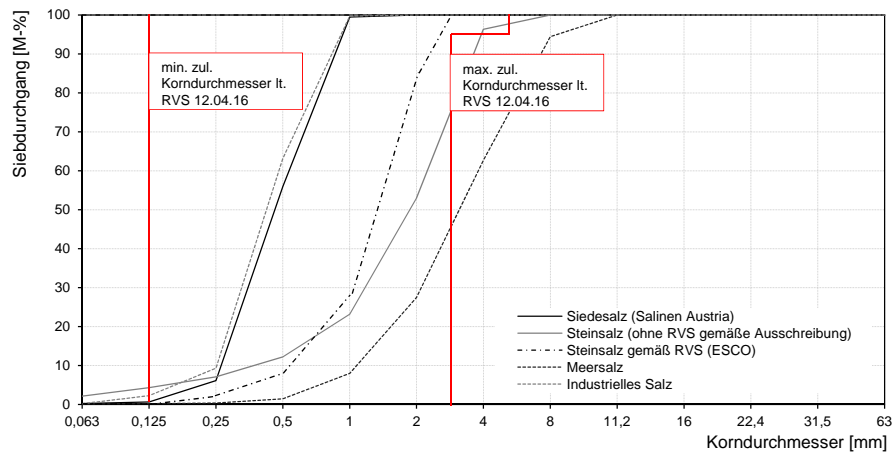


Abbildung 4.12: Sieblinien von Natriumchlorid verschiedener Hersteller und Grenzwerte gemäß RVS 12.04.16

tere Tauwirkung bei tieferen Temperaturen ergibt sich durch die höhere notwendige Solekonzentration, um ein Gefrieren zu verhindern. Insgesamt steht dadurch bei tieferen Temperaturen weniger Salz für einen länger anhaltenden Tauvorgang zu Verfügung, wodurch auch die absolute Tauwirksamkeit geringer sein muss. Die absolute Tauwirksamkeit am Ende der Versuche nach 4 Stunden ist demnach bei $-2,5^{\circ}\text{C}$ mehr als doppelt so hoch wie bei $-7,5^{\circ}\text{C}$.

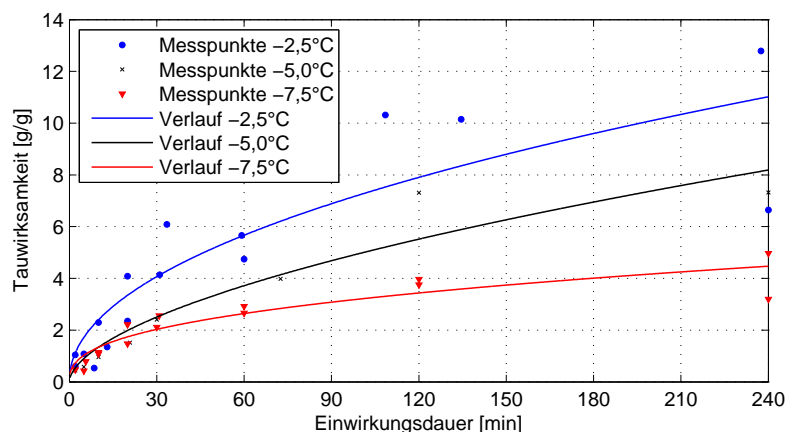


Abbildung 4.13: Messpunkte aus den Laborversuchen und Trendlinien der Tauwirksamkeit von Natriumchlorid mit Korngröße 2,0 mm bis 3,15 mm in Abhängigkeit der Versuchstemperatur ($-2,5^{\circ}\text{C}$, $-5,0^{\circ}\text{C}$ und $-7,5^{\circ}\text{C}$)

Aus praktischer Sicht ist die Taugeschwindigkeit von entscheidender Bedeutung. Dies gilt vor allem für jene Fälle, bei denen bereits Schnee oder Eis auf der Fahrbahn ist und nicht ein einsetzender Gefrierprozess etwa Reifbildung hintangehalten werden soll. In letzterem Fall tritt (eine ausreichende Streumenge vorausgesetzt) Fahrbahnglätte gar nicht erst auf, während in ersterem Fall weitgehend Glätte bis zum Ende des Tauvorgangs besteht bzw. während diesem sogar noch zunehmen kann. Die Laborversuche für grobkörniges Salz in Abbildung 4.13 zeigen, dass nach 30 Minuten erst 50 bis 60 % der gemessenen Tauwirksamkeit erreicht sind.

Der Vergleich der Tauwirksamkeiten von Kornklassen bei feinkörnigem Salz (Abbildung 4.14) und einer Versuchstemperatur von $-7,5^{\circ}\text{C}$ zeigt nach 30 min eine um 50 % höhere Tauwirksamkeit der feineren Körnungen. Gegen Ende der Versuche nach 4 Stunden nähern sich die Tauwirksamkeitskurven wieder an. Feinkörniges Salz taut also vor allem zu Beginn des Einsatzes aufgrund der großen spezifi-

sehen Oberfläche sehr rasch, nach etwa vier Stunden ist die Tauwirksamkeit beider Körnungen jedoch etwa gleich hoch.

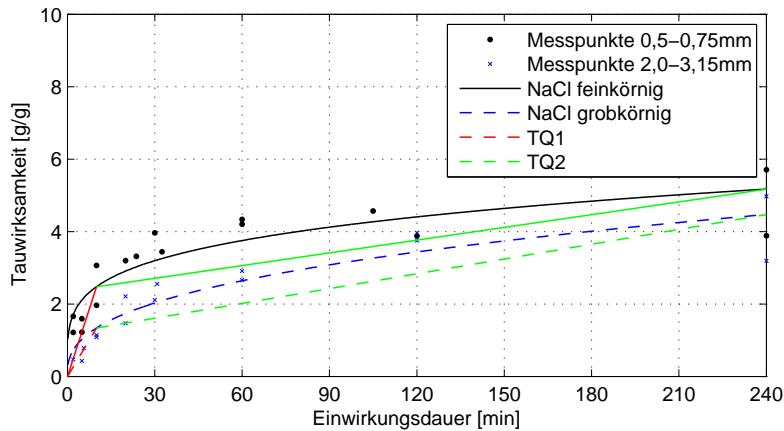


Abbildung 4.14: Messpunkte aus den Laborversuchen und Trendlinien der Tauwirksamkeit von Natriumchlorid bei gleicher Versuchstemperatur (-7,5°C), Korngruppen 0,5 bis 0,75 mm und 2,0 bis 3,15 mm sowie Tauquotienten TQ1 und TQ₁₁₋₂₄₀

Die Schwankungen der Einzelmessungen nehmen bei steigender Temperatur deutlich zu, weshalb für Vergleichsmessungen zwischen Taumitteln eine Versuchstemperatur von -5°C nicht überschritten werden sollte. Weiters wird mindestens eine 2 bis 3-malige Wiederholung der Tauversuche je Zeitschnitt und Taumittel empfohlen. Lässt man die gemessenen Einzelwerte weg und trägt die ermittelten Funktionen in einem Diagramm auf (Abbildung 4.14), zeigt sich die Dominanz der Umgebungstemperatur gegenüber dem Korndurchmesser auf die Tauwirksamkeit. Um etwa mit grobkörnigem Salz die gleiche Tauwirkung wie mit feinkörnigem Salz bei -7,5°C zu erzielen, muss die Temperatur weniger als ein halbes Grad Celsius auf -7,1°C steigen. Die Berechnung der Tauwirksamkeitskurven kann gemäß Gleichung 4.13 unter Verwendung der jeweiligen in Tabelle 4.6 angegebenen Parameter erfolgen.

$$TW = a \cdot t^b \tag{4.13}$$

Es bedeuten:

- TW - Tauwirksamkeit [g_{getaute Sole}/g_{Taumittel}]
- a, b - Parameter (für NaCl in Tabelle 4.6) [-]
- t - Zeit nach Taubeginn [min]

	Korndurchmesser 0,5 mm			Korndurchmesser 2,0 mm bis 3,15 mm		
	-2,5°C	-5,0°C	-7,5°C	-2,5°C	-5,0°C	-7,5°C
a	1,517	0,5216	1,452	0,7961	0,3606	0,5576
b	0,2692	0,4781	0,2317	0,4796	0,5697	0,3798

Tabelle 4.6: Parameter a und b für die Berechnung der Tauwirksamkeit gemäß Gleichung 4.13

Die Potenzfunktion beschreibt die Tauwirksamkeit mittels der Parameter a und b, wobei a ein Skalierfaktor ist, der die Funktion vertikal verschiebt. Parameter b beschreibt den raschen Anstieg innerhalb der ersten Minuten und das weitere Ausklingen der Tauwirkung. Der Wertebereich von b geht in den gegenständlichen Untersuchungen von 0,2 bis 0,6, wobei der Wert b=1 aus der Potenzfunktion einer Geraden mit konstantem Anstieg entspricht. Die höheren Werte von b bedeuten einen flacheren Anstieg und damit eine geringere Anfangstauwirksamkeit. Trotz der guten Übereinstimmung der Anfangstauwirksamkeit ist eine Reduzierung der Tauwirksamkeit allein auf den Parameter b aufgrund der starken Kopplung der Tauwirkung an den Parameter a nicht empfehlenswert.

Tauquotient

Eine weitere Möglichkeit der Beschreibung bietet die Analyse mittels Differenzenquotient, die für den Anfangsbereich sowie den Endbereich gemäß Gleichung 4.14 errechnet und im weiteren als Tauquotient bezeichnet wird.

$$TQ_{(t_1-t_2)} = \frac{a \cdot x_{t_2}^b - a \cdot x_{t_1}^b}{x_{t_2} - x_{t_1}} \quad (4.14)$$

Es bedeuten:

- $TQ_{(t_1-t_2)}$ - Tauquotient für den Zeitraum t_1 bis t_2 [-]
- a, b - Parameter (für NaCl in Tabelle 4.6) [-]
- x_{t_1} - Anfangszeitpunkt der Quotientenberechnung [min]
- x_{t_2} - Endzeitpunkt der Quotientenberechnung [min]

Eine Darstellung dieser Anfangs- und Endtauquotienten findet sich bereits in Abbildung 4.14, in der die unterschiedlichen Korndurchmesser des Tausalzes (NaCl) vor allem durch einen anderen Anfangstauquotienten auffallen. Der starke Unterschied in der Steigung der Anfangstauquotienten (rote Geraden) im Vergleich zum eher geringen Unterschied der Endtauquotienten (grüne Geraden) zeigt, dass eine höhere Tauwirkung bereits in der Anfangsphase erfolgen muss. Eine in den ersten 10 Minuten nicht erbrachte Tauwirkung kann durch den flachen Anstieg der Endtaugeraden im weiteren Tauprozess nur schwer nachgeholt werden. Praktisch bedeutet dies, dass mit feinkörnigem Salz deutlich raschere Ergebnisse erzielt werden können.

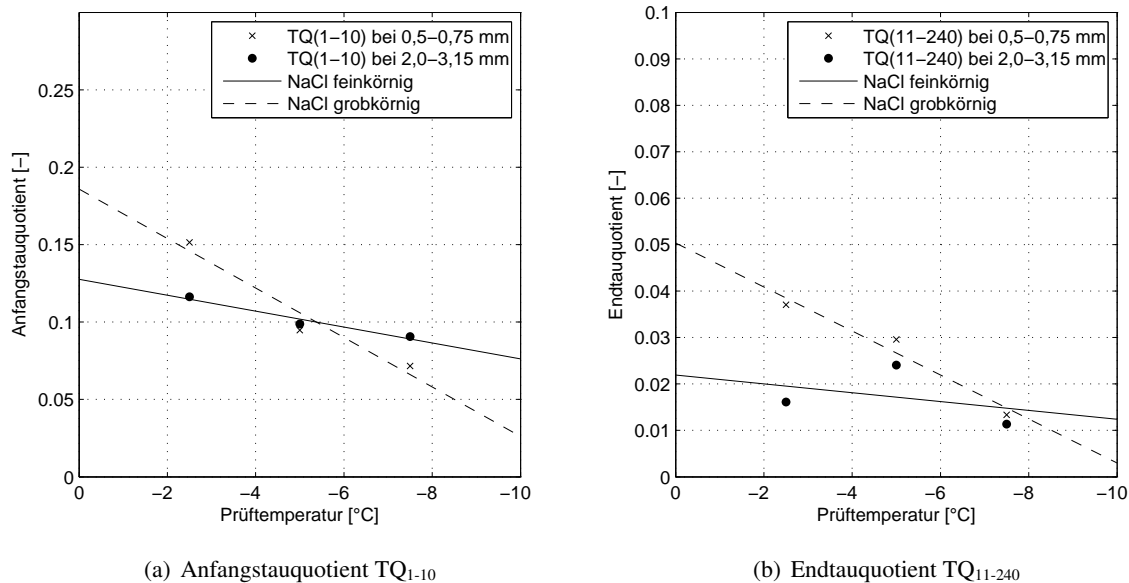


Abbildung 4.15: Tauquotient TQ_{1-10} und TQ_{11-240} für Korndurchmesser 0,5 mm bis 0,75 mm und 2,0 mm bis 3,15 mm bei Versuchstemperaturen von $-2,5^\circ\text{C}$, $-5,0^\circ\text{C}$ und $-7,5^\circ\text{C}$

Der erste Tauquotient TQ_{1-10} wurde vom Zeitpunkt $t=0$ min bis zum Zeitpunkt $t=11$ min gebildet, um die Messpunkte bei $t=10$ min noch zu erfassen. Der zweite Tauquotient TQ_{11-240} umfasst den Bereich von $t=11$ min bis zum letzten Messpunkt bei $t=240$ min. Der Zusammenhang zwischen Prüftemperatur und Tauquotient ist in Abbildung 4.15a für TQ_{1-10} und in Abbildung 4.15b für TQ_{11-240} grafisch dargestellt. Die zugunsten der besseren Lesbarkeit unterschiedliche Skalierung der Darstellungen zeigt den großen Unterschied zwischen dem hohen Anfangstauquotienten (0,1) und dem eher geringen Endtauquotienten (0,02) jedoch nicht auf. Je tiefer die Temperatur ist, umso weiter fällt TQ_{1-10} von eher grobkörnigem Tausalz mit 2 mm bis 3,15 mm gegenüber dem feinkörnigen Tausalz mit 0,5 mm bis 0,75 mm Korndurch-

messer zurück. Eine geringere Korngröße resultiert also in einer höheren Tauwirksamkeit zu Beginn des Tauvorgangs. Dieses Verhältnis kehrt sich für TQ_{11-240} besonders im Bereich von Temperaturen über $-3,0^{\circ}\text{C}$ um, sodass für geringere Korndurchmesser der Endtauquotient TQ_{11-240} bei Temperaturen über $-7,5^{\circ}\text{C}$ niedriger ist als TQ_{1-10} und annähernd konstant verläuft. Das Bestimmtheitsmaß R^2 der berechneten Tauquotienten kann Tabelle 4.7 entnommen werden.

	Korndurchmesser 0,5 mm bis 0,75 mm	Korndurchmesser 2,0 mm bis 3,15 mm
$-2,5^{\circ}\text{C}$	0,6304	0,7948
$-5,0^{\circ}\text{C}$	0,6437	0,9211
$-7,5^{\circ}\text{C}$	0,7897	0,8654

Tabelle 4.7: Bestimmtheitsmaß R^2 ausgewählter Tauquotienten

Die Tauquotienten TQ_{1-10} und TQ_{11-240} eignen sich auch, um die Wirkung von Tausalzen mit einer weiter gestuften Sieblinie abschätzen zu können. Dazu müssen die Tauquotienten gemäß Abbildung 4.15(a) in Abhängigkeit des Korndurchmessers aufgetragen werden. In diesen Darstellungen fällt die für statistische Auswertungen noch zu geringe Probenzahl auf. Wie bereits in Abbildung 4.15(b) erkennbar, ist besonders der Wert der Tauquotienten beim Korndurchmesser 0,5 mm bis 0,75 mm und Prüftemperatur $-5,0^{\circ}\text{C}$ betroffen. Die Beschreibung der Auswertungen folgt dem erkennbaren Trend, einschränkend sei jedoch auf die noch vergleichsweise geringen Versuchszahlen und Ergebnisbandbreiten verwiesen.

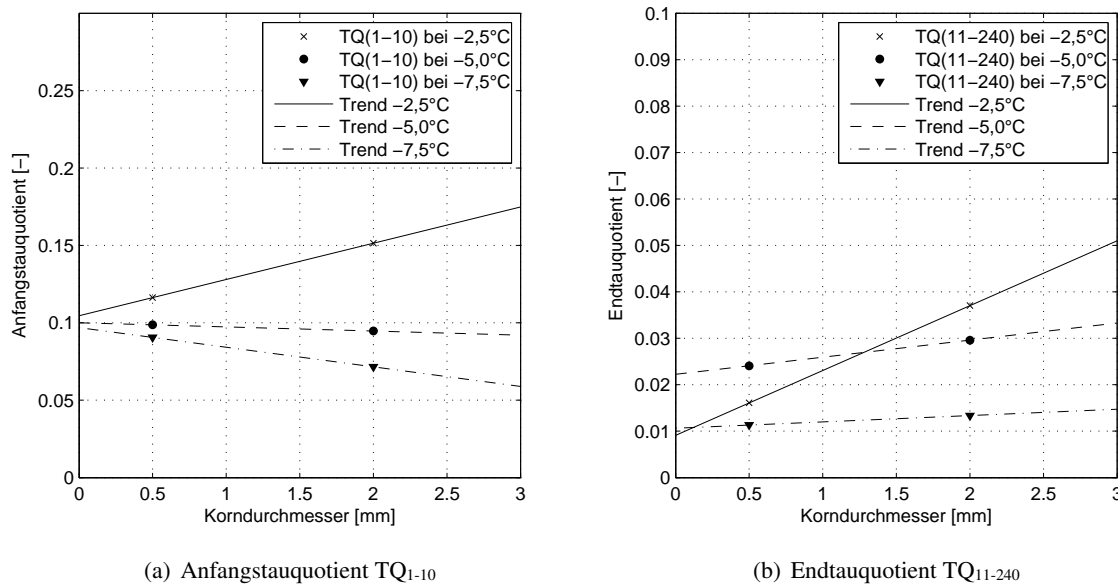


Abbildung 4.16: Tauquotient TQ_{1-10} und TQ_{11-240} nach Temperatur

Die Auswertung zeigt einen klaren Trend in den ersten 11 Minuten, bei dem der Anfangstauquotient TQ_{1-10} mit steigendem Korndurchmesser abnimmt, wobei die Abnahme bei tieferen Temperaturen stärker ist. Gegenteilig verhält es sich beim Endtauquotienten TQ_{11-240} , der mit steigendem Korndurchmesser ansteigt und bei dem tiefere Temperaturen einen geringeren Anstieg bewirken. Da die Tauquotienten nur für einzelne Kornklassen bestimmt werden können, ist es derzeit noch nicht möglich valide Aussagen über das Verhalten vollständiger Sieblinien zu treffen.

Der in den Versuchen festgestellte Unterschied der Tauwirksamkeit nach Korngröße der Streumittel liegt in der damit zusammenhängenden Wirkungsweise. Geht man bei einer Streumenge von 10 g/m^2 von den in Österreich üblichen Korngrößen 2,8 mm bzw. 0,5 mm aus und berechnet die durchschnittliche Anzahl an Körnern je m^2 , so kommt man auf etwa 70.000 bei 0,5 mm bzw. etwa 450 bei 2,8 mm Korndurchmesser. In Abbildung 4.17 ist dieses Verhältnis der Korngrößen zusammen mit der beobachteten Tauwirkung graphisch dargestellt. Die einzelnen Körner sind durch rote Punkte markiert und der

Bereich der Tauwirkung ist grau gekennzeichnet. Die spezifische Oberfläche der 70.000 feinen Körner ist mit 55.000 mm^2 etwa fünfmal so groß, wie jene der 450 gröberen Körner mit 11.000 mm^2 , wodurch auch die Kontaktfläche Salz - Eis wesentlich größer ist und die Taureaktion schneller ablaufen kann. Jedes einzelne Korn taut um sich einen flachen Kegel, dessen Durchmesser vom Korndurchmesser abhängig ist. Der kleinere Wirkungsbereich dieser Kegel wird bei einzelnen feinen Körnern durch ihre Vielzahl kompensiert und es entsteht eine annähernd gleichmäßige Fläche, auf der sich Sole bildet, die das Eis anschließend gleichmäßig von oben nach unten schmilzt.

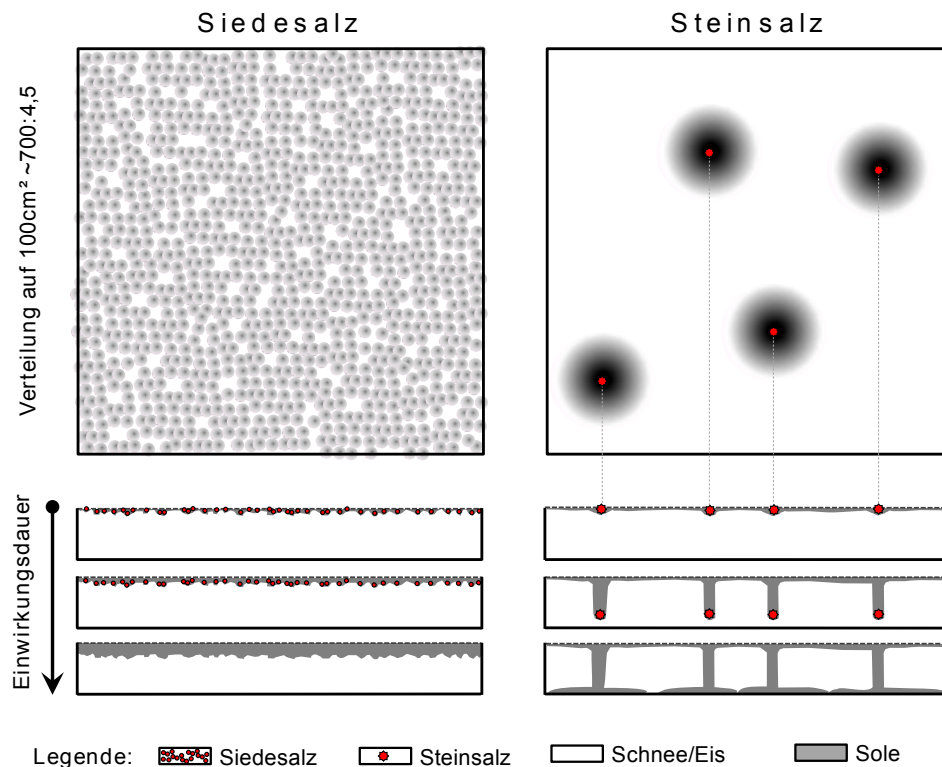


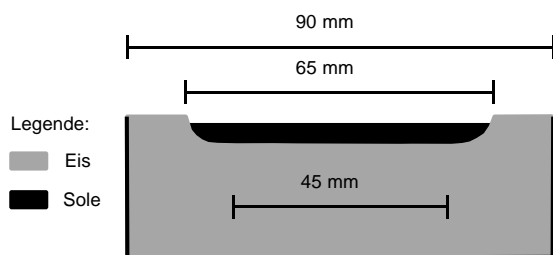
Abbildung 4.17: Schematische Darstellung der Tauwirkung kleiner und großer Korndurchmesser mit „Ice-Undercutting-Effekt“

Größere Körner tauen zuerst ebenfalls einen Kegel, der aber eine breite Grundfläche aufweist und tiefer in das Eis hineinreicht. Aufgrund der geringen Anzahl der Körner gemessen an der Fläche bildet sich jedoch kein durchgängiger Solefilm im Verlauf des Tauvorgangs, sondern es entstehen zylindrische Kanäle vertikal von oben nach unten. Beim Auftreffen auf den Untergrund unterhalb des Eises verbreitert sich dieser Kanal wieder zu einem Kegel und es entsteht ein Solefilm unter der Eisdecke. Dieser Solefilm führt zu einer stellenweisen Ablösung des Eises vom Untergrund und wirkt wie ein Trennfilm. Die Penetrationswirkung größerer Korndurchmesser zusammen mit der Bildung eines Trennfilmes kann gezielt dazu genutzt werden, um festgefrorenes Eis oder festgefahrenen Schnee so weit von der Fahrbahn zu lösen, dass diese bei der nächsten Räumfahrt leichter mit dem Pflug beseitigt werden können.

4.4.4 Tauwirksamkeitsversuche mit flüssigen Taustoffen

Neben der Tauwirksamkeit und -wirkung fester Streumittel ist für den Einsatz der Feuchtsalzstreuung auch die Tauwirksamkeit der verwendeten Sole, die in der Regel 30 % des gesamten Streuguts ausmacht (FS 30), von Interesse. Mit den Versuchen soll gezeigt werden, ob sich die Tauwirkung durch Zusätze wie z. B. Zuckermelasse im Vergleich zu reiner NaCl-Sole verbessert. Aus praktischer Sicht spielt die Tauwirksamkeit der Sole nicht nur auf der Fahrbahn eine Rolle, sondern bereits im Soletank und bei der Ausbringung des Streugutes durch den Streuteller. Bei Temperaturen von unter -7°C kommt es gemäß Berichten von Streuwagenfahrern häufig zu Verklebungen/Vereisungen auf dem Streuteller, die das Streubild wesentlich verschlechtern und durch den Winterdienstfahrer von Hand beseitigt werden müssen. Dies führt in weiterer Folge zu einem erhöhten Personalaufwand und zu verlängerten Streuintervallen. Eine höhere Tauwirksamkeit der Sole in Verbindung mit einem tieferen Gefrierpunkt kann daher dazu beitragen, diese Vereisungen des Streutellers zu verhindern.

Die Prüfgeräte entsprechen jenen, die schon für die Versuche an festen Taumitteln durchgeführt wurden, die Handsiebe wurden lediglich durch Spritzen für die gezielte Soleaufbringung ersetzt. Die Probekörperherstellung ist etwas aufwendiger, da anstatt einer glatten Eisoberfläche eine definierte Vertiefung erforderlich ist (Abbildung 4.18a), um der Sole eine konstante Angriffsfläche zu bieten. Diese Vertiefungen im Probekörper werden durch formgebende Schalen mit 65 mm Durchmesser oben und 45 mm Durchmesser am Boden durch gezielte Verdrängung des Wassers während dem Gefriervorgang erzeugt. Die formgebenden Schalen sind zur Sicherung der Lage an einem Deckel festgeklebt. Für die Tauwirkung steht demnach eine Fläche von ca. 3.320 mm^2 zu Verfügung. Der vorbereitete Probekörper bietet durch die Abrundungen keine konzentrierten Angriffspunkte für die Sole, sondern erlaubt einen gleichmäßigen Tauvorgang. Zur Aufbringung der Sole werden Spritzen verwendet, um eine genaue Dosierung von 10 ml Sole zu ermöglichen. Dadurch entfällt auch eine Wägung der Probe, was die Versuchsdurchführung erheblich vereinfacht. Getestet wurden verschiedene Konzentrationen von NaCl (10 %, 16 %, 20 %), CaCl_2 (23 %), Zuckermelasse (10 % Zuckermelasse, 90 % NaCl-Sole mit 23 % Konzentration) und Supermix (70 % Wasser, 12 % NaCl, 12 % Safecote, 6 % CaCl_2).



(a) Skizze mit Maßen eines Probekörpers



(b) Probekörper im Klimaschrank

Abbildung 4.18: Probekörper für die Tauwirksamkeitsversuche flüssiger Taumittel

Wie schon bei der Herstellung der Probekörper für feste Taustoffe werden alle notwendigen Geräte und Probekörper in den Klimaschrank geräumt und dieser wird auf die gewünschte Prüftemperatur eingestellt. Nach dem Gefrieren der Probekörper müssen diese allerdings kurzzeitig wieder aus dem Klimaschrank genommen werden bzw. dieser geöffnet werden, um die formgebenden Schalen zu entfernen, da dies durch die Eingriffsöffnungen nicht möglich ist. Nach einer Wartezeit von mindestens zwei Stunden zur Sicherstellung einer gleichmäßigen Prüftemperatur kann mit den eigentlichen Versuchen begonnen werden.

Im Versuch wird der Probekörper gewogen und danach 10 ml der zu prüfenden Sole mittels einer Spritze genau dosiert aufgebracht und der Probekörper für die vorgesehene Zeit im Klimaschrank beiseite gestellt. Eine ständige Durchmischung der Sole während des Versuches ist nicht vorgesehen, durch die Vibrationen des Klimaschranks ist aber eine gewisse Bewegung der Sole vorhanden. Nach dem Ablauf der vorgesehenen Zeit wird die getaute Sole aus dem Probekörper abgegossen und gewogen. Zur Kontrolle kann der Probekörper mit dem verbleibenden Eis gewogen und seine Masse von der ursprünglichen Masse abgezogen werden. Die so ermittelte Differenz entspricht der getauten Eismenge und muss mit der gewogenen abgegossenen Solemenge abzüglich aufgebrachtener Sole übereinstimmen. Bei der Kombination von niedrig konzentrierten Solen und tiefen Temperaturen kann es vorkommen, dass weniger Sole abgegossen wird als aufgebracht wurde, da ein Teil der Sole gefroren ist. Eine Bestimmung des Gefrierpunktes vorab ist daher notwendig, um eine geeignete Prüftemperatur festzulegen.



Abbildung 4.19: Arbeitsschritte bei Versuchsdurchführung: Probekörper wägen - Sole mittels Spritze aufbringen - definierte Zeit einwirken lassen - abgießen und getautes Eis und Sole wägen

Ergebnisse der Laborversuche zur Tauwirksamkeit von flüssigen Taumitteln

In einem ersten Schritt wurde eine geeignete Prüftemperatur gesucht, welche sowohl häufig vorkommenden Bedingungen entspricht, als auch eine hohe Wiederholgenauigkeit bzw. Unterscheidbarkeit der Ergebnisse erlaubt. Bei einer zu tiefen Temperatur kann es dazu kommen, dass ein Teil des aufgetragenen Taumittels am Probekörper anfriert und damit eine negative Tauwirksamkeit gemessen wird. Die Versuche wurden bei $-2,5^{\circ}\text{C}$, $-5,0^{\circ}\text{C}$ sowie $-10,0^{\circ}\text{C}$ durchgeführt, wobei die Ergebnisse für alle getesteten Taumittel einen Verlauf wie in Abbildung 4.20 aufweisen. Diesem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Tauwirksamkeit mit steigender Temperatur degressiv zunimmt. Die Tauwirksamkeitskurven von $-2,5^{\circ}\text{C}$ und -10°C liegen etwa gleich weit von jener bei $-5,0^{\circ}\text{C}$ entfernt, obwohl letztere Temperaturdifferenz mit 5,0 Kelvin doppelt so hoch ist, wie jene zwischen $-5,0^{\circ}\text{C}$ und $-2,5^{\circ}\text{C}$. Eine Prüftemperatur von $-2,5^{\circ}\text{C}$ ist nur sinnvoll, wenn es der Gefrierpunkt aufgrund der Solekonzentration zulässt und nicht die Unterschiede zwischen Taumitteln geprüft werden sollen.

Für die Prüfung eines Taumittels mit unterschiedlicher Konzentration wie in Abbildung 4.21 können hingegen die Unterschiede bei einer Prüftemperatur von $-2,5^{\circ}\text{C}$ deutlich herausgearbeitet werden. Die geprüften Natriumchloridsolen mit 10 %, 16 % und 20 % Konzentration weisen wie erwartet höhere Tauwirksamkeit bei größerer Konzentration auf. Der eigentliche Sinn der Soleverwendung im Rahmen der Feuchtsalzstreuung liegt in der Verbesserung des Streubildes und der Haftung des Streugutes auf der Fahrbahn. Aus betrieblicher Sicht ist daher die Verwendung einer Sole mit Eignung für alle Temperaturbereiche z. B. NaCl-Sole mit 20 % Konzentration von Vorteil. Eine Übersättigung sollte hingegen zur Vermeidung von Rückständen vermieden werden.

Die unterschiedlichen Tauwirksamkeiten der Solen bei einer Prüftemperatur von $-5,0^{\circ}\text{C}$ sind in Abbildung 4.21 dargestellt und können analog zu der Tauwirksamkeit fester Taumittel mit Gleichung 4.13 und den in Tabelle 4.8 angegebenen Parametern berechnet werden. Im Vergleich zu reiner NaCl-Sole mit 20 % Konzentration weisen Safecote (10 % Beimengung) eine um 20 % höhere, Supermix eine um 19 % höhere und Kalziumchlorid eine um 27 % höhere Tauwirksamkeit nach 3 Stunden auf. Der Tauwirksamkeitsunterschied zwischen Safecote-Sole und Supermix ist sehr gering. Der höheren Tauwirksamkeit von Kalziumchloridsole stehen die deutlich höheren Kosten gegenüber, wobei zusätzlich zu berücksichtigen

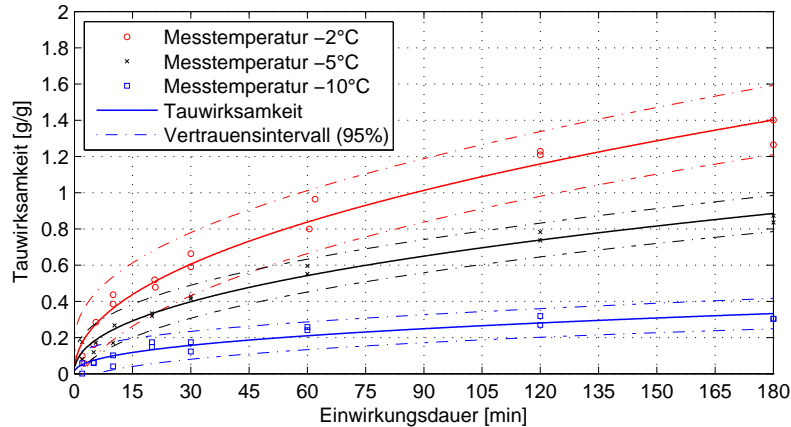


Abbildung 4.20: Messpunkte aus den Laborversuchen und Trendlinien der Taufwirksamkeit von NaCl-Sole mit einer Konzentration von 20 % bei Versuchstemperaturen von $-2,5^{\circ}\text{C}$, $-5,0^{\circ}\text{C}$ und $-7,5^{\circ}\text{C}$

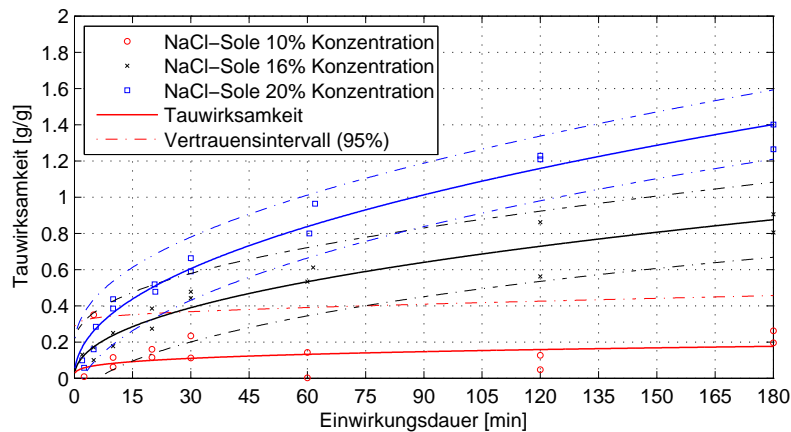


Abbildung 4.21: Messpunkte aus den Laborversuchen und Trendlinien der Taufwirksamkeit von NaCl-Sole mit einer Konzentration von 10 %, 16 % und 20 % bei einer Versuchstemperatur von $-2,5^{\circ}\text{C}$

ist, dass die Sole in der Feuchtsalzstreuung nur einen kleinen Anteil der ausgebrachten Taumittel darstellt. Wie die Auswertungen in Abschnitt 3.3.1 zeigen, sind Schneefälle bei Temperaturen unter -10°C im Schnitt einmal alle 3 bis 5 Jahre zu erwarten, weshalb mit NaCl-Sole mit 20 % Konzentration in der Regel ein Auslangen gefunden werden kann.

Im Rahmen der Versuche wurden andere flüssige Taumittel wie CaCl_2 -Lösung sowie verschiedene Zusätze auf ihre Taufwirksamkeit untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.22 sowie Tabelle 4.9 zusammengefasst. Supermix bezeichnet dabei eine Mischung aus NaCl-Sole, CaCl_2 -Lösung sowie Melassezusatz, welche von einem Autobahnmeister entwickelt wurde.

Mit der derzeit stattfindenden Entwicklung und dem vermehrten Einsatz reiner Solestreuung gewinnt die Taufwirksamkeit flüssiger Taumittel immer mehr an Bedeutung. Vorteilhaft ist dabei, dass flüssige Taumittel oft leichter zu lagern sind und viele Produkte nur in flüssiger Form eingesetzt werden können. Aufgrund des oft hohen Anteils nicht tauwirksamer Inhaltsstoffe (z. B. Wasser) sowie der im Vergleich mit festen Taumitteln geringeren Taufwirksamkeit sind die beschriebenen Versuche speziell für flüssige Taumittel von hoher Bedeutung.

	10 % Konzentration	16 % Konzentration	20 % Konzentration		
	-2,5°C	-2,5°C	-2,5°C	-5,0°C	-7,5°C
a	0,0448	0,0837	0,1229	0,0870	0,0351
b	0,2636	0,4520	0,4685	0,4466	0,4342
R ²	0,1343	0,9171	0,9709	0,9788	0,8749

Tabelle 4.8: Parameter a und b für die Berechnung der Tauwirksamkeit einer NaCl-Sole gemäß Gleichung 4.13 sowie Bestimmtheitsmaß R²

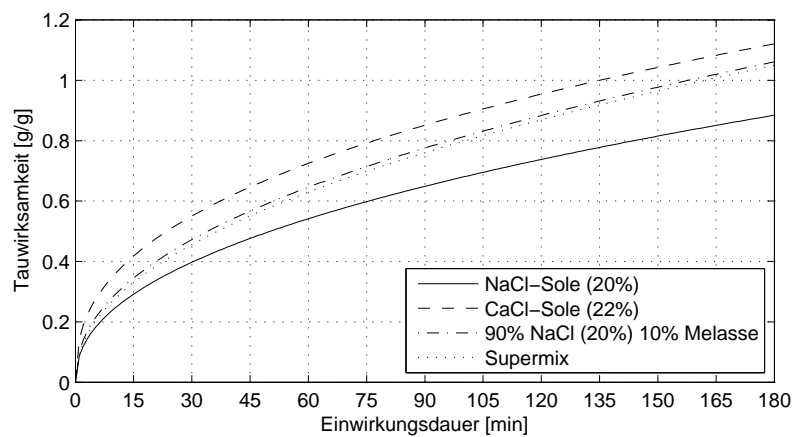


Abbildung 4.22: Aus Messungen errechnete Tauwirksamkeitskurven verschiedener Taumittelmischungen bei einer Versuchstemperatur von -5,0°C

	NaCl-Sole 20 %	CaCl ₂ -Lösung 23 %	90 % NaCl-Sole (20 %) + 10 % Melasse	Supermix
a	0,0870	0,1428	0,1016	0,0937
b	0,4466	0,3968	0,4518	0,4654
R ²	0,9788	0,9748	0,9658	0,9586

Tabelle 4.9: Parameter a und b für die Berechnung der Tauwirksamkeit unterschiedlicher Mischungen bei -5,0°C gemäß Gleichung 4.13 sowie Bestimmtheitsmaß R²

5 Gefrierpunkt

In diesem Kapitel wird der Zusammenhang zwischen Konzentration und Gefrierpunkt einer Taumittel-lösung abgehandelt, der letztendlich darüber entscheidet, ob der Flüssigkeitsfilm auf der Fahrbahn friert oder nicht. Die Konzentration kann mittels der in den Kapiteln 6 und 7 beschriebenen Module Restsalz und Filmdicke ermittelt werden. In der Regel liegt die Konzentration der Lösung auf der Fahrbahn durch die im Vergleich zur Salzmenge vielfach höhere Niederschlagsmenge auf einem geringen Niveau. Für Einzelfälle, wie etwa Stellen, welche von mehreren Routenfahrzeugen intensiv betreut werden, ist der Bereich der Übersättigung einer Salzlösung von spezieller Bedeutung. Im Gegensatz zu dem vielfach in der Literatur (etwa [15]) als theoretisches Phasendiagramm dargestellten Zusammenhang Gefrierpunkt - Konzentration werden im Folgenden Labormessungen zu Grunde gelegt. Der Vorteil dieser Herangehensweise liegt in der damit möglichen Verifikation von Herstellerangaben und der Untersuchung eventueller Störfaktoren wie Verunreinigungen oder unterschiedliche Wasserhärten.

5.1 Versuchsprogramm und -geräte

Alle Versuche zur Gefrierpunktbestimmung wurden in einem modifizierten Klimaschrank durchgeführt, bei dem eine ungestörte Versuchsdurchführung über zwei Eingriffsöffnungen mit eingebauten Gummihandschuhen möglich ist (Abbildung 5.1(a)). Der Klimaschrank weist einen frei regulierbaren Temperaturbereich von -40°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ und einen ebenso frei regulierbaren Luftfeuchtigkeitsbereich von 20 % bis 100 % auf. Zur Kontrolle und Dokumentation der Umgebungsvariablen ist der Klimaschrank mit zwei Kombinationsfühlern für Temperatur und Luftfeuchtigkeit sowie angeschlossenem Datenlogger ausgestattet. Die Bestimmung des Gefrierpunktes der Proben wurde mit weiteren acht Temperaturfühlern und zwei 4-Kanal-Dataloggern durchgeführt, die ein minimales Aufzeichnungsintervall von 16 Sekunden zulassen. Mit Hilfe dieser Messgeräte ist es möglich für bis zu 8 Proben parallel den Gefrierpunkt bis zu Temperaturen von etwa -30°C zu bestimmen.



(a) Klimaschrank Binder MKF 720



(b) Proben von Solelösungen mit eingehängten Temperaturfühlern

Abbildung 5.1: Klimaschrank und Proben zur Bestimmung des Gefrierpunktes von Lösungen

5 Gefrierpunkt

Die einzelnen Proben werden nach einem rechnerisch ermittelten Massenverhältnis und mit einer Waage mit 0,01 g Genauigkeit in Kunststoffflaschen mit 0,5 l Inhalt bei Raumtemperatur hergestellt. In die Probeflaschen mit etwa 450 g Probeflüssigkeit werden durch eine Öffnung im Deckel jeweils ein PT100-Temperaturfühler eingesteckt und fixiert, um eine zuverlässige Messung in Probenmitte zu gewährleisten (Abbildung 5.1(b)). Danach werden die Proben in den Klimaschrank gestellt, in dem der Abkühlungsprozess der Proben bei konstanter Temperatur von -45°C beobachtet wird. Der festgehaltene Temperaturverlauf der Proben wurde mit einem Datenlogger aufgezeichnet und in weiterer Folge auf dem PC analysiert.

Das Versuchsprinzip orientiert sich stark an dem in [5] beschriebenen Versuch zur Gefrierpunktbestimmung von Kühlmitteln. Demnach wird der Gefrierpunkt für die jeweilige Solekonzentration anhand des entstehenden charakteristischen Halteplateaus ermittelt (Abbildung 5.2). Dieses Halteplateau entsteht aufgrund des zum Bilden von Eiskristallen notwendigen Energieaufwandes. Erst nach dem vollständigen Durchfrieren der Probekörper sinkt die Temperatur weiter ab, bis die Innentemperatur des Klimaschranks von -45°C erreicht wird.

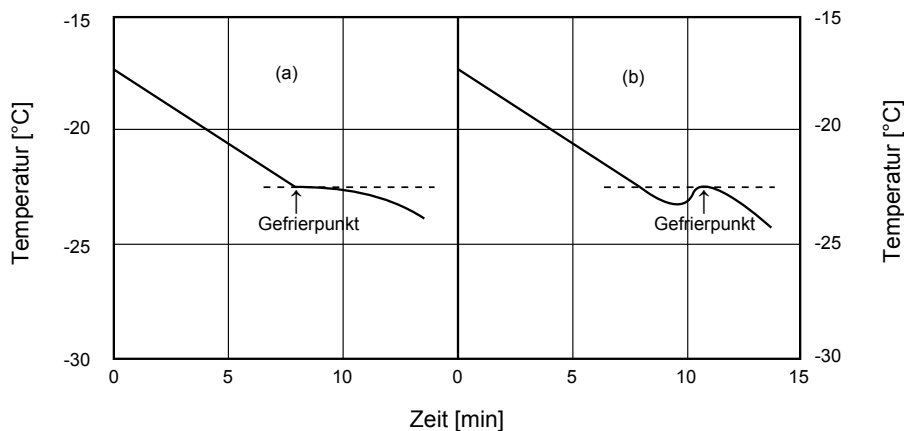


Abbildung 5.2: Theoretisches Halteplateau beim Gefriervorgang mit Gefrierpunkt nach ASTM D1177-94

In Abbildung 5.3 sind die Temperaturverläufe einer 14,63%igen und zweier 17,55%iger NaCl-Lösungen dargestellt, bei welchen das Halteplateau deutlich erkennbar ist. Bei der 14,63%igen Lösung (blaue Kurve) kann der sogenannte „Supercooling“-Effekt beobachtet werden. Dieser Effekt bezeichnet ein kurzfristiges Absinken der Temperatur in der Probe unter den Gefrierpunkt, ohne dass die Probe gefriert. Für das Gefrieren bzw. die Änderung des Aggregatzustands ist in der Regel ein Kristallisationsansatz notwendig. Sind diese Kristallisationsansätze nicht vorhanden, so kann eine Kristallisation und damit die Aggregatzustandsänderung nicht unmittelbar eintreten. Zum Ausgleich von Messungenauigkeiten wurde der Gefrierpunkt für jede Konzentration drei Mal bestimmt und das eutektische Diagramm auf dieser Datenbasis berechnet.

5.2 Auswertung und Modellierung

Im Zuge der Laborversuche hat sich gezeigt, dass Herstellerangaben zu Gefrierpunkten zum Teil sehr stark von den tatsächlich nachweisbaren Gefrierpunkten abweichen. Zudem lassen sich abgesicherte Aussagen zu übersättigten Bereichen treffen, die oft auf das Phasendiagramm verweisen, welches jedoch nicht in allen Bereichen den Gefrierpunkt darstellt.

Für die drei häufigsten Taumittel NaCl, CaCl₂ und MgCl₂ wurde der Zusammenhang zwischen Konzentration und Gefrierpunkt untersucht. Dabei wurden Lösungen mit unterschiedlichen Konzentrationen hergestellt und der Gefrierpunkt jeweils mehrfach bestimmt. Die geringe Abweichung der einzelnen

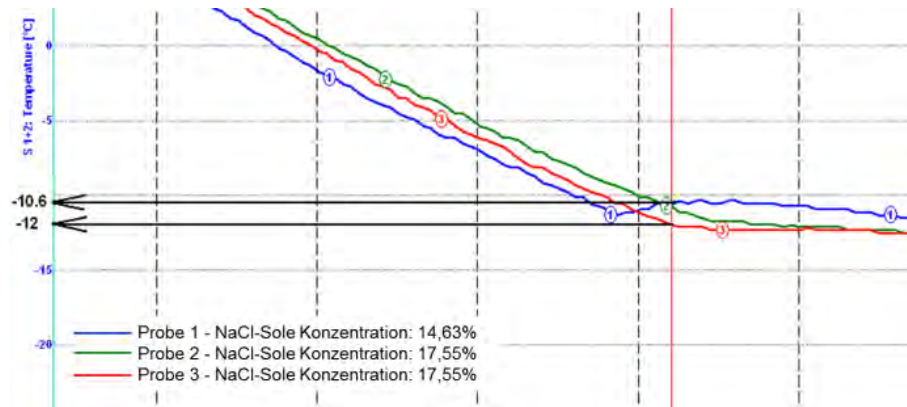


Abbildung 5.3: Halteplateau aus realem Gefriervorgang dargestellt in Auswertesoftware ELPROLOG

Messpunkte zeigt die allgemein gute Wiederholbarkeit des Versuches auch von unterschiedlichen Labo-
ranten.

Ein merkbarer Unterschied zwischen den verschiedenen Lösungen tritt erst ab Konzentrationen über 10 M-% auf, wie in Abbildung 5.4 zu erkennen ist. Die tieferen Gefrierpunkte von Magnesium- bzw. Kalziumchlorid lassen sich erst mit einer deutlich höheren Konzentration erreichen, während Natriumchlorid bereits bei 23,6 % die Sättigung erreicht hat. In der praktischen Anwendung im Straßenwinterdienst wird die Konzentration sehr rasch durch den Niederschlag reduziert. Sehr hohe Konzentrationen treten in der Praxis nur kurzfristig unmittelbar nach einem Streuvorgang bei geringen Niederschlagsmengen auf.

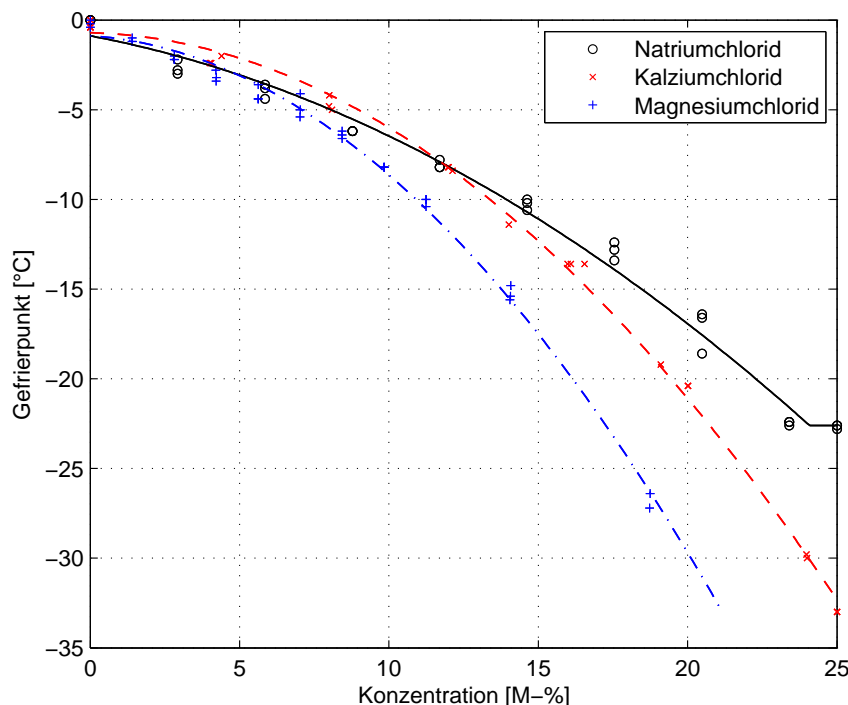


Abbildung 5.4: Gefrierpunktverläufe von NaCl, CaCl₂ und MgCl₂

Berücksichtigt man die realen Bedingungen der Feuchtsalzstreuung FS 30, so macht der Taumittelanteil der Sole nur ca. 6 % des ausgebrachten Streugutes aus. Die Verwendung von Taumittellösungen mit hoher Konzentration und hohem Gefrierpunkt bewirkt daher eine kaum relevante zusätzliche Gefrier-

5 Gefrierpunkt

punktabsenkung. Vielmehr ist aufgrund der Mehrkosten für diese Lösungen der Einsatz aus ökonomischer Sicht zu hinterfragen.

Die für diese Arbeit wichtigste Erkenntnis dieser Versuche ist zweifelsohne die Ableitung einer mathematischen Funktion, welche den Gefrierpunkt verschiedener Taumittel in Abhängigkeit der jeweiligen Konzentration bzw. umgekehrt berechnen lässt. Mathematisch können die Kurven bis zum Eutektikum mittels eines Polynoms dritter Ordnung mit sehr guter Übereinstimmung bzw. einem Bestimmtheitsmaß R^2 größer 0,99 durch Regression bestimmt werden.

Der Zusammenhang zwischen Konzentration und Gefrierpunkt kann nun nach den Gleichungen 5.1 und 5.2 mit den in den Tabellen 5.1 sowie 5.3 basierend auf der Regressionskurve berechnet werden. Einen Ansatz mit höherer Sicherheit bietet die Verwendung der Parameter der unteren 95%-Perzentile aus Tabelle 5.2. Zu beachten ist dabei in beiden Fällen, dass diese Formeln nur von einer Konzentration von 0 M-% bis zur jeweiligen Sättigungskonzentration gültig sind. Danach wird keine weitere Gefrierpunktabsenkung durch eine weitere Konzentrationserhöhung erreicht.

$$GP = p1_{gp} \cdot SK^3 + p2_{gp} \cdot SK^2 + p3_{gp} \cdot SK + p4_{gp} \quad (5.1)$$

Es bedeuten:

GP - Gefrierpunkt einer NaCl-Sole [$^{\circ}C$]
 SK - Konzentration einer NaCl-Sole [M-%]
 $p1_{gp}, p2_{gp}, p3_{gp}$ - Parameter gemäß Tabelle 5.1 und 5.2 [-]

Taumittel	$p1_{gp}$	$p2_{gp}$	$p2_{gp}$	$p4_{gp}$	Gültigkeitsbereich (Konzentration)
NaCl	-0,002023	0,04664	-0,9491	-0,0307	0% bis 22,4%
CaCl ₂	-0,001156	-0,006136	-0,4273	-0,2976	0% bis 30,2%
MgCl ₂	-0,002506	0,002393	-0,5841	-0,318	0% bis 21,4%

Tabelle 5.1: Parameter für die Berechnung des Gefrierpunktes nach Formel 5.1 (Mittelwert)

Taumittel	$p1_{gp}$	$p2_{gp}$	$p2_{gp}$	$p4_{gp}$	Gültigkeitsbereich (untere 95%-Perzentile)
NaCl	-0,002643	0,02452	-1,156	-0,5738	0% bis 22,4%
CaCl ₂	-0,001513	-0,01959	-0,5606	-0,6254	0% bis 30,2%
MgCl ₂	-0,003364	-0,02158	-0,7637	-0,67	0% bis 21,4%

Tabelle 5.2: Parameter für die Berechnung des Gefrierpunktes nach Formel 5.1 (Untere 95%-Perzentile)

$$SK = p1_{sk} \cdot GP^3 + p2_{sk} \cdot GP^2 + p3_{sk} \cdot GP + p4_{sk} \quad (5.2)$$

Es bedeuten:

GP - Gefrierpunkt einer NaCl-Sole [$^{\circ}C$]
 SK - Konzentration einer NaCl-Sole [M-%]
 $p1_{sk}, p2_{sk}, p3_{sk}$ - Parameter gemäß Tabelle 5.3 [-]

Taumittel	$p1_{sk}$	$p2_{sk}$	$p2_{sk}$	$p4_{sk}$	
NaCl	0,0005177	-0,01698	-1,714	-0,8468	0 $^{\circ}C$ bis -21,3 $^{\circ}C$
CaCl ₂	-0,0009516	-0,06736	-1,958	-0,1665	0 $^{\circ}C$ bis -55,0 $^{\circ}C$

Tabelle 5.3: Parameter für die Berechnung des Gefrierpunktes nach Formel 5.2 (Mittelwert)

Die Mischungsverhältnisse und die damit zusammenhängende Konzentration, Dichte und der Gefrierpunkt einer Sole zu berechnen ist nicht so trivial wie es scheint, zumal einige Faktoren nicht linear verlaufen. Um die gewünschte Konzentration zu erreichen, ist die Reinheit des Taumittels unbedingt

zu beachten. Insbesondere bei manueller Mischung von Solen aus CaCl_2 - bzw. MgCl_2 -Flocken ist dies essentiell, da diese Hydrate bilden, die neben dem Taumittel auch chemisch gebundenes Wasser enthalten. Der in Kapitel 4.4.1 ab Seite 75 beschriebene verringerte Anteil an tauwirksamer Substanz durch Hydratbildung bei einigen Tausalzen führt zu einer deutlich verminderten Solekonzentration. Werden 20 kg CaCl_2 -Schuppen mit einer Reinheit von 77 % mit 80 l Wasser gemischt, um eine 20%ige Sole zu erhalten, beträgt der tatsächliche Anteil an tauwirksamer Substanz lediglich $20 \cdot 0,77 = 15,4$ kg und führt damit zu einem Gefrierpunkt von $-12,5^\circ\text{C}$ statt der erwarteten -20°C . Dieser Unterschied ist bei Magnesiumchlorid noch höher, da die geforderte Reinheit nur bei 47 % liegt. Der Wassergehalt steigt bei hygroskopischen Tausalzen durch die Bildung von Hydraten aus der Luftfeuchtigkeit mit der Zeit an. Dies betrifft vor allem Schuppen mit hoher Reinheit, die längere Zeit hoher Luftfeuchtigkeit ausgesetzt sind.

5.3 Verifizierung und Einbindung

Um den Gefrierpunkt praxisnahe zu bestimmen, wurde statt destilliertem Wasser herkömmliches Leitungswasser verwendet. Dadurch kann auch die Abweichung vom Gefrierpunkt von reinem Wasser ($-0,3^\circ\text{C}$) erklärt werden. Die im Wasser gelösten Mineralstoffe verringern gemäß der auf Seite 81 vorgestellten Gleichung 4.8 nach Raoult bereits den Gefrierpunkt minimal. Es wurde daher auch der Einfluss von Verunreinigungen des Wassers sowie der Wasserhärte untersucht.

Zur Untersuchung des Einflusses der Wasserhärte wurden Versuche mit destilliertem Wasser (Härte etwa 1°dH) den Versuchen mit Leitungswasser (Härte etwa $6\text{-}11^\circ\text{dH}^1$) gegenübergestellt. Die Verunreinigung von Wasser wurde durch feinen mineralischen Staub erzeugt.

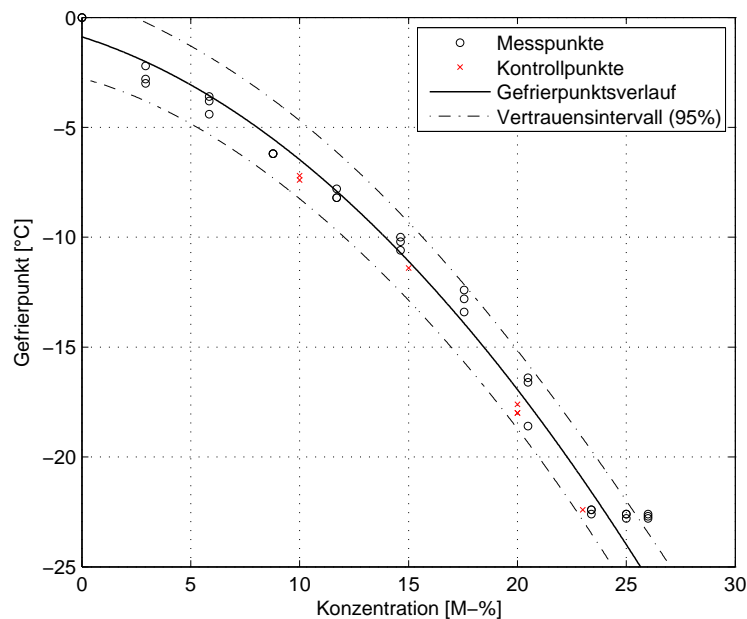


Abbildung 5.5: Verifikation der Kurve mit Störfaktoren für NaCl

Wie in Abbildung 5.5 dargestellt zeigen Kontrollmessungen mit destilliertem Wasser keine erkennbaren Abweichungen bzw. liegen diese im Bereich der Messgenauigkeit von etwa 0,2 K. Die angegebenen Formeln eignen sich damit für Wässer mit unterschiedlicher Härte sowie verschmutzte Wässer (etwa durch Straßenstaub).

¹Quelle: Stadt Wien, MA 31, Wiener Wasser von <https://www.wien.gv.at/wienwasser/qualitaet/haerte.html> am 14.12.2014

6 Restsalz

Die in Kapitel 4 beschriebene Wirkung auftauender Streumittel hängt neben der Temperatur in erster Linie von der auf der Fahrbahn vorhandenen Menge ab. Das von einem Winterdienstfahrzeug ausgebrachte Streumittel wird jedoch im zeitlichen Verlauf nach der Streuung durch verschiedene Mechanismen von der Fahrbahn vertragen. Die zu einem beliebigen Zeitpunkt nach der Streuung noch auf der Fahrbahn befindliche Menge an Salz wird als *Restsalzmenge* bezeichnet.

Zur Modellierung der Wirkung auftauender Streumittel ist die Kenntnis der Menge zu einem beliebigen Zeitpunkt ein entscheidender Parameter. Kombiniert mit der Flüssigkeitsmenge auf der Fahrbahn lässt sich damit die Konzentration und der Gefrierpunkt der Lösung bestimmen.

Die Verfrachtung des Salzes von der Fahrbahn in die umgebenden Bereiche beginnt bereits beim Streuvorgang durch Verwehung. Dabei wird vom Fahrtwind oder Seitenwind das Salz an die Straßentränder befördert. Für die weitere Verfrachtung des nicht verwehten Salzes sind im Wesentlichen die in Abbildung 6.1 dargestellten Mechanismen verantwortlich.

In Österreich ist in der Straßenprojektierung eine Mindestquerneigung von 2,5 % vorgesehen, um ein Abfließen des Niederschlagswassers von der Fahrbahn zu gewährleisten. Bei Niederschlag in flüssiger Form bzw. getautem Schnee wird das Salz von der Fahrbahn gewaschen und mit dem Niederschlagsabfluss in die Straßenentwässerung verfrachtet (Mechanismus 1 in Abbildung 6.1).

Durch das Gewicht des Fahrzeuges und die Aufstandsfläche der Fahrzeugreifen wird das Wasser auf beide Seiten des Reifens verdrängt und, bei ausreichender Dicke des Wasserfilmes, auch verspritzt. In der Abbildung sind die Verspritzungen von der Rollspur zum Fahrbahnrand hin mit 2a in Abbildung 6.1 gekennzeichnet, während die Verspritzungen 2b und 2c das Wasser zwar aus der Rollspur, aber nicht von der Fahrbahn verdrängen. Wasser, das sich zuerst im Bereich der Aufstandsfläche im Profil des Reifens befunden hat, wird durch die Rotation nach hinten geschleudert, wobei das Wasser wieder in der Rollspur landet. Durch diesen Effekt wird allerdings für eine gleichmäßige Verteilung von Wasser und damit auch Taumittel in der Rollspur gesorgt, die von den Streugeräten so nicht erreicht wird (Mechanismus 3 in Abbildung 6.1).



Abbildung 6.1: Verdrängungsmechanismen von Salz auf der Fahrbahn

6.1 Versuchsprogramm

Im Zuge verschiedener Projekte [54], [33] und [57] wurden knapp 700 Restsalzmessungen mit dem Restsalzmessgerät SOBO20 durchgeführt, die in dieser Arbeit zu einer gesammelten Analyse und Auswertung kommen sollen.

Die Messung der Salzmenge auf der Fahrbahn wurde mit dem Restsalzmessgerät SOBO20 durchgeführt, mit dem der Restsalzgehalt auf der Fahrbahn über die Messung der elektrischen Leitfähigkeit bestimmt wird. Durch das Zusammenpressen des Messzylinders wird in einem zur Seite hin abgedichteten Bereich direkt an der Fahrbahn etwa 40 ml Messflüssigkeit bestehend aus 15 % Aceton und 85 % destilliertem Wasser aufgebracht. Diese löst das Salz von der Fahrbahn, und ändert die Leitfähigkeit aufgrund des Salzgehaltes und der Temperatur. Mit Hilfe des Zusammenhangs von Solekonzentration und Leitfähigkeit kann auf die Salzmenge auf der Fahrbahn in g/m^2 nach einer Temperaturkompensation rückgerechnet werden. In Abbildung 6.2 sind neben dem SOBO20 an einer abgesicherten Messstelle auch die Messpunkte anhand der zu erkennenden Messflüssigkeit sichtbar.



Abbildung 6.2: Messgerät SOBO20 und Messaufbau zur Messung von Restsalz auf der Fahrbahn

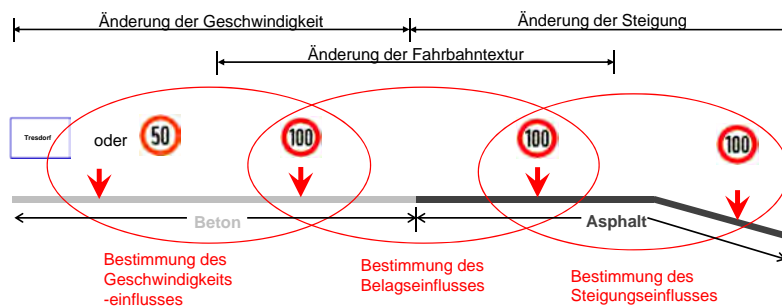
Für die Ermittlung eines aussagekräftigen Messwertes sind mindestens 3 bzw. besser 5 Einzelmessungen zielführend, um allfällige Schwankungen auszugleichen, welche durch die ungleichmäßige Verteilung des Salzes in Form von Streufahnen beim Ausbringen mit dem Streuteller entstehen. Durch die Verteilung der Messungen auf einen Bereich von 4 bis 5 Metern werden lokale Ansammlungen von Salz in Texturvertiefungen oder Ähnlichem ausgeglichen. Die Aufteilung der Einzelmesspunkte erfolgt in einer Vielzahl der Messungen nur in der maßgebenden Rollspur, wobei die Einzelmessungen einen Abstand von ca. 0,75 m aufweisen sollten um ungestörte Verhältnisse bei den Messungen vorzufinden. Die Restsalzmessungen in der Rollspur des ersten Fahrstreifens sind maßgebend, da hier der Verkehrseinfluss und die resultierenden Salzverluste gemäß Vergleichsmessungen am größten sind.

Aus den ersten Versuchen mit Restsalzmessungen im Winter 2009/10, der Modellentwicklung und theoretischen Überlegungen können die Anforderungen an eine ideale Teststrecke formuliert werden, um alle maßgebenden Einflussfaktoren in einem Messdurchlauf berücksichtigen zu können. Diese Einflussgrößen sind:

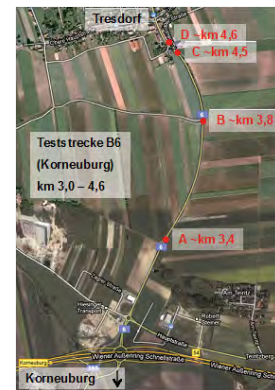
- Makrotextur der Fahrbahn
- Mittlere Fahrgeschwindigkeit & Verkehrsstärke
- Steigungsverhältnisse
- Niederschlag/Witterung

Die Parameter Textur, Geschwindigkeit und Steigung sind relativ konstante Größen einer Strecke, die für die meisten Straßen Bundesstraßen A+S bzw. teilweise Landesstraßen B+L aus Zustandserfassungen (z. B. RoadSTAR siehe [19]) bekannt sind. Die Berücksichtigung der Verkehrsstärke durch die Wahl mehrerer Messstrecken mit unterschiedlichem DTV sowie der Variation des Zeitpunktes des Messdurchlaufes kann unter Berücksichtigung der Verkehrsganglinie erfolgen. Niederschlag und Witterung spielen bei der Wahl der Teststrecke eine untergeordnete Rolle, da die Schwankung an einer Messstrecke groß genug ist, um alle notwendigen Wetterszenarien an einer beliebigen Teststrecke abzubilden. Die Parameter Makrotextur, Geschwindigkeit und Steigung sollten jedoch an der Messstrecke zumindest einmal wechseln, wobei die Gesamtlänge der Messstrecke 5 km nicht überschreiten sollte, um das vorgegebene Messintervall für Kurzzeit- und Langzeitmessungen einhalten zu können.

Bei der Auswertung der Daten können dann jeweils zwei Messpunkte allein betrachtet werden, die sich durch Änderung nur eines Parameters unterscheiden. Bei drei zu untersuchenden Parametern würde dies sechs Messpunkte erfordern, deren Zahl durch doppelte Verwendung der beiden mittleren Messpunkte von sechs auf vier reduziert werden kann (Abbildung 6.3(a)). Die Abfolge des Verlaufes der Parameteränderungen an der Teststrecke ist nur symbolisch und kann variieren, die Bezeichnungen Beton und Asphalt stehen in erster Linie für eine unterschiedliche Fahrbahntextur. Aus dem direkten Vergleich der Messwerte an zwei Messpunkten kann der Einfluss des einzigen abweichenden Parameters mittels Regressionsrechnung bestimmt werden.



(a) Schematische Skizze einer idealen Messstrecke



(b) Anordnung der Messpunkte an einer realen Teststrecke auf der B6 bei Korneuburg

Abbildung 6.3: Ideale und reale Messstrecke für Restsalzmessungen. Quelle:[31]

Eine sehr gut geeignete Teststrecke wurde an der B6 von km 3 bis km 5 bei Korneuburg (Niederösterreich) gefunden [31]. Die Teststrecke beginnt ca. bei km 3,0 mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h, neuer Asphaltdecke und einer Steigung bei Messpunkt A (km 3,4). Im weiteren Verlauf flacht die Straße ab und hat bei Messpunkt B (km 3,8) keine Längsneigung mehr, alle anderen Parameter sind jedoch gleich geblieben. Bei Messpunkt C (km 4,5) befindet sich eine Ortseinfahrt mit entsprechender Geschwindigkeitsabnahme von 100 km/h auf 50 km/h, der Belag ist jedoch noch der gleiche wie im Überlandbereich. Kurz nach der Ortseinfahrt bei Messpunkt D (km 4,6) folgt ein Fahrbahnwechsel auf eine alte Asphaltdecke mit geringer Makrotextur und deutlich weniger Texturtiefe als beim Belag an den Messpunkten A bis C.

Aufgrund der Schwierigkeiten, die eine Messung unter starken Schneefällen in Bezug auf Verfügbarkeit der Mannschaft und Variabilität der Einsatzfahrten mit sich bringt, wurde ein Großteil der Messungen nur in Wetterszenarien mit präventiven Streuungen durchgeführt. Bei Schneefall konnte aufgrund der notwendigen Einsatzfahrten kein Personal für die Restsalzmessungen zu Verfügung gestellt werden. An Autobahnen ist aufgrund der hohen Anforderungen an die Absicherung der Aufwand für Messungen

deutlich höher, weshalb hier auch mit längeren Zwischenzeiten bei den Messungen und allgemein einer geringeren Anzahl an Messungen vorlieb genommen werden muss.

6.1.1 Streuverluste unmittelbar nach der Ausbringung

Die vergleichsweise starken Verluste an Restsalz sehr kurz nach der Ausbringung wurden schon in [69] und [23] durch vereinzelte Messungen qualitativ festgestellt und wurden durch ein umfangreiches Messprogramm im Rahmen dieser Arbeit genauer quantifiziert. Die Ursache für diese starken Anfangsverluste sind Verwehungen des Salzes in den Bereich des Straßenrandes durch Luftströmungen.

Diese sind entweder natürlicher Herkunft (Wind) und tragen das Salz konstant an einen Straßenrand bzw. von der Fahrbahn oder entstehen durch künstliche Luftwirbelungen hinter dem fahrenden Streufahrzeug sowie darauf folgender Fahrzeuge. Diese vom Streufahrzeug und den ersten nachkommenden Fahrzeugen verursachten Luftwirbelungen sind vor allem auf Autobahnen und Schnellstraßen von Relevanz, wo höhere Streugeschwindigkeiten gefahren werden. Weitere Kriterien, die eine Verwehung begünstigen bzw. reduzieren, sind die Feuchtigkeit der Straße, Korngröße und Einsatz von Feucht- bzw. Trockensalzstreuung oder Solesprühung.

Zur Feststellung der Anfangsverluste unmittelbar nach der Streusalzausbringung wurden Messungen unmittelbar vor bzw. nach einer Streufahrt durchgeführt. Durch die Streufahnenbildung kommt es ohne Verkehrseinfluss kaum zu einer gleichmäßigen Längsverteilung ausgehend von den am Streuteller ausgebrachten Streufahnen. Eine rasche, gleichmäßige Verteilung des Streusalzes ist folglich erst nach etwa 100 bis 150 Fahrzeugen gegeben. In Abbildung 6.4 sind die Mittelwerte der Anfangsverluste bezogen auf die eingestellte Streumenge innerhalb der ersten 150 KFZ bzw. 5 Minuten (falls DTV nicht bekannt) getrennt nach der eingestellten Streumenge dargestellt.

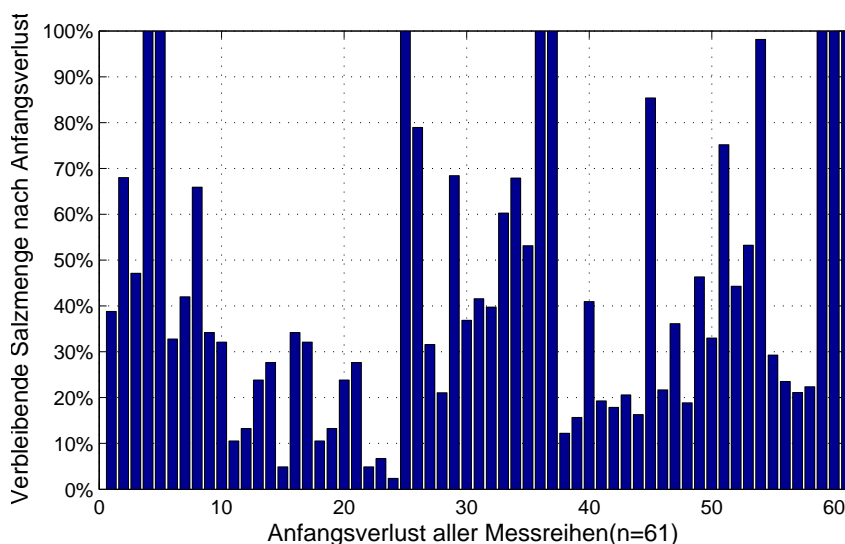


Abbildung 6.4: Relative Anfangsverluste (Bis 150 KFZ oder 5 Minuten nach einer Streufahrt) aller Einzelmessungen bezogen auf die eingestellte Salzmenge

Insgesamt zeigen alle Messungen bei unterschiedlichen eingestellten Streumengen von 10 bis 30 g/m² Anfangsverluste von ca. 50 % d. h. die unmittelbar in der Rollspur verbleibende Restsalzmenge beträgt nur etwa 50 % der eingestellten Streumenge. Der Mittelwert aller 61 analysierten Messungen liegt bei 43,4 %, die Standardabweichung bei 30,3 %. Betrachtet man die Ergebnisse der einzelnen Messungen in Abbildung 6.4, erkennt man die hohe Abweichung der einzelnen Messungen. Diese Abweichungen lassen sich weniger auf die Fahrbahn als viel mehr auf das Streugerät zurückführen. Ebenso wurden

die Windverhältnisse bei den Messungen nicht erfasst, wodurch eine entsprechende Auswertung nicht möglich ist. Die Bedeutung einer guten Kalibrierung der Streugeräte ist auch in [52] dokumentiert.

In Hinblick auf die Wirkung des Winterdienstes sind vor allem die hohen nachgewiesenen Streuverluste problematisch, da dadurch nur ein Bruchteil der tatsächlichen Streumenge auch tauwirksam wird. Es wird daher versucht, die Anfangsverluste durch noch höheren Einsatz von Sole weiter zu minimieren. Streugeräte mit reiner Soleausbringung kommen ebenso wie höhere Anfeuchtungsgrade immer öfter zum Einsatz.

6.1.2 Streuverluste und weitere Austragung durch den Verkehr

Nach den hohen Anfangsverlusten unmittelbar während und nach dem Streuvorgang erfolgt eine langsamere Vertragung des Salzes mit asymptotischem Verlauf im Falle trockener oder feuchter Fahrbahn. Dabei findet vor allem die Verfrachtung des Salzes von den Rollspuren in die Randbereiche der Fahrbahn statt, wie sie auch bei der Splittstreuung erkennbar ist. Diese Art der Salzverluste ist weitgehend zeitunabhängig und ist am besten auf die Anzahl der seit der Streufahrt gefahrenen Fahrzeuge zu beziehen.

In Abbildung 6.5 sind drei Bereiche markiert, welche für den Restsalzverlauf typische Zonen markieren.

blau Dieser Bereich stellt die sehr starken Verluste kurz nach der Streuung dar. Dabei sind die Anfangsverluste inkludiert. Generell lässt sich erkennen, dass insbesondere bei hohen Streumengen der Restsalzgehalt auf der Fahrbahn sehr rasch unter 10 g/m^2 sinkt. Hohe Streumengen sind also generell zu hinterfragen.

grün Die Mehrheit der Messwerte befindet sich im grünen Bereich, welcher die Vertragung durch den Verkehr darstellt. Salz bleibt hier auch in den Vertiefungen der Fahrbahntextur liegen.

rot Am roten Bereich fällt auf, dass trotz genereller Abnahme der Restsalzmenge nur wenige Messungen Ergebnisse unter 2 g/m^2 liefern. Das Salz bleibt auch nach längerem Verkehrseinfluss noch in geringen Mengen auf der Fahrbahn. Dies kann insbesondere bei Reifglätte sehr wichtig werden.

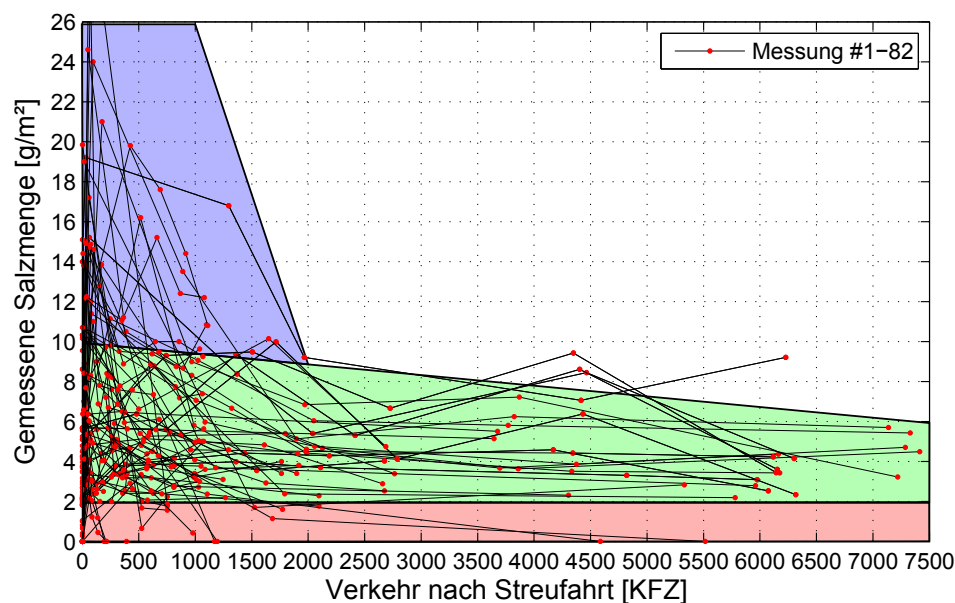


Abbildung 6.5: Darstellung aller durchgeführten Messungen von Restsalz als Mittelwert von 3 bis 5 Einzelmessungen je Punkt

Die Messungen sind aufgrund des Messzeitraumes, der teilweise in die Wintersaison fällt, naturgemäß bei verschiedenen Streumengen, die zum Messzeitpunkt notwendig waren, durchgeführt worden. Da nur ein gewisser Teil der Messungen auf Strecken mit idealen Voraussetzungen stattfand, muss auf die Entwicklung eines detaillierten Zusammenhangs aller erwähnten Parameter an dieser Stelle verzichtet werden.

In einem wesentlichen Parameter lassen sich sehr gut Unterschiede in der Abnahme des Restsalzes feststellen. So ist in Abbildung 6.6 der Verlauf der Restsalzmenge getrennt nach den Fahrbahnzuständen trocken, feucht und nass dargestellt. Auf der Abszisse ist nicht die Zeit, sondern der Verkehr nach der Streufahrt in KFZ angegeben. Da NaCl unter atmosphärischen Verhältnissen eine stabile Verbindung ist, kann eine Reduktion der Menge nur durch mechanische Verdrängung oder Lösung in (Niederschlags-) Wasser erfolgen.

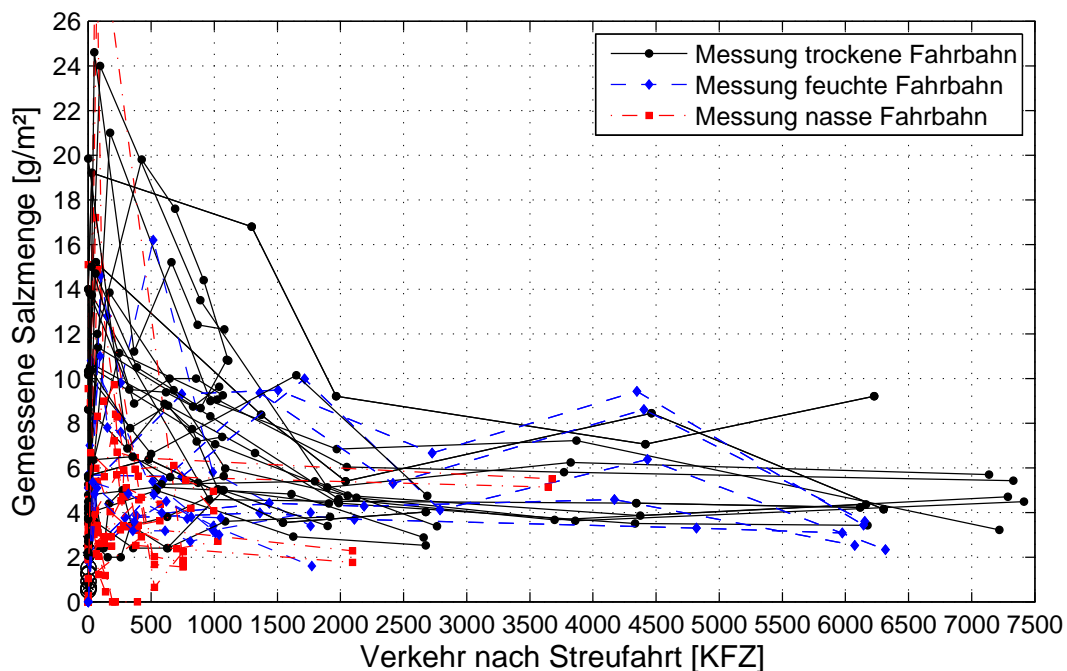


Abbildung 6.6: Darstellung aller durchgeführten Messungen von Restsalz getrennt nach trockenem, feuchtem oder nassem Fahrbahnzustand

Starke Verluste ohne verbleibendes Restsalz kamen bei den durchgeführten Messungen ausschließlich bei nasser Fahrbahn vor. Bei trockener bzw. feuchter Fahrbahn blieb immer ein gewisser Teil des ausgebrachten Salzes von ca. $0,5 \text{ g/m}^2$ bis 3 g/m^2 auf der Fahrbahn zurück (Abbildung 6.6). Bei trockener Witterung bleibt über längere Zeit eine geringe Menge an Restsalz in der Textur der Fahrbahn zurück, die bei Niederschlag als Taumittel zur Trennschichtbildung zu Verfügung steht. Erst durch Niederschlag bzw. Austragung wird das Salz zur Gänze von der Fahrbahn verfrachtet.

Bei einer tieferen Fahrbahntextur und trockener Witterung kann daher auch nach ein bis zwei Tagen noch mit einer geringen Restsalzmenge auf der Fahrbahn gerechnet werden. Zusammengefasst zeigen die Messungen die geringsten Abnahmen der Restsalzmenge bei feuchter Fahrbahn (Klebewirkung), die höchsten Abnahmen bei nasser Fahrbahn (Verspritzen und Abschwemmen) und mittlere Abnahmen bei trockener Fahrbahn (Aufwirbelung).

Weitere signifikante Zusammenhänge konnten, basierend auf den vorliegenden Messungen, nicht klar erkannt werden. Die Einbindung der Restsalzmenge in das Modell erfolgte daher auf Basis der Parameter Fahrbahnzustand und Verkehrseinfluss (Anzahl KFZ nach Streufahrt).

6.1.3 Modelleinbindung

In der Prognose der Restsalzmenge werden die Anfangsverluste und die Verkehrsverluste differenziert. Dadurch können etwa die Anfangsverluste je nach Streumethode (Feuchtsalz/Trockensalz/Sole) getrennt werden. Die Grenzwerte für die Unterscheidung sind in [3] mit $10\ \mu\text{m}$ sowie $200\ \mu\text{m}$ Wasserfilmdicke festgelegt. Zwischen $10\ \mu\text{m}$ und $200\ \mu\text{m}$ Wasserfilmdicke gilt die Fahrbahn als feucht, darunter als trocken und darüber als nass. Dies erscheint nach ersten Messungen mit reiner Solestreuung und den dabei festgestellten deutlich geringeren Anfangsverlusten vorteilhaft. Der Anfangsverlust wird mit einer einmaligen Reduktion der ausgebrachten Streumenge modelliert.

Der weitere Verlauf der Restsalzmenge wird für die Fahrbahnzustände trocken, feucht und nass getrennt mit einem linearen Verlauf angesetzt. Dabei zeigt sich der Unterschied zwischen feuchter, nasser und trockener Fahrbahn sehr deutlich. Die geringsten Verluste wurden bei einer feuchter Fahrbahn gemessen. Hier haftet das Salz durch die Feuchtigkeit besser auf der Fahrbahn als in trockenem Zustand.

Die Verluste auf trockener Fahrbahn sind etwas höher als auf feuchter, jedoch ist nach 8.000 KFZ immer noch eine Restsalzmenge zu messen. Die stärksten Verluste wurden bei feuchter Fahrbahn gemessen. Hier wird das Salz von der Fahrbahn gewaschen bzw. mit dem Spritzwasser aus der Rollspur entfernt. So ist nach etwa 2.000 KFZ kein Salz mehr auf der Fahrbahn vorhanden. Lokal kann es dann zu hohen Salzkonzentrationen in Lacken bzw. Spurrinnen kommen, aus welchen das Wasser mit dem Salz nicht mehr abfließen kann.

Die Ergebnisse der linearen Regression sind mit den 95%-Prognoseintervallen in Abbildung 6.7 dargestellt. Die hohe Streuung zeigt sich auch im niedrigen Bestimmtheitsmaß (Tabelle 6.1). Aus den dargestellten 95%-Prognoseintervallen ist erkennbar, dass die Bandbreite für die Prognose noch in einem, für eine Modellierung, brauchbarem Rahmen liegt.

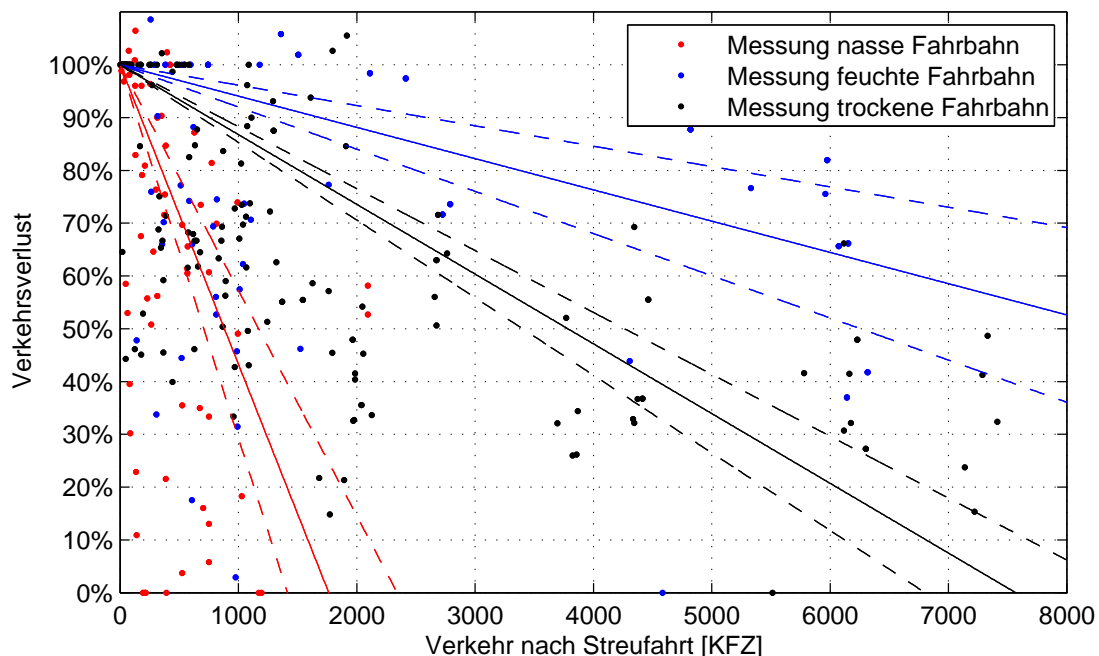


Abbildung 6.7: Darstellung der Verkehrsverluste getrennt nach trockenem, feuchtem oder nassem Fahrbahnzustand

6 Restsalz

Mathematisch wird der Anfangsverlust und die Verkehrsverluste in Gleichung 6.1 dargestellt.

$$RS = ES \cdot a \cdot (k \cdot T) \quad (6.1)$$

Es bedeuten:

- RS - Restsalzmenge [g/m^2]
- ES - Am Streuer eingestellte Salzmenge [g/m^2]
- a - Parameter zur Reduktion durch Anfangsverluste [-]
- k - Parameter nach Tabelle 6.1 [-]
- T - Verkehr nach Streufahrt [KFZ]

Straßenzustand	k (Mittelwert)	k (untere 95%-Percentile)	Bestimmtheitsmaß R^2
trocken	-0,000132	-0,000147	0,2102
feucht	-0,000059	-0,000080	0,0448
nass	-0,000567	-0,000707	0,0551

Tabelle 6.1: Koeffizienten für die Berechnung der Restsalzmenge gemäß Gleichung 6.1

Mit dem Parameter a wird der Anfangsverlust unmittelbar nach dem Streuvorgang in der Berechnung berücksichtigt. Dieser hängt in erster Linie von der gewählten Streutechnologie ab. Für zwei Technologien, welche in Untersuchungen [34] getestet wurden sind Werte angegeben. Um Abweichungen, insbesondere Verschlechterungen in der Praxis so gering wie möglich zu halten, ist eine regelmäßige Wartung der Geräte notwendig.

Streutechnologie	a
Feuchtsalz	0,5
Reine Sole (Sprühbalken)	0,75

Tabelle 6.2: Koeffizienten für die Berechnung der Anfangsverluste gemäß Gleichung 6.1

Die lineare Modellierung wurde insbesondere wegen der Möglichkeit der Kombination beliebiger Abfolgen von Fahrbahnzuständen gewählt. Während andere Funktionen wie eine logarithmische Funktion oder Potenzfunktion den Restsalzverlauf über eine Periode mit gleichem Fahrbahnzustand inklusive der Anfangsverluste besser darstellen, ist die lineare in der Modellbildung überlegen. So ist der stark von der Streutechnik bestimmte Anfangsverlust flexibel anzupassen. Im weiteren Verlauf kann durch die Linearität auf den Wechsel des Fahrbahnzustandes besser eingegangen werden.

Bei einem Wechsel von beispielsweise feucht zu nass aufgrund von anhaltendem Niederschlag erfolgt in der Modellrechnung einfach ein Knick im Verlauf der Restsalzmenge. Bei den erwähnten nichtlinearen Funktionen würde an diesem Knick erneut ein fiktiver Anfangsverlust zum Tragen kommen.

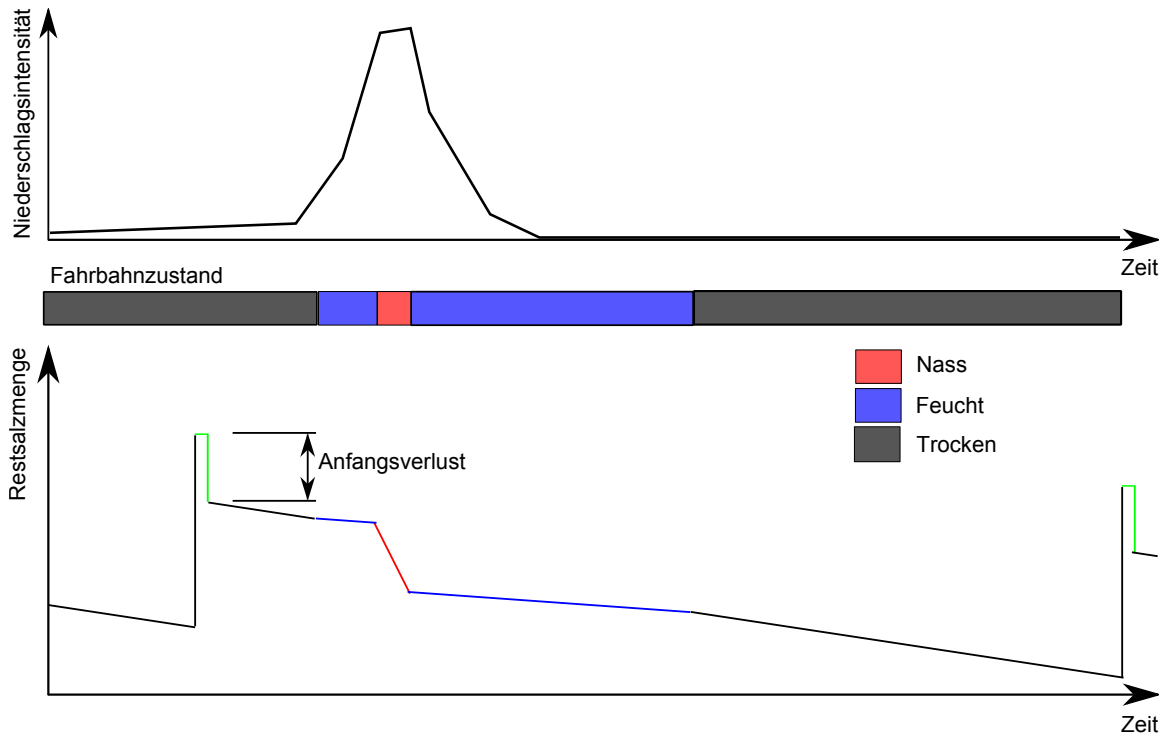


Abbildung 6.8: Skizze der Berechnung der Restsalzmenge basierend auf Streuzzeitpunkt und -menge sowie Fahrbahnzustand infolge Niederschlag

Abbildung 6.8 zeigt schematisch die Berechnung der Restsalzmenge mit folgendem Ablauf:

- Etwaiges vorhandenes Restsalz wird um die ausgebrachte Streumenge einer Präventivstreuung erhöht
- Unmittelbar darauf erfolgt die Reduktion der Restsalzmenge um den Anfangsverlust
- Salz wird durch den Verkehr auf trockener Fahrbahn ausgetragen
- Mit feuchter Fahrbahn nach Einsetzen des Niederschlags verlangsamt sich die verkehrsbedingte Salzreduktion
- Mit dem Abfließen des Niederschlags auf nasser Fahrbahn steigt die Verlustrate deutlich an
- Nach Ende des Niederschlags verlangsamt sich die Abnahmerate auf das Niveau einer feuchten Fahrbahn
- Mit dem vollständigen Auftrocknen ist erneut der trockene Fahrbahnzustand maßgebend für die Verlustrate
- Eine erneute Streufahrt beginnt den Zyklus von vorne

Bei länger anhaltenden Einsätzen ist jedenfalls zu beachten, dass bereits Salz auf der Fahrbahn vorhanden ist. Diese vorhandene Menge muss zur ausgebrachten Streumenge addiert werden. Durch diese Vorgehensweise lässt sich die Restsalzmenge zu jedem Zeitpunkt rechnerisch abschätzen.

7 Filmdicke

Mit den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Module Restsalz und Gefrierpunkt kann noch nicht auf das Potential des Gefrierens von Niederschlag auf der Fahrbahn geschlossen werden. Der fehlende Baustein dazu ist die *Filmdicke* der Flüssigkeit auf der Fahrbahn. Aus der Filmdicke, kann gemeinsam mit der Restsalzmenge die Konzentration und in weiterer Folge der Gefrierpunkt berechnet werden. Im Zusammenhang mit der Fahrbahntextur kann über die Filmdicke auf die Wassermenge geschlossen werden.

Die Filmdicke von Flüssigkeit auf der Fahrbahn stellt dabei ein Gleichgewicht aus Zufuhr (Niederschlag) und Abfuhr (Straßenentwässerung, Verdunstung) dar. Auf Grund der vielen simultan ablaufenden Prozesse der Zufuhr bzw. Abfuhr ist die Berechnung der exakten Filmdicke äußerst schwierig. Zu den genannten Faktoren kommen noch Verspritzung und Verteilung durch Verkehr sowie das unterschiedliche Verhalten von Schnee und Regen hinzu.

7.1 Zufuhr - Niederschlagsmenge

Die Niederschlagsmenge ist in der Regel für die Entstehung eines Wasserfilms auf der Fahrbahn verantwortlich. Dabei setzt sich die Niederschlagsmenge aus atmosphärischem Niederschlag (Regen, Schnee) sowie Tau bzw. Reif zusammen. Die Berechnung der Niederschlagsmenge wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, dies ist vielmehr eine Aufgabe von meteorologischen Modellen. Eine Ausnahme stellt dabei Niederschlag in Form von Reif dar, welcher hier behandelt wird. Die gängigen Niederschlagsmodelle geben Niederschlagsmengen in mm/h an welche in das hier entwickelte Modell einbezogen werden können. Neue Nowcastmodelle wie etwa INCA [47] stellen dabei Daten in sehr hoher geografischer wie zeitlicher Auflösung bereit. So sind für den Prognosezeitraum von fünf Stunden etwa Daten für ein Netz mit 1 km Weite in einem Zeitintervall von fünf Minuten verfügbar.

Die Reifbildung wird im hier vorgestellten Modell mit gängigen Formeln, die eine gute Näherung bringen, berechnet. Die grundsätzlichen Einflussgrößen für die Bildung von Reif sind:

- Windgeschwindigkeit
- Lufttemperatur
- Fahrbahntemperatur

Alle weiteren Werte können aus diesen drei Eingangsgrößen mit den hier angegebenen Formeln berechnet werden. Die anfallende Menge an Reif berechnet sich nach [23] wie folgt:

$$SR = 2,16 * 10^{-6} * WS * \frac{D}{T} \quad (7.1)$$

mit

$$D = 611 * e^{\left(\frac{22,2-6061}{TD} - \frac{22,2-6061}{TS}\right)} \quad (7.2)$$

Es bedeuten:

- SR - Resublimationsrate (Zuwachsgeschwindigkeit von gefrorenem Wasser oder Raureif [kg/m²/s]. Unter Resublimation ist die Phasenumwandlung vom gasförmigen in den festen Aggregatzustand zu verstehen.
- WS - Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe [m/s]
- D - Differenz zwischen dem aktuellen Dampfdruck der Luft in 2m Höhe und dem Sättigungsdampfdruck auf der Strassenoberfläche
- T - Temperatur in 2m Höhe [K]
- TD - Taupunkttemperatur der Luft [K]
- TS - Temperatur der Straßenoberfläche [K]

7 Filmdicke

Aus dem Sättigungsdampfdruck und der Lufttemperatur kann näherungsweise der Taupunkt berechnet werden mit:

$$TD = \frac{272,186 * (\ln(E_i) - \ln(6,11153))}{22,4433 - (\ln(E_i) - \ln(6,11153))} \quad (7.3)$$

Es bedeuten:

E_i - Sättigungsdampfdruck für Eisbildung bei gegebener Lufttemperatur
TD - Taupunkttemperatur in [°C]

Zur Berechnung der Taupunkttemperatur wird der Sättigungsdampfdruck benötigt, der mithilfe der MAGNUS-Formel [65] berechnet wird:

$$E_i = E_o * e^{\frac{22,4433 * T}{272,186 + T}} \quad (7.4)$$

Es bedeuten:

E_i - Sättigungsdampfdruck für Eisbildung bei gegebener Lufttemperatur
 E_o - Sättigungsdampfdruck bei 0 °C (6,11153 hPa)
T - Lufttemperatur in [°C]

Um die Reifmenge in mm/h zu erhalten, wird die Resublimationsrate mit Formel 7.5 umgerechnet

$$Reif = SR * 60 * 60 \quad (7.5)$$

Es bedeuten:

Reif - Anfallende Reifmenge in [mm/h]
SR - Resublimationsrate

Für die Berechnung der Reifmenge mithilfe der Formeln 7.1 bis 7.4 ist es nötig die Lufttemperatur und die Fahrbahntemperatur zu kennen. Die dafür jeweils notwendige Prognose kann von diversen Wetteranbietern bereitgestellt werden.

7.2 Abfuhr - Verkehr und Verdunstung

Die Mechanismen der Verteilung des Wassers auf der Fahrbahn durch den Verkehr und der Querneigung sind die selben wie bei der Verteilung von Salz auf der Fahrbahn und bereits in Abbildung 6.1 auf Seite 101 dargestellt. Über den Abfluss von Wasser von einer Fahrbahn bietet etwa [45] einen sehr detaillierte Untersuchung. Dabei wird über ein 3-dimensionales Rechenmodell die Längs- und Querneigung sowie die Fahrbahntextur berücksichtigt. Aufgrund der Komplexität der Berechnung des Wasserabflusses von einer Fahrbahn wird im Rahmen dieser Arbeit nur eine stark vereinfachte Methode angewandt. Für den Einsatz des hier entwickelten Modells für beispielsweise automatisierte Streumengeneinstellung sollte jedenfalls die Einbindung eines entsprechend gut entwickelten Abflussmodells erfolgen.

Die Berechnung der Filmdicke in dem im folgenden Kapitel 7.3 vorgestellten Modell basiert auf der gemessenen bzw. prognostizierten Niederschlagsmenge. Dabei wird die prognostizierte bzw., falls zum Zeitpunkt des Modelllaufs bereits verfügbar die gemessene Niederschlagsmenge über den weiteren zeitlichen Verlauf abgemindert. Eine wesentliche Einschränkung im Rahmen dieser Arbeit ist, dass Mengen über 200 μm gekappt werden. Bei höheren Wasserfilmdicken spricht man gemäß [3] von einer *nassen* Fahrbahn, zwischen 10 μm und 200 μm von einer *feuchten* Fahrbahn. Bei Filmdicken unter 200 μm geht man von einer *trockenen* Fahrbahn aus.

7.3 Modellierung und Verifizierung

Die Verdrängung durch den Verkehr und die Verdunstung wird mithilfe der Formel 7.6 aus [23] berücksichtigt. In dieser Formel wird die Wassermenge bei Regen berechnet, Niederschlag in Form von Schnee

kann damit nicht ausreichend abgebildet werden. Durch die starken Schwankungen in der Schneedichte von sehr locker bis nassem Schnee ist auch das Verhalten des Schnees sehr unterschiedlich. Die Werte für die Filmdicke ergibt sich aus der Superposition der für jeden einzelnen Zeitschritt berechneten Werte.

$$FD = (NS + Reif) * e^{-KFZ*(0,005+0,001*WS)} \quad (7.6)$$

Es bedeuten:

- NS - Niederschlagsmenge in [mm/h]
- Reif - Reifbildung in [mm/h]
- KFZ - Verkehrsbelastung in der berechneten Stunde [KFZ/h]
- WS - Windgeschwindigkeit in [m/s]

Die nach dieser Formel prognostizierte Entwicklung der Filmdicke bei Wind- und Verkehrseinfluss ist in Abbildung 7.1 beispielhaft für 3 Windgeschwindigkeiten und 2 Niederschlagsmengen dargestellt. Deutlich zu erkennen ist dabei, dass bereits geringe Windgeschwindigkeiten die Auftrocknung stark begünstigen während dieser Effekt bei weiter steigender Windgeschwindigkeit abnimmt. So ist der Unterschied zwischen 0 km/h und 50 km/h deutlich höher als zwischen 50 km/h und 100 km/h. In allen Fällen ist bereits nach 1.200 KFZ auf der Fahrbahn praktisch kein Wasserfilm mehr vorhanden.

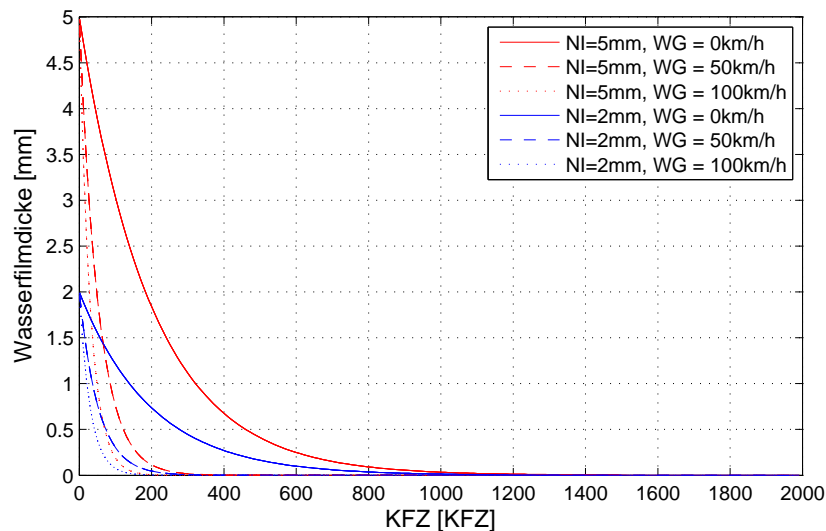
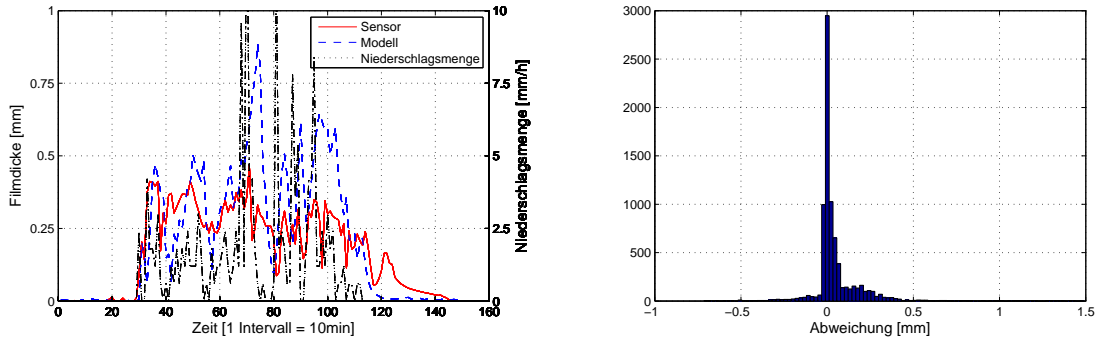


Abbildung 7.1: Entwicklung der Wasserfilmdicke gemäß Formel 7.6 für 3 Windgeschwindigkeiten und 2 Niederschlagsmengen

Die Verifikation der hier beschriebene Methode zur Berechnung der Wasserfilmdicke wurde mittels Daten einer Glättewarnanlage durchgeführt. Die Anlage liefert die zur Berechnung der Reifmenge notwendigen Temperaturdaten sowie Niederschlagsintensitäten sowie Wasserfilmdicke in 10 Minuten Intervallen. Die folgenden Diagramme zeigen Daten zwischen November 2014 und März 2015 gemessenen Niederschlagsereignissen und dazu berechneten Werten.

Ein typisches Niederschlagsereignis ist in Abbildung 7.2(a) dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die berechneten Werte stärker mit der Niederschlagsmenge schwanken als die gemessenen Wasserfilmdicken, welche gedämpfter auftreten. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass bei diesem Ereignis die lokalen Minima und Maxima zeitlich gut übereinstimmen. Berechnet man die Differenzen zwischen gemessener und berechneter Wasserfilmdicke für jeden Zeitschritt innerhalb eines Niederschlagsereignisses ist eine gute Übereinstimmung erkennbar. Abbildung 7.2(b) zeigt ein Histogramm aller Werte von Niederschlagsereignissen mit einem Mittelwert der Abweichung von $\bar{x}=0,0456$ mm und einer Standardabweichung von $\sigma=0,1423$ mm.

7 Filmdicke

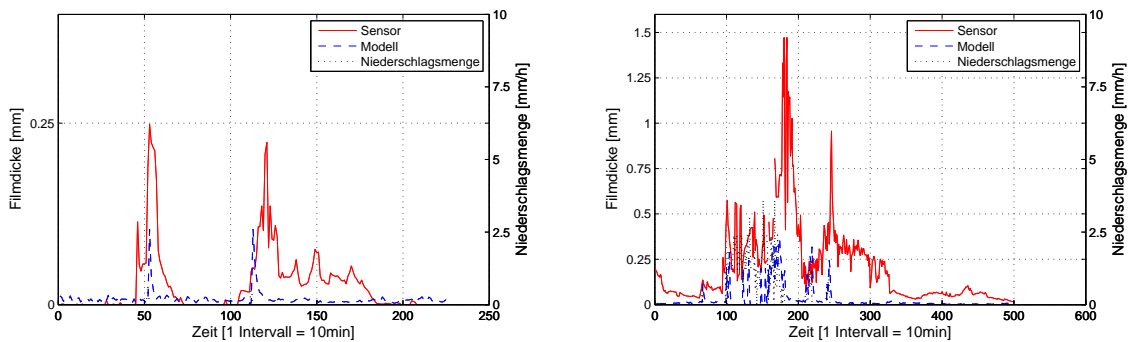


(a) Gemessene und berechnete Wasserfilmdicke sowie Nie- (b) Histogramm der Abweichung zwischen gemessener und berechneter Wasserfilmdicke aller Ereignisse von November 2014 bis März 2015

Abbildung 7.2: Gemessene und berechnete Wasserfilmdicke sowie Niederschlagsmenge für ein Ereignis und Abweichung über alle Ereignisse in der Saison 2014/2015

Zwei weitere Niederschlagsereignisse sind in Abbildung 7.3 dargestellt. Bei dem Niederschlagsereignis in der linken Abbildung 7.3(a) handelt es sich um eines mit sehr geringer Niederschlagsmenge. Aus den zweimaligen kurzen Niederschlagsereignissen ergibt sich nach der Berechnung nur ein sehr kurzer Anstieg der Wasserfilmdicke mit raschem Rückgang. Die gemessene Wasserfilmdicke ist dabei vergleichsweise hoch und deutlich länger vorhanden. Diese Abweichung kann neben der Messungenauigkeit der Sensoren auch durch die Verteilung der Feuchtigkeit durch den Verkehr entstehen. Neben der Verdrängung kann es auch vorkommen, dass Feuchtigkeit von einer nassen Fahrbahn auf einen trockenen Teil der Fahrbahn verbracht wird. Aufgrund der sehr geringen Wasserfilmdicke von unter 0,25 mm ist der Einfluss auf die Griffigkeit jedoch vergleichsweise gering.

Ein weiteres Problem mit den Eingangsdaten ist in Abbildung 7.3(b) dargestellt. Stimmt die berechnete und die gemessene Wasserfilmdicke zu Beginn des Niederschlagsereignisses noch gut überein, ist gegen Ende des Niederschlagsereignisses eine deutliche Differenz zu erkennen. Während der Sensor noch eine Filmdicke von etwa 0,25 mm erkennt, ist die Fahrbahn gemäß Berechnung bereits trocken. Grund dafür ist der fehlende Niederschlag, welcher bereits weit vorher abklingt. Da keine visuelle Beobachtungen zu diesem Zeitraum durchgeführt wurden konnte über den Grund dieser Abweichung keine Erklärung gefunden werden.



(a) Gemessene und berechnete Wasserfilmdicke sowie Nie- (b) Gemessene und berechnete Wasserfilmdicke sowie Niederschlagsmenge für ein länger andauerndes Regenereignis

Abbildung 7.3: Gemessene und berechnete Wasserfilmdicke sowie Niederschlagsmenge für verschiedene Regenereignisse

Dass die Berechnung der Wasserfilmdicke nach dem vorgestellten Prinzip funktioniert, zeigt die geringe Differenz zwischen berechneter und gemessener Wasserfilmdicke. Ein Beispiel für die gute Übereinstimmung ist anhand mehrerer kurzer Niederschlagsereignisse in Abbildung 7.4 dargestellt. Dabei wurde für jeden kurz andauernden Niederschlag Höhe und Verlauf der Wasserfilmdicke korrekt berechnet.

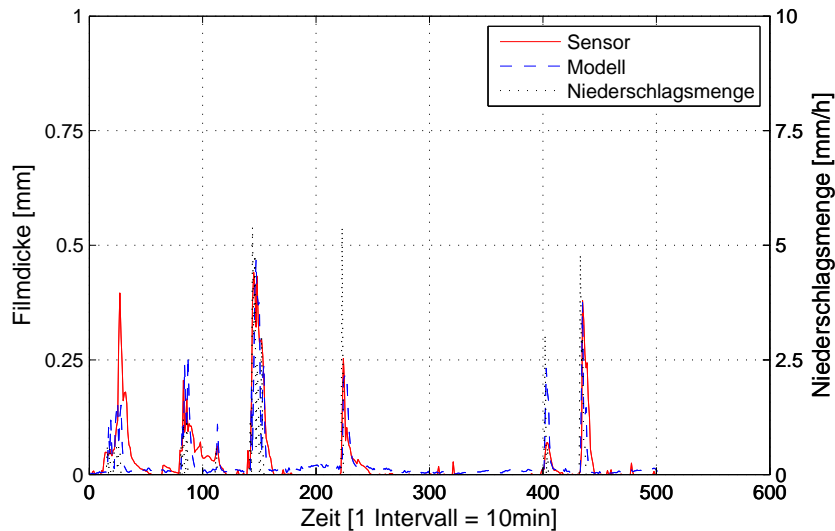


Abbildung 7.4: Gemessene und berechnete Wasserfilmdicke sowie Niederschlagsmenge für mehrere kurze Regenereignisse innerhalb von acht Stunden

Insgesamt zeigt sich, dass bei entsprechend guter Niederschlagsprognose, die Daten der gemessenen und berechneten Wasserfilmdicke im Bereich mittlerer Wasserfilmdicken ausreichend gut übereinstimmen. Für Bereiche mit sehr hoher gemessener Wasserfilmdicke ist der Grund der höheren Abweichung in der Vereinfachung der Berechnung des Wasserabflusses durch simple Limitierung auf einen Maximalwert zu suchen. Der Abfluss von Wasser über Längs- und Querneigung wird in diesem Modul nicht betrachtet, viel mehr werden Wasserfilmdicken in der Modellrechnung mit $200\mu\text{m}$ begrenzt. Für Wasserfilmdicken über diesem Grenzwert wird vorausgesetzt, dass diese durch die Neigung abrinnen. Durch Einbindung komplexerer Berechnungsmethoden des Wasserabflusses von Fahrbahnen, wie etwa [45], ist für diesen Modul eine Verbesserung denkbar. Für das in der gegenständlichen Arbeit vorgestellte Modell ist die Ungenauigkeit bei hohe Wasserfilmdicken jedoch akzeptabel, da in diesem Fall jedenfalls von einem Einsatz mit Räumen und Streuen zu rechnen ist und zumeist alle verfügbaren Ressourcen im Einsatz sind. Dabei wird durch das Räumen die Filmdicke drastisch verändert.

Kritischer ist jedenfalls die fehlende Korrelation aus berechneter Wasserfilmdicke aufgrund Reifbildung und der gemessenen Filmdicke wie dies in den ersten 100 Minuten in Abbildung 7.3(b) zu erkennen ist. Dazu muss neben der Modellierung jedenfalls auch die Schwierigkeit des Erkennens von Reif auf der Fahrbahn in Betracht gezogen werden. Hier stoßen derzeitige Sensoren rasch an die Grenzen der Messgenauigkeit. Für den Fall von Reifbildung stellt sich daher noch ein Forschungsbedarf heraus, der stark meteorologisch ausgeprägt ist.

7.4 Einbindung

Aufgrund der hohen Unsicherheit, insbesondere für Fälle von Reifglätte, ist die Einbindung der Wasserfilmdicke in das Winterdienstmodell auf rein theoretische Basis derzeit nicht zu empfehlen. Hier bietet sich eine Kombination aus Prognosen auf Basis von Messwerten bestehender Glättewarnanlagen sowie mobiler Sensoren an. Die Prognosen sollen dabei sowohl den Bereich der nächsten Stunden abdecken sowie die Lücken im Netz der Glättewarnanlagen schließen.

Als stationäre Sensoren kommen derzeit sowohl optische Systeme sowie fix in der Fahrbahn verbauten Sensoren zum Einsatz. Während mit den in der Fahrbahn verbauten Sensoren bereits Jahrzehnte an Erfahrungen vorliegen, sind optischen Sensoren erst seit wenigen Jahren auf dem Markt. Gemäß Untersuchungen der BAST [10] wird die Filmdicke üblicherweise optisch über die Reflexion von Lichtwellen oder elektrisch über die Änderung von Leitfähigkeit und Frequenz abgebildet. In der Regel sind die Sensoren zusammen mit anderen Sensoren für Fahrbahntemperatur und Gefriertemperatur zu einem gemeinsam verbauten Sensorblock zusammengefasst, um ein möglichst vollständiges Bild der Fahrbahnsituation zeichnen zu können.

In einem Forschungsprojekt der TU Wien für die ASFiNAG [33] wurden auch die Sensoren zur Bestimmung der Wasserfilmdicke überprüft. Die Ergebnisse an den untersuchten stationären Sensoren für mittels Formel 7.6 errechnete und tatsächlich von Sensoren gemessene Filmdicken sind in Abbildung 7.5 zusammengefasst. Wenn die aus der bekannten aufgetragenen Wassermenge berechnete Filmdicke mit der gemessenen übereinstimmt, so liegen die Ergebnisse auf der 45°-Diagonalen.

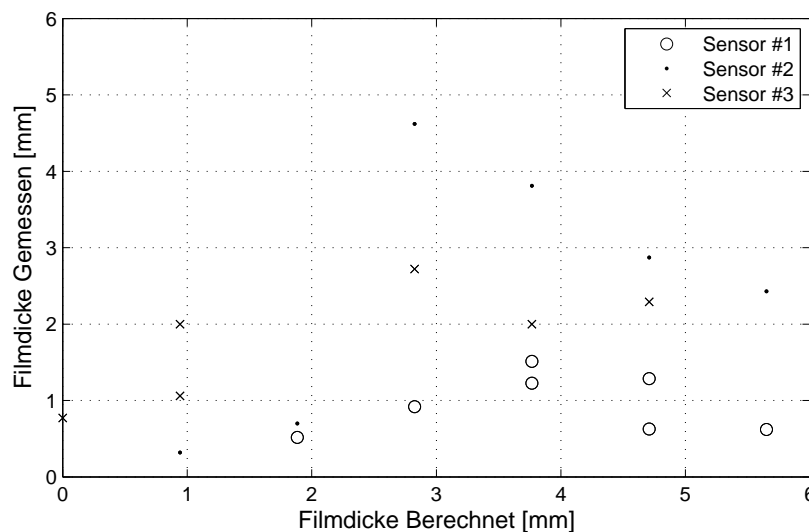


Abbildung 7.5: Überprüfung 3 unterschiedlicher Sensortypen zur Bestimmung der Wasserfilmdicke

Von den drei unterschiedlichen Sensortypen im Test zeigt sich dabei, dass lediglich einer brauchbare Werte liefert. Für Wasserfilmdicken über 3 mm zeigen alle Sensoren falsche Werte an, wobei der gleichmäßige Rückgang aller Sensoren bei weiter steigender Filmdicke auf einen dem Messprinzip zurechenbaren Fehler hindeutet. Da Wasserfilmdicken in dieser Höhe jedoch bei funktionierender Straßenentwässerung nicht vorkommen ist der Fehler nicht ausschlaggebend. Problematischer ist jedoch die hohe Abweichung von zwei der drei getesteten Sensortypen. Hier besteht noch Handlungsbedarf bei den Herstellern der Sensoren, welche derzeit eine neue Generation von Sensoren auf den Markt bringen.

Ungeachtet der theoretisch unter Laborbedingungen erzielbaren Genauigkeit dieser und anderer Sensortypen sei an dieser Stelle auf die Problematik lokal verbauter Sensoren verwiesen. Diese können naturgemäß nur punktuelle Informationen des Fahrbahnzustands liefern, was im Fall von Temperaturmessungen durchaus wertvoll sein kann. Bei Messungen der Wasserfilmdicken ist jedoch aufgrund sich

stetig ändernder Entwässerungsbedingungen (Anlageverhältnisse), des Fahrbahnzustandes (z.B. Spurrinnen) und der Problematik der Einbauhöhe der Sensoren in Kombination mit der Abnutzung der Fahrbahn eine repräsentative Messung nur begrenzt möglich. Bei entsprechender Kalibrierung weisen daher optische mobile oder stationär angeordnete Systemen ohne Verbau in die Fahrbahn ein wesentlich höheres Potential auf.

Die Messung der Wasserfilmdicke sowie Bestimmung des Aggregatzustands des Wasserfilms (Wasser, Schnee, Eis, Reif etc.) ist eine wichtige Information für den Straßenzustand allgemein bzw. den Winterdienst im Besonderen. Nachfolgend werden daher die Erkenntnisse aus den bisherigen Erfahrungen der Praxis sowie den Vergleichsmessungen kurz zusammengefasst:

- Bei der Untersuchung zeigten die Sensoren noch nicht die gewünschte Messgenauigkeit
- Selbst wenn diese Sensoren unter Laborbedingungen funktionieren, ergeben sich durch den Einbau, lokale Situation und Abnutzung technisch kaum ausschließbare Fehlerquellen
- Punktuelle Messungen sind aufgrund sich stetig ändernder Entwässerungssituation in Hinblick auf die Wasserfilmdicke nur begrenzt geeignet
- Mobile oder stationär nicht in der Fahrbahn verbaute optische Systeme sind bei entsprechender Kalibration eine mögliche Alternative sofern die Messgenauigkeit ausreichend ist

Für eine detaillierte Darstellung der Forschungsergebnisse sei auf den Endbericht [33] verwiesen.

8 Griffigkeit

Der finale Schritt in der Modellrechnung besteht nun darin, aus Restsalzmenge und Wasserfilmdicke die Fahrbahngriffigkeit zu prognostizieren. Die Griffigkeit ist für den Autofahrer die einzig wesentliche Kenngröße, da sie Bremswege und mögliche Kurvengeschwindigkeiten bestimmt. Damit schließt das vorgestellte Modell den Bogen zwischen Witterungseinflüssen (Wasserfilmdicke, Temperatur) und Maßnahmen des Straßenbetreibers (Restsalzmenge) zum Straßennutzer.

Liegt die Fahrbahntemperatur über dem Gefrierpunkt der Lösung auf der Fahrbahn bleibt die Lösung bzw. das Wasser flüssig und die Griffigkeit entspricht den in nassem Zustand ermittelten Werten. Frieren die Lösung jedoch aufgrund einer unter dem Gefrierpunkt der Lösung liegenden Fahrbahntemperatur, kommt es zu einer deutlichen Reduktion der Griffigkeit, der *Eisglätte*. Bleibt bei Schneefällen der Schnee auf der Fahrbahn liegen, spricht man von *Schneeglätte*. Im Gegensatz zu Eis ist Schnee auf der Fahrbahn jedoch sehr gut zu erkennen, Lenker von Fahrzeugen können also besser darauf reagieren. Je nach Art des Schnees kann auf einer Schneefahrbahn mit einem entsprechend gut ausgerüsteten Fahrzeug noch eine vergleichsweise gute Griffigkeit erreicht werden. Erreicht wird dies durch die Optimierung von Winterreifen auf Schneehaftung.

8.1 Haftung von Gummireifen

Zu den Reibungsmechanismen, welche die Haftung von Reifen auf der Fahrbahn beschreiben, existiert eine Vielzahl an Modellen und empirischer Untersuchungen. Eine detaillierte Übersicht kann in [64] gefunden werden. In dieser Arbeit wird lediglich ein kurzer Überblick gegeben, der Schwerpunkt liegt auf den für winterliche Fahrbahnverhältnisse relevanten Parametern.

8.1.1 Reibungsmechanismen

Nach dem aktuellen Stand der Forschung wird die Gummireibung in vier verschiedene Reibungsmechanismen aufgeteilt, welche gemäß Gleichung 8.1 zu einem Reibwert zusammengeführt werden.

$$F = F_A + F_H + F_K + F_V \quad (8.1)$$

Es bedeuten:

- F - Gesamter Reibwert [-]
- F_A - Adhäsionskomponente [-]
- F_H - Hysteresekomponente [-]
- F_K - Kohäsionskomponente [-]
- F_V - Viskosekomponente [-]

Adhäsionskomponente

Die Adhäsionskomponente entsteht durch die intermolekularen Bindungskräfte zwischen den langgezogenen Gummimolekülen und den Molekülen der Fahrbahnoberfläche. Die Enden der Gummimoleküle haften an den Molekülen der Fahrbahnoberfläche, wobei die Gummimolekülketten durch die Bewegung

8 Griffigkeit

so lange gedehnt werden, bis die Verbindung abreißt. Aus der dafür notwendigen Energie resultiert eine Widerstandskraft, welche die gesamte Adhäsionskomponente ausmacht. Die Adhäsionskomponente ist auf glatten trockenen Fahrbahnen besonders stark ausgeprägt und nimmt bei einem vorhandenen Zwischenmedium (Wasser, Schnee, Eis) auf eine vernachlässigbare Größe ab.

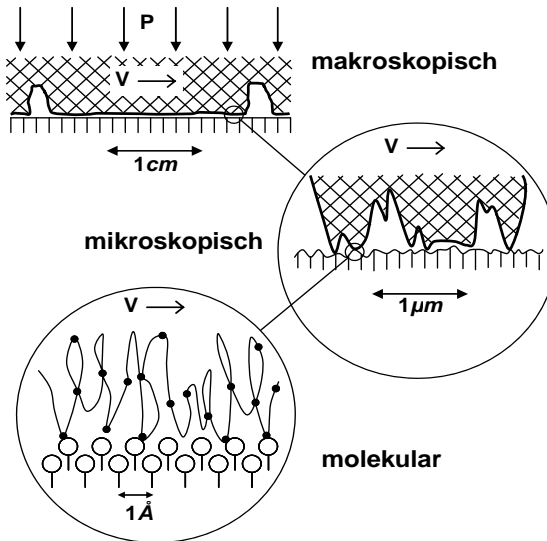


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung der Adhäsionskomponente nach [49]

Hysterese Komponente

Die Hysterese Komponente beschreibt die Energiedissipation durch die innere Reibung aufgrund Verformung des Gummis beim Gleitvorgang über eine raue Oberfläche. Bei niedrigen Geschwindigkeiten bildet sich eine annähernd symmetrische Druckverteilung, welche mit zunehmender Geschwindigkeit eine Schiefe bekommt. Der horizontale Anteil entspricht den durch die Hysterese Komponente übertragbaren Horizontalkräften.

Ein typisches Beispiel für die Erhöhung der Hysterese Komponente im Winterdienst ist der Einsatz von Streusplitt, welcher zusätzliche Berührungsspitzen ausbildet.

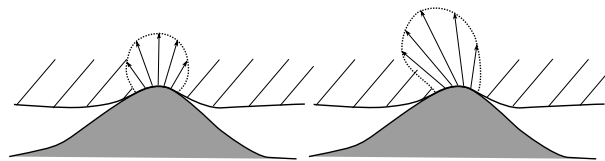


Abbildung 8.2: Schematische Darstellung der Hysterese Komponente nach [49]

Viskose Komponente

Wird der Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn durch ein flüssiges Zwischenmedium getrennt, treten in dem Film Scherkräfte auf, welche durch die Viskose Komponente beschrieben werden. Die Reibungskraft kann im Extremfall (z. B. Aquaplaning) nur aus der Viskose Komponente bestehen. Auf glatten nassen Oberflächen ist die Viskose Komponente dominant. Auf Eis- bzw. Schneefahrbahn entsteht durch den Druck der Radlast und die Reibungswärme ein dünner Flüssigkeitsfilm, welcher die viskose Reibung erklärt ([49]).

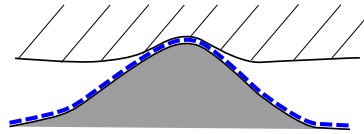


Abbildung 8.3: Schematische Darstellung der Viskosekomponente nach [49]

Kohäsionskomponente

Kohäsionsreibung beschreibt die Energiedissipation bei der Erzeugung neuer Oberflächen, etwa durch Abrieb. Dabei muss dem Reibungssystem nicht zurückwandelbare Energie zugeliefert werden. Ein Beispiel ist der sichtbare Reifenabrieb bei starken Brems- bzw. Beschleunigungsvorgängen.

Bei guten Winterreifen entsteht etwa 50 % der Reibung durch diesen Formschluss. Dabei ist jedoch nicht der Reifenabrieb sondern die Zerklüftung des Schnees durch Lamellen und Nutkanten des Reifens ausschlaggebend. Neben dem Reifenprofil spielen hier auch Art und Zustand der Schneedecke eine bedeutende Rolle. So liefert „harter“ Schnee bei tiefen Temperaturen in der Regel einen besseren Reibwert als nasser Schnee. Wird die Schneedecke durch die Reifen stark verdichtet und kann durch das Reifenprofil nicht mehr zerklüftet werden, sind auch mit guten Winterreifen kaum bessere Reibwerte als auf Eisfahrbahn erzielbar.

Form, Tiefe und Position der Lamellen im Reifenprofil sind für die Qualität von Winterreifen von so entscheidender Bedeutung, dass Entwicklung, Test und Produktion strenger Geheimhaltung unterliegen. Für den Vergleich von Griffigkeitsmessungen auf Schnee- bzw. Eisfahrbahn ist daher die Kenntnis des verwendeten Reifens unbedingt notwendig.

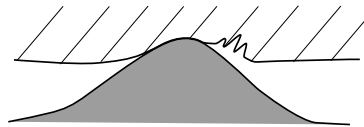


Abbildung 8.4: Schematische Darstellung der Kohäsionskomponente nach [49]

8.2 Einfluss der Fahrbahntextur

Aufgrund der geringen Größe der viskosen Reibungskomponenten (Aquaplaning) und der stark nachlassenden Wirkung des Reibungsmechanismus Adhäsion bei nasser oder feuchter Fahrbahn sind diese beiden für eine Modellierung des Winterdienstes nicht von Bedeutung. Für die Kohäsionskomponente kann aufgrund der Vielzahl verschiedener Reifen nur ein Standardmodell betrachtet werden.

Die Hysterese Komponente ist für die Modellierung ausschlaggebend und kann, basierend auf der Fahrbahntextur auch quantifiziert werden. Wie in [59] und für den Einfluss von Wasser detaillierter in [60] beschrieben, reduziert eine Füllung der Fahrbahntextur durch ein Medium die Rauheit der Oberfläche. Die glattere Textur führt zu weniger Deformation des Reifens und reduziert damit die Energiedissipation.

Wird die Fahrbahntextur nicht mit Wasser, sondern mit Eis oder Schnee gefüllt, kommt es ebenso zu einer Abnahme der Gummideformation und damit der Energiedissipation. Mit zunehmender Füllung der Fahrbahntextur wird dadurch, wie in Abbildung 8.5 schematisch dargestellt, die erzielbare Fahrbahngriffigkeit reduziert. Auf einer ebenen Eisfahrbahn bzw. festgefahrenen Schneedecke sind damit bei einem profillosen Reifen alle Reibungsmechanismen auf ein Minimum reduziert. Griffigkeitsmessungen auf festgefahrenen Schneedecken mit dem Messgerät GripTester MK II [36] bestätigen diese Theorie mit Messwerten von $\mu = 0,05$.

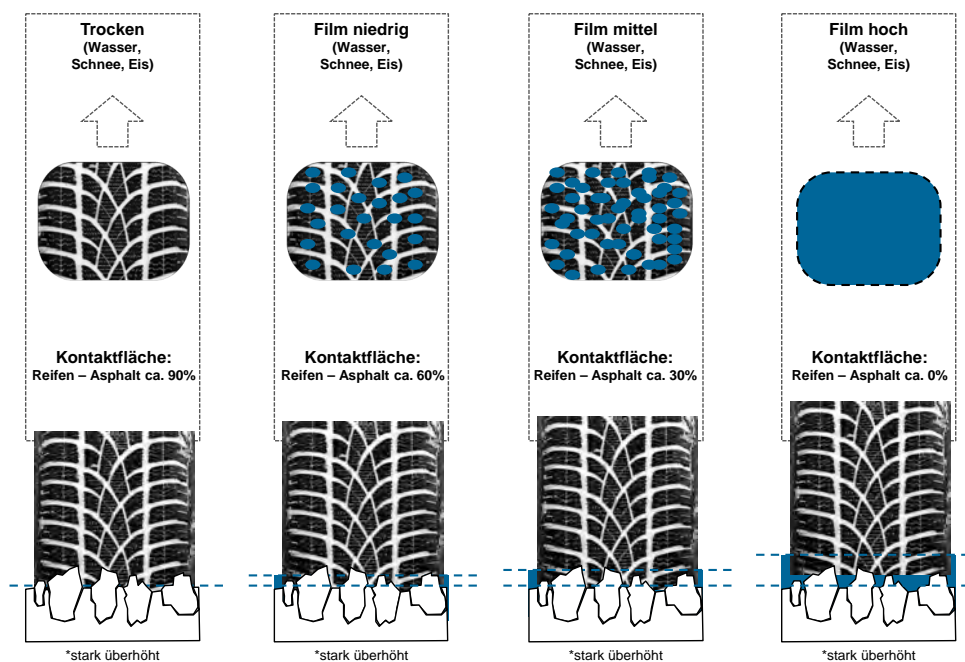


Abbildung 8.5: Einfluss der Texturfüllung auf die Griffigkeit

8.2.1 Bestimmung der Fahrbahntextur

Für eine Prognose der Fahrbahngriffigkeit abhängig von dem Grad der Texturfüllung ist die Kenntnis der Textur der Fahrbahnoberfläche notwendig. Zur Modellierung eines oder mehrerer Streckenabschnitte sind daher durchgehende Texturparameter notwendig. Im Folgenden werden linienhafte sowie punkthafte Texturerfassungsmethoden mit Vor- und Nachteilen der einzelnen Methoden verglichen.

Ein einfaches Verfahren, um die Textur von Straßenoberflächen zu bestimmen, ist das Sandfleckverfahren, das ohne teures Messequipment auskommt und ohne großen Aufwand rasch durchgeführt werden kann. Bei diesem Verfahren wird eine definierte Sandmenge (bzw. Glasperlen) auf einer sauberen und trockenen Straßenoberfläche ausgebreitet. Der Sand wird so verteilt, dass er einen kreisförmigen Fleck bildet, dessen Durchmesser bestimmt wird. Wird das bekannte Sandvolumen durch die bedeckte Fläche dividiert, erhält man einen Wert, der die mittlere Tiefe der Sandschicht darstellt, d. h. eine *mittlere Texturtiefe* (MTD - Mean Texture Depth).

Für einen gegebenen Fahrbahnoberflächentyp müssen mindestens vier zufällig verteilte Messungen durchgeführt werden. Das arithmetische Mittel der einzelnen Werte ist als mittlere Texturtiefe (Makrotextur) der geprüften Fahrbahnoberfläche anzusehen. Die mittlere Texturtiefe MTD der Fahrbahnoberfläche kann gemäß Gleichung 8.2 berechnet werden. Die MTD ist definiert als Quotient des Texturvolumens durch die Fläche des Messbereiches. Ein Fahrbahnbereich mit 1 m^2 Fläche und einer MTD von 1 mm hat daher ein Texturvolumen von $1 \cdot 1.000 \cdot 1.000 = 1.000.000 \text{ mm}^3$, was äquivalent zu einem Liter bzw. 1.000 g Wasser ist. Das entspricht auch der Definition von Niederschlagsmengen in mm , wodurch die Textur einer Fahrbahn mit $\text{MTD} = 1 \text{ mm}$ genau 1 mm Niederschlag aufnehmen kann.

$$MTD = \frac{4 * V}{\pi * D^2} \quad (8.2)$$

Es bedeuten:

MTD - mittlere Texturtiefe [mm]

V - Probenvolumen, d. h. Zylinderinnenvolumen [mm^3]

D - mittlerer Durchmesser der vom Material bedeckten Fläche [mm]

Die Texturmessung mit dem Messfahrzeug RoadSTAR [19] erfolgt in der mit Wasser angefeuchteten rechten Radspur. Die Messung liefert Einzelprofile der Makrotextur von jeweils 127 mm Länge in einem Längsabstand von einem Meter. Jedes Einzelprofil besteht aus 128 Höhenmessungen, die in einem Abstand von 1 mm mit einer Genauigkeit von $\pm 0,06$ mm durchgeführt werden. Aus diesem erfassten Höhenprofil wird gemäß EN ISO 13473-1 [4] die 2-dimensionale mittlere Profiltiefe (MPD - Mean Profile Depth) über eine 100 mm lange Grundlinie bestimmt (Abbildung 8.6).

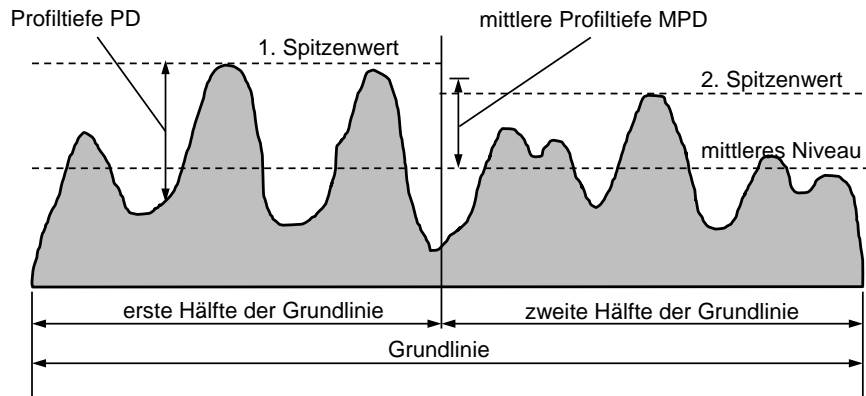


Abbildung 8.6: Definition der mittleren Profiltiefe MPD gemäß EN ISO 13473-1

Demnach wird die mittlere Profiltiefe MPD als Differenz zwischen dem arithmetischen Mittelwert der Spitzenwerte der beiden Grundlinienhälften und dem mittleren Niveau der gesamten Grundlinie berechnet. Aus zehn MPD-Werten wird nach Elimination von zwei Extremwerten vorerst ein 10-m-MPD-Texturwert ermittelt. Dadurch werden einzelne Löcher, Betonfugen, Ausbrüche etc. des maßgebenden Texturwertes herausgefiltert. Fünf 10-m-Texturwerte werden durch arithmetische Mittelwertbildung zu einem maßgebenden 50-m-MPD-Wert zusammengefasst.

Da dieses Lasertexturmessverfahren am Messfahrzeug RoadSTAR ein zweidimensionales Messverfahren ist (Messung entlang einer Linie) und die Texturangaben aus dem Sandfleckverfahren aus einem dreidimensionalen Messverfahren stammen, ist in der EN ISO 13473-1 eine Korrelation angegeben, um aus dem MPD-Wert den so genannten ETD-Wert (Estimated Texture Depth) rückzurechnen. Die Umrechnung nach EN ISO 13473-1 erfolgt gemäß Gleichung 8.3.

$$ETD = 0,8 \cdot MPD + 0,2 \quad (8.3)$$

Es bedeuten:

- ETD - geschätzte Oberflächentexturtiefe (3-dimensional) [mm]
- MPD - mittlere Profiltiefe (2-dimensional) [mm]

Die Erfassung der Textur einiger Bohrkerne erfolgte im Labor des Instituts für Verkehrswissenschaften der TU Wien mit einem konfokalem Punktlaser. Der Vorteil dieses Systems liegt darin, dass auch schwach reflektierende Oberflächen mit einer sehr hohen Auflösung erfasst werden können. Die maximale Auflösung des Gerätes liegt in z-Richtung bei 300 nm, in x- und y-Richtung bei 12 μ m. Die gewonnenen Bohrkerne mit einem Durchmesser von 15 cm erlauben eine maximale quadratische Messfeldgröße von 100 mm x 100 mm. Die Messauflösung wurde mit 1.000 Punkten x 1.000 Punkten festgelegt, wodurch 1.000.000 Messpunkte in einem Raster von 0,1 mm Abstand auf der Probestfläche verteilt sind. Zur Bestimmung der Makrotextur ist diese Auflösung in jedem Fall ausreichend, zumal die Glasperlen beim Sandfleckverfahren einen Mindestdurchmesser von 0,18 mm aufweisen.

8.2.2 Korrelation zwischen den Messverfahren

Bei der Korrelation der drei Messverfahren ist besonders darauf zu achten, dass das Sandfleckverfahren und die Texturerfassung im Labor 3-dimensionale Messverfahren sind, während die Messungen des RoadSTARs zweidimensional durchgeführt werden. Die drei Methoden sind in Abbildung 8.7 dargestellt und zeigen die Unterschiede zwischen punktueller optischer Aufnahme (Labor, RoadSTAR) und direkter volumetrischer Aufnahme der Textur (Sandfleck).

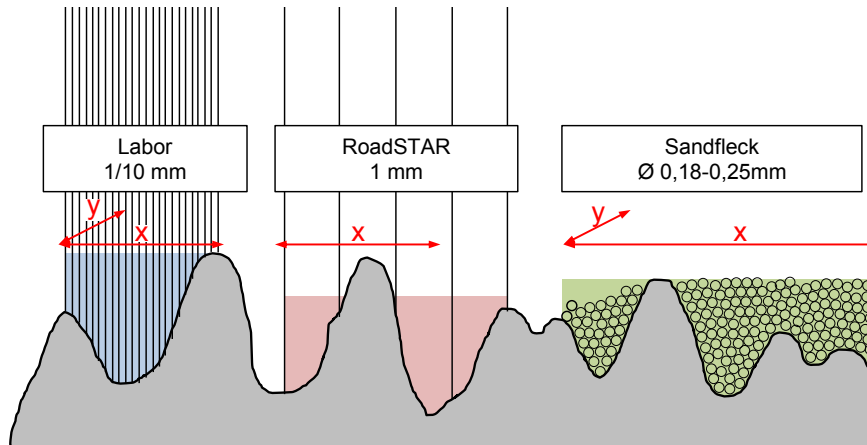


Abbildung 8.7: Schematischer Vergleich der unterschiedlichen Texturmessmethoden

Der Laser im Labor hat neben der höheren möglichen Auflösung noch den Vorteil, in zwei horizontalen Achsen messen zu können, wodurch ein exaktes Oberflächenbild entsteht. Anhand dieser Oberfläche kann das Texturvolumen des untersuchten Probekörpers errechnet werden. In der Datenauswertung wird der höchste Punkt des Messbereiches von 10 cm x 10 cm mit $z = 0$ angenommen und allen anderen Punkten eine Höheninformation z_i zugewiesen. Dabei wird z_i vom höchsten Punkt im Messbereich positiv nach unten gezählt. Zur Berechnung des Volumens wird jeder Messpunkt als Prisma mit einer quadratischen Grundfläche mit Seitenlänge 0,1 mm angenommen. Das Volumen, das die Textur bis zur Bedeckung aller Spitzen aufnehmen kann, lässt sich damit gemäß Gleichung 8.4 berechnen.

$$V_L = \sum z_i \cdot A_i \quad (8.4)$$

Es bedeuten:

- V_L - Füllvolumen der Textur [mm^3]
- z_i - Höheninformation eines Messpunktes [mm]
- A_i - Fläche des Messpunktes ($0,01 \text{ mm}^2$) [mm^2]

Durch diese Umrechnung kann der Vergleich zwischen Sandfleckverfahren und Texturerfassungsgerät direkt geführt werden. Die standardisierte Auswertung der Sandfleckverfahren wie in EN 13036-1 beschrieben (Gleichung 8.5) eignet sich aufgrund der Ausgangsgröße MTD zwar nicht, das gefüllte Volumen lässt sich jedoch anhand einiger bekannter Eingangsgrößen gemäß Gleichung 8.5 errechnen. Dabei kann das Volumen entweder auf die Messfläche der Laborversuche oder auf ein Einheitsmaß (etwa 1 m^2) bezogen werden.

$$V = \frac{4 \cdot A_B}{(\pi \cdot D^2)} \cdot V_{SF} \quad (8.5)$$

Es bedeuten:

- V - Füllvolumen der Textur [mm^3]
- D - Gemittelter Durchmesser des Sandflecks [mm]

A_B - Bezugsfläche [mm²]
 V_{SF} - Volumen des Materials beim Sandfleck [mm³]

Das Materialvolumen V_{SF} ist durch den verwendeten Messzylinder konstant 24.620 mm³ und der mit dem Texturerfassungsgerät vermessene Bereich A_B konstant 10.000 mm² groß. Parallel zur Bohrkernentnahme wurde das Texturvolumen der Deckschicht im Feld mittels Sandfleckverfahren (jeweils vier Flecken) bestimmt.

Für beide Verfahren wird für sieben unterschiedliche Deckschichten (Asphaltbeton, Waschbeton) der Mittelwert der Einzelmessungen bestimmt und der Zusammenhang der Messmethoden in Abbildung 8.8 dargestellt. Die mit $n = 7$ geringe Datenmenge lässt noch keine statistisch ausreichend abgesicherte Aussage zu, zeigt jedoch einen deutlichen Trend, zumal das Bestimmtheitsmaß der linearen Regressionsgeraden mit $R^2 = 0,9833$ sehr hoch ist. Prognose- und Konfidenzintervall für einen 95%-Vertrauensbereich sind für die gewählte Regression ebenfalls in Abbildung 8.8 dargestellt, wobei das Prognoseintervall in erster Linie durch den Bereich fehlender Daten zwischen 7.000 mm³ und 10.000 mm³ Volumen Sandfleck groß ist.

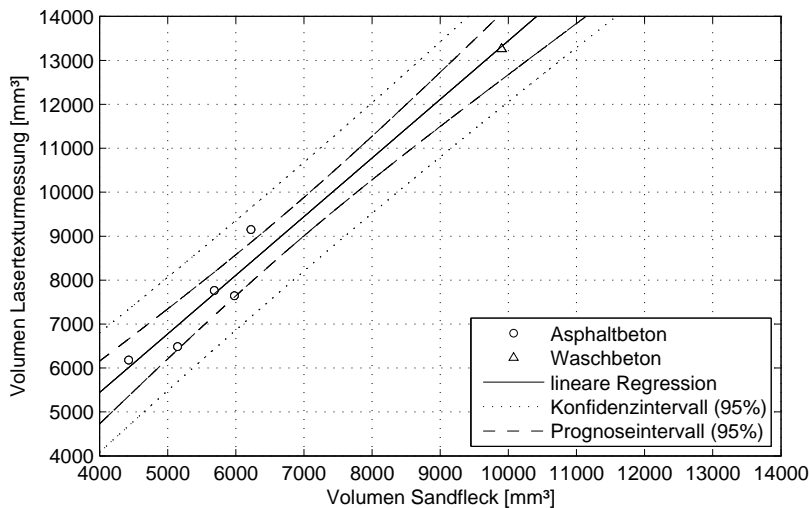


Abbildung 8.8: Bestimmung des Texturvolumens mittels Sandfleckverfahren bzw. Lasertexturerfassung an Bohrkernen aus Asphaltbeton- und Waschbetondeckschichten

Der Vergleich der beiden Methoden zeigt, dass das mittels Lasertexturerfassung bestimmte Volumen immer höher liegt als das aus dem Sandfleckverfahren. Dieser Unterschied kann dadurch erklärt werden, dass beim Sandfleckverfahren nicht nur eine Spitze aus dem Füllmaterial hervorsteht, sondern eine ganze Reihe lokaler Hochpunkte vorhanden ist. Bei der Berechnung des Volumens aus den Daten der Lasertexturerfassung wird jedoch der globale Hochpunkt des Messbereiches als Nullebene herangezogen. Das zu Verfügung stehende Volumen wird bei der Berechnung aus der Lasermessung daher überschätzt.

Die Anpassung der geometrischen Messung an die volumetrische durch das Herabsetzen der Bezugsebene bei der Berechnung des Volumens ist aufgrund der stark unterschiedlichen Topographie nicht empfehlenswert. Eine gute Lösung bietet die Umrechnung zwischen den beiden Verfahren, welche für Asphaltbeton- und Waschbetondeckschichten über Gleichung 8.6 erfolgen kann. Aufgrund der vergleichsweise geringen Stichprobengröße sind noch weitere Messungen empfehlenswert, um den Zusammenhang für Berechnungen auf Netzebene abzusichern. Insbesondere bei Drainasphalt ist mit einem geänderten Zusammenhang zu rechnen.

$$V_{Laser} \approx 1,335 \cdot V_{SF} + 101,3 \tag{8.6}$$

8 Griffigkeit

Es bedeuten:

- V_{Laser} - geometrisch bestimmtes Volumen der Textur [mm^3] (Lasertexturerfassung)
- V_{SF} - volumetrisch bestimmtes Volumen der Textur [mm^3] (Sandfleckverfahren)

8.2.3 Zusammenhang RoadSTAR - Sandfleck

Zur Korrelation des zweidimensionalen Texturmessverfahrens des RoadSTARs mit dem dreidimensionalen Sandfleckverfahren kann die mittlere Profiltiefe (MPD) mittels Gleichung 8.6 in die geschätzte Oberflächentexturtiefe (ETD - Estimated Texture Depth) umgerechnet werden, die gemäß EN ISO 13473-1 eine Abschätzung für die mittels Sandfleckverfahren ermittelte Texturtiefe darstellt.

Eine genauere Betrachtung der Korrelation ist in Abbildung 8.9 dargestellt, die zusätzlich Konfidenz- und Prognoseintervall (jeweils 95%-Fraktile) der Regressionsgeraden enthält. Die Lage der Regressionsgeraden ist durch die Messungen statistisch gut abgesichert, das 95%-Prognoseintervall ist jedoch relativ groß, wodurch neue Beobachtungen nur im Rahmen dieser Bandbreite im Voraus ermittelt werden können.

Für die Umsetzung des entwickelten Winterdienstmodells soll von bereits bestehenden MPD-Daten aus RoadSTAR-Messungen auf das tatsächliche Volumen geschlossen werden, was eine Umkehr der Achsen ($x = \text{RoadSTAR}$, $y = \text{MTD}$) notwendig macht. Die Unsicherheit in der Prognose bei der Berechnung der MTD-Werte kann durch die Wahl eines unteren Fraktilwertes (z. B. 80%-Fraktile Prognoseintervall als Bezugsgerade) erfolgen, um die Zeitreserve bis zur Füllung der Textur bzw. beginnender Glätte nicht zu überschätzen. Die mittlere Texturtiefe kann demnach mittels Gleichung 8.7 aus vorhandenen Zustandserfassungen ermittelt werden.

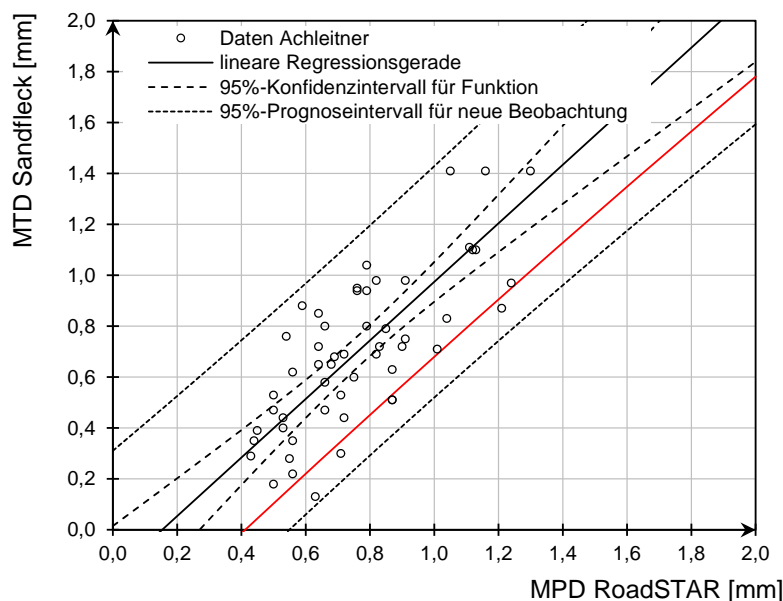


Abbildung 8.9: Vergleich der gemessenen Texturtiefen zwischen Sandfleckverfahren (MTD) und RoadSTAR (MPD) $n=53$, $R^2=0,646$, $\sigma=0,2231$ Datenquelle: [1]

$$MTD = 1,1354 * MPD - 0,4685 \quad (8.7)$$

Es bedeuten:

- MTD - Mittlere Texturtiefe (3-dimensional) nach Sandfleckverfahren [mm]
- MPD - Mittlere Profiltiefe (2-dimensional) nach RoadSTAR-Messungen [mm]

8.3 Modellierung

Die Abnahme der Fahrbahngriffigkeit bei Schnee oder Eis wird über das Füllungsverhältnis der Fahrbahntextur mit Schnee oder Eis modelliert. Dabei nimmt die Griffigkeit zwischen dem Wert einer trockenen Fahrbahn hin zu einer reinen Eisfahrbahn stetig ab. Grundlage ist die Aufstandsfläche des Reifens auf den aus der (teil-)gefüllten Textur herausragenden Gesteinsspitzen.

Aus der Geometrie der Makrotextur der Fahrbahnoberfläche kann damit bei anhaltendem Schneefall prognostiziert werden, wie die Fahrbahngriffigkeit abnimmt. Notwendig ist dazu jedoch die Kenntnis der Makrotextur und das Verhältnis zwischen gefülltem Texturvolumen und benetzter Oberfläche.

8.3.1 Zusammenhang Volumen und Oberfläche der gefüllten Textur

Die Topographie einer Fahrbahndeckschicht kann je nach Bauweise aber auch Abnutzungsgrad stark variieren. Beispielhaft sind dafür in Abbildung 8.10 eine nur 6 Monate alte Waschbetondecke mit ausgekehrten Gesteinsspitzen und eine etwa 15 Jahre alte Asphaltbetondecke gegenübergestellt. Die stark überhöhten Grafiken sind das Ergebnis der Texturmessungen mittels Laser im Labor anhand von Bohrkernen. Im hier entwickelten Modell spielen nun die erhöhten Gesteinsspitzen sowie die verfügbaren Texturvolumina eine Rolle.

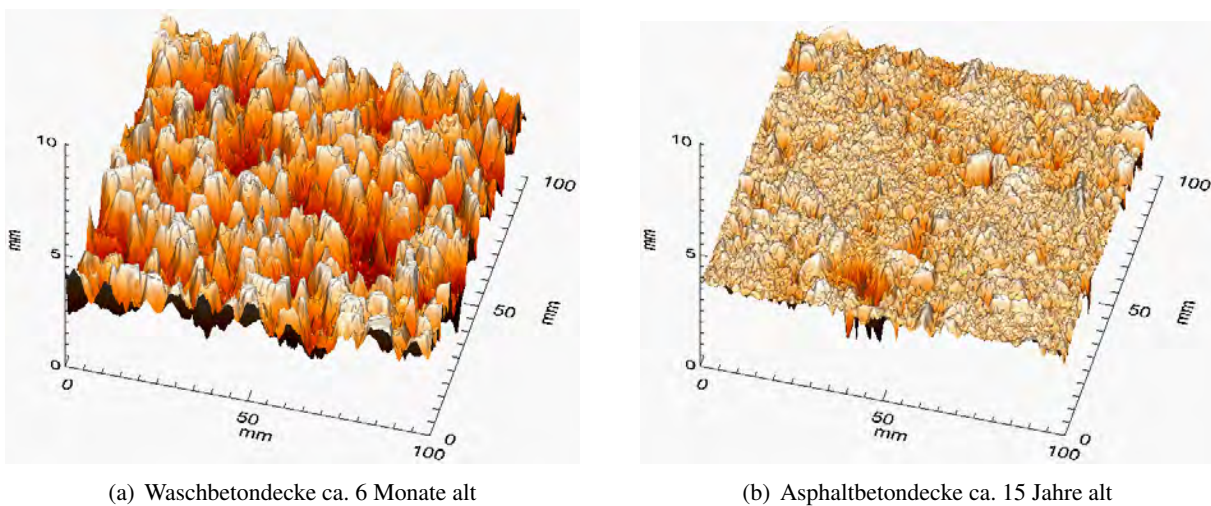


Abbildung 8.10: Überhöhte 3-dimensionale Darstellung unterschiedlicher Makrotexturen

Für die Modellrechnung muss das Verhältnis aus Volumen der gefüllten Textur und der Flüssigkeitsoberfläche der gefüllten Textur dargestellt werden können. Basierend auf den geometrischen Daten der Lasermessung kann dies mit der schrittweisen Anhebung eines Schwellenwertes und Berechnung des Volumens und des Oberflächenanteils der Flüssigkeit für jeden Rechenschritt geschehen. In Abbildung 8.11 ist beispielhaft ein Rechenschritt mit Teilfüllung dargestellt. Für jeden Rechenschritt wird das Volumen der Flüssigkeit in der Textur (dunkelblaue Fläche), das noch freie Volumen der Textur (hellblaue Fläche) sowie die Oberfläche der Flüssigkeit in der Textur (orange strichliert) berechnet.

Das Ergebnis der beschriebenen Analyse der Makrotextur ist für 16 unterschiedliche Bohrkern in Abbildung 8.12 dargestellt. Dabei ist der prozentuale Anteil der benetzten Oberfläche dem prozentualen Anteil des gefüllten Volumens gegenüber gestellt. Mit Ausnahme der Waschbetondecke (rote Linien) zeigen alle Fahrbahnoberflächen sehr ähnliche Verläufe.

Eine bessere Abschätzung der Fahrbahntextur ergibt sich, wenn der relative Anteil der Flüssigkeitsoberfläche dem tatsächlichen mit Flüssigkeit gefülltem Texturvolumen gegenübergestellt wird. Das bei den 16 gemessenen Bohrkernen vorhandene Texturvolumen reicht dabei von 450 cm^3 pro m^2 bei dicht-

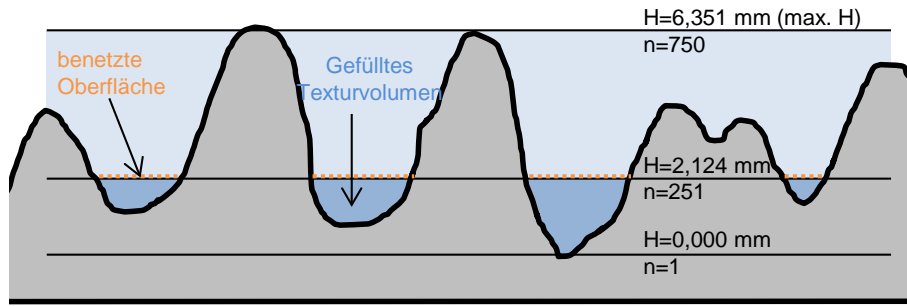


Abbildung 8.11: Schematische Darstellung der Berechnung des Verhältnisses Volumen der gefüllten Textur zu der Flüssigkeitsoberfläche der gefüllten Textur

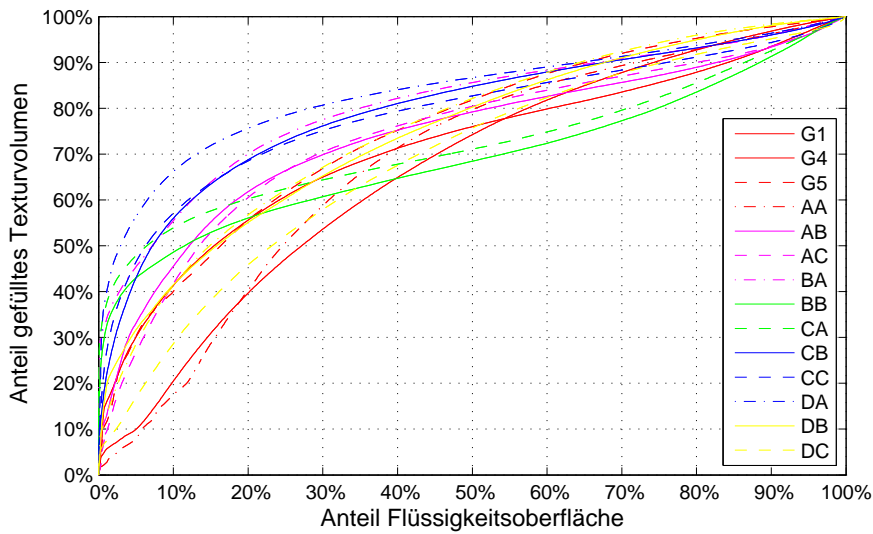


Abbildung 8.12: Verhältniss von relativem mit Flüssigkeit gefülltem Texturvolumen zu relativer Flüssigkeitsoberfläche

tem Asphaltbeton bis $1.300 \text{ cm}^3 \text{ pro m}^2$ bei einer neuen Waschbetondecke (Abbildung 8.13). Genauere Angaben zu den Bohrkernen können Tabelle 8.1 entnommen werden. Ein Texturvolumen von $1 \text{ cm}^3 \text{ pro m}^2$ kann dabei genau $1 \text{ g Wasser pro m}^2$ aufnehmen. Um eine Niederschlagsmenge von einem $\text{Liter/m}^2 = 1 \text{ mm}^2$ aufzunehmen, ist demnach ein Texturvolumen von $1.000 \text{ cm}^3 \text{ pro m}^2$ notwendig.

Bohrkern	Straße	Deckschichttyp	Alter	DTV
G1	A10	Waschbeton	<1	18.000
G4	A10	Asphaltbeton	8	18.000
G5	A10	Beton	>20	18.000
AA, AB, AC, BA, BB, BC, CA, CB, CC	A21	Asphaltbeton	k.A.	22.000
DA, DB, DC	A21	Waschbeton	>10	22.000

Tabelle 8.1: Angaben zu den analysierten Bohrkernen

Es ist in allen Fällen gut zu erkennen, dass bereits bei geringer Flüssigkeitsoberfläche in der Textur viel Flüssigkeitsvolumen vorhanden ist. Das bedeutet für den Winterdienst, dass geringe Niederschlagsmengen rasch in den größeren Vertiefungen aufgenommen werden können. Gerade bei Oberflächen mit wenigen größeren Vertiefungen bei ansonst glatter Oberfläche ist nun aber nur noch sehr wenig Niederschlag notwendig um die verbleibende Texturvertiefungen zu füllen und eine vollständig bedeckte

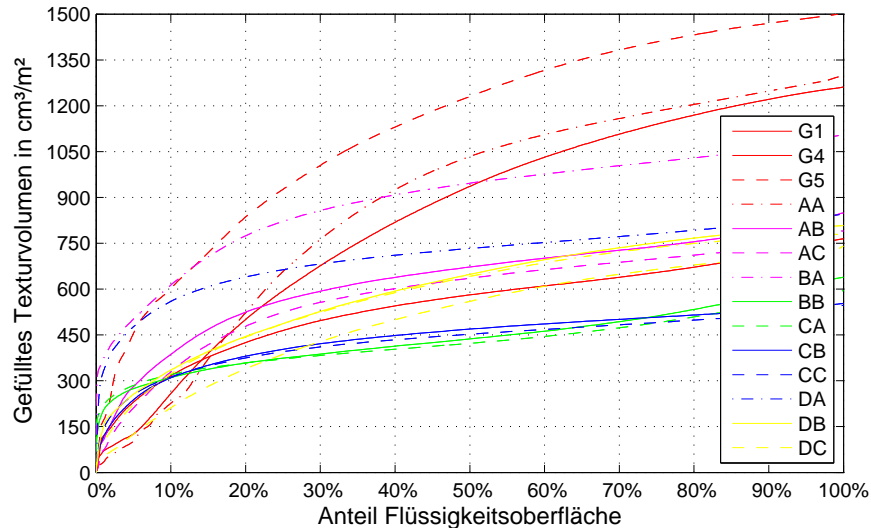


Abbildung 8.13: Verhältnis von mit Flüssigkeit gefülltem Texturvolumen zu Flüssigkeitsoberfläche von 16 Probekörpern mit 10 cm x 10 cm Analysefläche

Fahrbahnoberfläche zu erreichen. Dies zeigt sich auch in einer Darstellung des mit Flüssigkeit gefülltem Texturvolumen zu relativer Flüssigkeitsoberfläche wie in Abbildung 8.14 für vier Deckschichtarten.

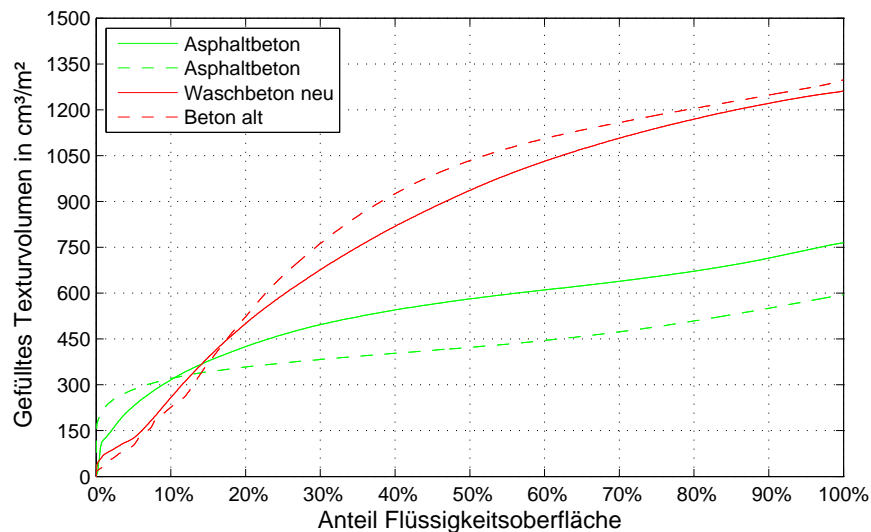


Abbildung 8.14: Typisches Verhältnis von mit Flüssigkeit gefülltem Texturvolumen zu relativer Flüssigkeitsoberfläche für gebräuchliche Deckschichttypen

Die Fahrbahngriffigkeit für eine nasse Fahrbahn liegt je nach Deckschichttype und -zustand bei $\mu = 0,4$ bis $\mu = 0,8$. Die Griffigkeit für eine Schneefahrbahn liegt, basierend auf Messungen mit dem Griptester MK II und PIARC Standardreifen, bei $\mu = 0,1$. Dies stellt auch einen unteren Wert dar, da je nach Qualität des Winterreifens hier eine höhere Griffigkeit erzielt werden kann. Für eine durchgehende Eisfahrbahn müsste die Griffigkeit jedoch sogar weiter auf $\mu = 0,05$ reduziert werden.

Die Griffigkeit vom Wert der trockenen bzw. nassen Fahrbahn nimmt mit zunehmender Füllung der Fahrbahnstruktur durch Schnee bzw. Eis zum Wert einer durchgehenden Schnee- bzw. Eisfahrbahn ab. Da die Grundgriffigkeit der Fahrbahn auf dem höherrangigen Netz, ebenso wie die Texturtiefe, bekannt ist, kann mit einer Vergleichsgriffigkeit einer festgefahrenen Schneefahrbahn nun die Griffigkeit $SR_{(A)}$

8 Griffigkeit

nach Gleichung 8.8 für beliebige Füllungsgrade der Textur berechnet werden. Die Parameter A_{Schnee} und A_{feucht} werden über den in Abbildung 8.14 dargestellten Zusammenhang auf Basis des mit Flüssigkeit gefüllten Volumens der Textur ermittelt. Die 2-dimensionale Oberfläche der Fahrbahntextur wird dabei in einen trockenen bzw. feuchten und einen mit Schnee bzw. Eis bedeckten Anteil getrennt, die Summe der beiden Parameter A_{Schnee} und A_{feucht} ist dabei immer 100%.

$$SR_{(A)} = A_{Schnee} \cdot SR_{Schnee} + A_{feucht} \cdot SR_{feucht} \quad (8.8)$$

Es bedeuten:

- $SR_{(A)}$ - Resultierende Fahrbahngriffigkeit in Abhängigkeit der Texturfüllung [-]
- A_{Schnee} - Anteil der Oberfläche von Schnee oder Eis an der Texturoberfläche (2-dimensional)[%]
- A_{feucht} - Anteil der nicht von Schnee oder Eis bedeckten Oberfläche an der Texturoberfläche (2-dimensional)[%]
- SR_{Schnee} - Griffigkeit einer durchgehenden Schneefahrbahn [-]
- SR_{feucht} - Grundgriffigkeit der Fahrbahn (gemessen in feuchtem Zustand) [-]

mit

$$A_{feucht} = 100 - A_{Schnee} \quad (8.9)$$

Die Veränderung der Fahrbahngriffigkeit mit zunehmender Texturfüllung für drei unterschiedliche Grundgriffigkeiten ist in Abbildung 8.16 dargestellt. Aufgrund der nicht linearen Zusammenhanges des gefüllten Texturvolumens mit der Flüssigkeitsoberfläche entwickelt sich auch die Griffigkeit nicht linear mit steigender Niederschlagsmenge. Der Anteil der von Schnee oder Eis bedeckten Oberfläche (in 2-dimensionaler Projektion) ist anhand des in Abbildung 8.13 für einige Deckschichten dargestellten Zusammenhangs zu berechnen. Möglich ist auch eine Berechnung anhand von Regressionsfunktionen. Für eine Betondecke ist in Gleichung 8.10 eine solche Funktion mit den entsprechenden Parametern dargestellt. Eine graphische Darstellung des Zusammenhangs inklusive der Regressionskurve für die beiden Asphaltbetondecken „G4“ und „BB“ findet sich in Abbildung 8.15.

$$A_{Schnee} = 6,319 * e^{(0,0279*TFG)} - 8,514 * e^{(-0,126*TFG)} \quad (8.10)$$

Es bedeuten:

- A_{Schnee} - Anteil der Oberfläche von Schnee oder Eis an der Texturoberfläche (2-dimensional)[%]
- TFG - Texturfüllungsgrad: Von Niederschlag gefülltes Texturvolumen [%]

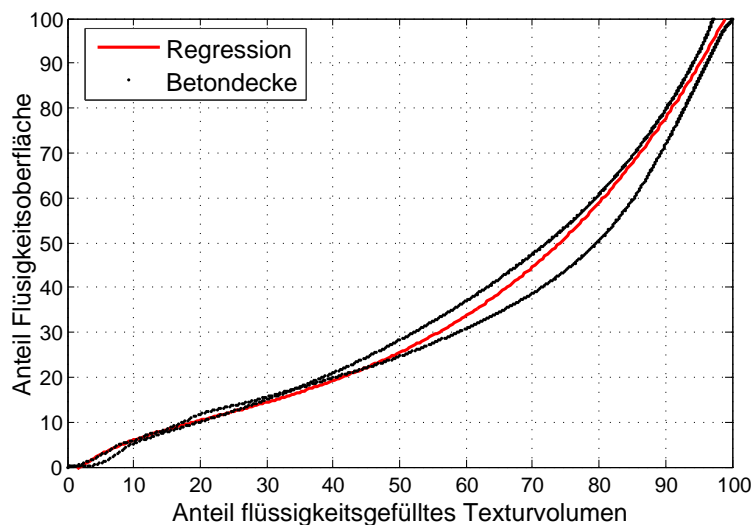


Abbildung 8.15: Regressionskurve des Verhältnis von mit Flüssigkeit gefülltem Texturvolumen zu Flüssigkeitsoberfläche für ausgewählte Asphaltbetondecken

In Abbildung 8.16 ist auch deutlich erkennbar, dass eine signifikante Verschlechterung des Griffigkeitswertes erst bei höheren Texturfüllungsgraden stattfindet. Ab einer Texturfüllung von etwa 80% fällt die Griffigkeit jedoch dann sehr rasch ab.

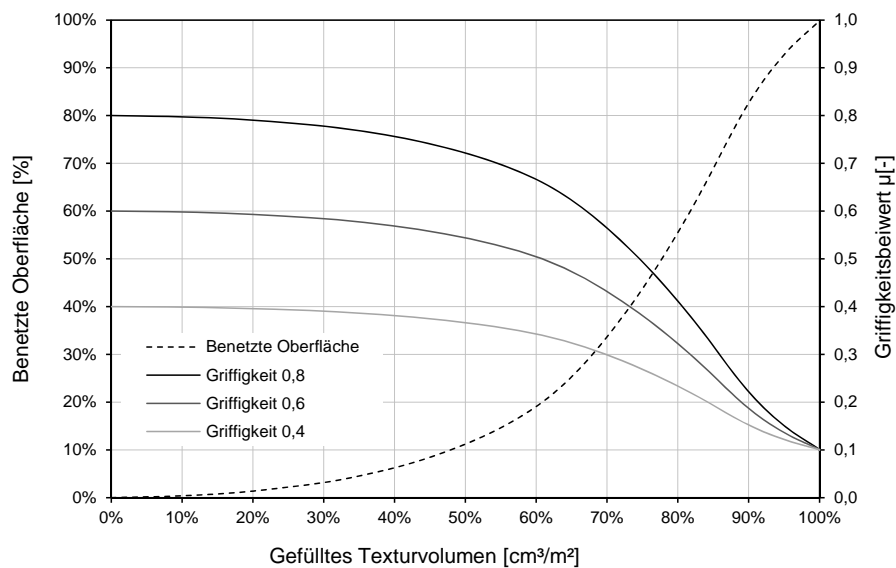


Abbildung 8.16: Modellannahme der Entwicklung der Fahrbahngriffigkeit mit zunehmender Texturfüllung für drei Grundgriffigkeiten

Eine anschauliche Darstellung des Zusammenhangs zwischen gefüllter Fahrbahntextur und benetzter Oberfläche bietet Abbildung 8.17 in der drei verschiedene Füllungsgrade dargestellt sind. Das gefüllte Volumen entspricht dabei dem Volumen der im Bild weiße Flüssigkeit, die benetzte Oberfläche der Oberfläche der Flüssigkeit

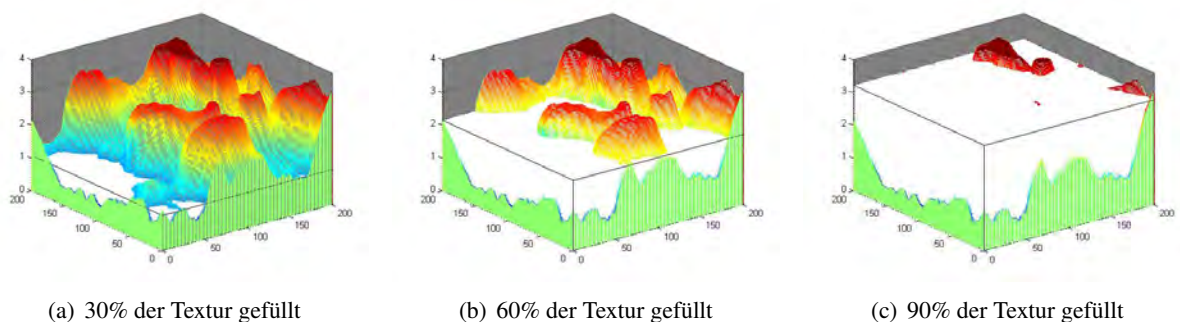


Abbildung 8.17: Darstellung der Texturfüllung bei einem gefüllten Volumen von 30%, 60% und 90% auf einem Texturausschnitt von 2x2 cm

Legt man Gleichung 8.8 nun einige mittels Laser im Labor ermittelte Makrotexturen tatsächlicher Fahrbahnen zu Grunde ergibt sich der in Abbildung 8.18 dargestellte Verlauf der Griffigkeitsabnahme bezogen auf den Grad der Texturfüllung. Detaillierte Angaben mit Bildern der für Abbildung 8.19 analysierten Deckschichten finden sich in Abbildung 8.20. Für Anfangs- und Endwert der Fahrbahngriffigkeit wird dabei vorerst generell $\mu = 0,6$ bzw. $\mu = 0,05$ angenommen.

Deutlich praxisnäher ist die Veränderung der Griffigkeit unterschiedlicher Fahrbahnoberflächen abhängig von der gefallenen Niederschlagsmenge in Abbildung 8.19 dargestellt. Details zu den Deckschichten sind in Abbildung 8.20 zu finden. In erster Linie ist erkennbar, wie rasch die Griffigkeit auf Änderungen der Filmdicke im Bereich von 0,6 mm und 0,8 mm Niederschlag reagiert. Dabei handelt es

8 Griffigkeit

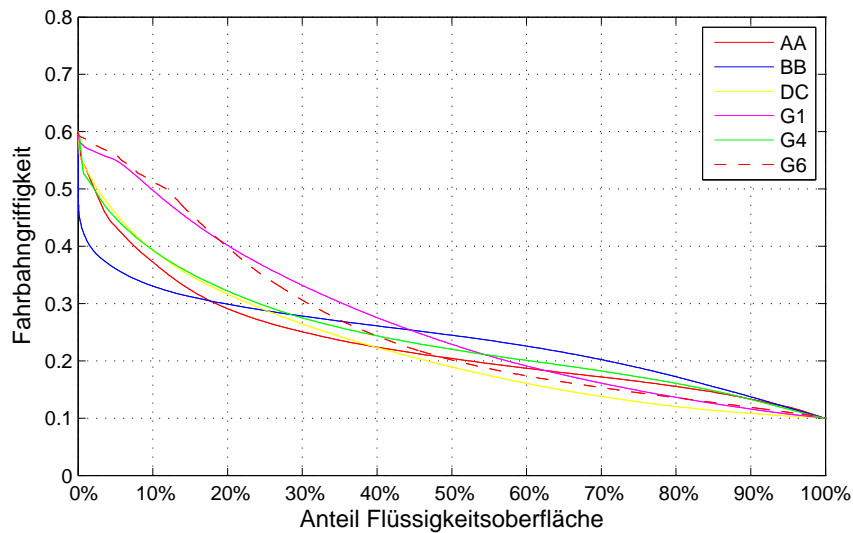


Abbildung 8.18: Entwicklung der Fahrbahngriffigkeit mit zunehmender Texturfüllung für verschiedene Texturen mit der Annahme gleicher Grundgriffigkeit bei feuchter Fahrbahn

sich um jenen Bereich, an welchem auch bei sehr geringen Änderungen des gefüllten Texturvolumens sehr viele freie Spitzen der Fahrbahnoberfläche abgedeckt werden. Weiters ist sehr gut erkennbar, wie unterschiedlich die Fahrbahnoberflächen auf die gleiche Niederschlagsmenge reagieren. Je größer das zu Verfügung stehende Texturvolumen, um so länger kann die Griffigkeit auf einem hohen Niveau gehalten werden.

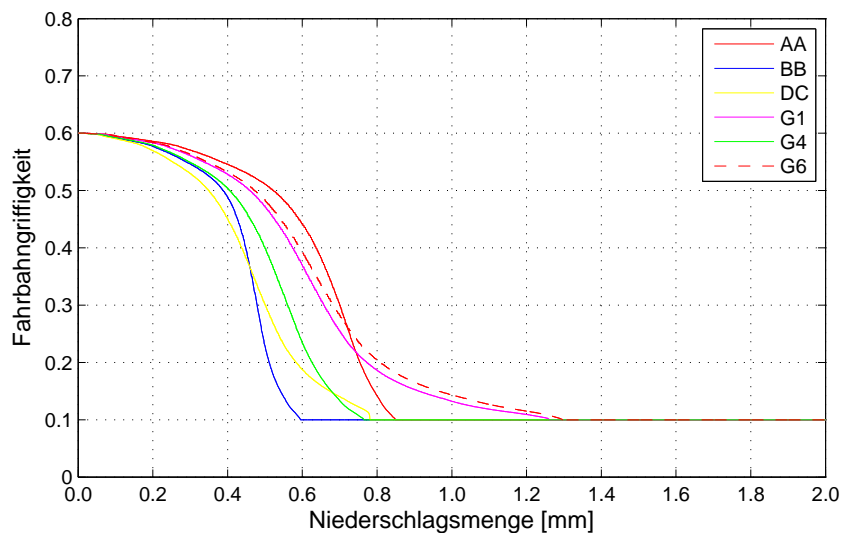


Abbildung 8.19: Entwicklung der Fahrbahngriffigkeit mit fortschreitendem Niederschlag für verschiedene Texturen mit der Annahme gleicher Grundgriffigkeit bei feuchter Fahrbahn


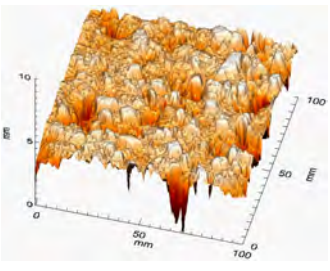

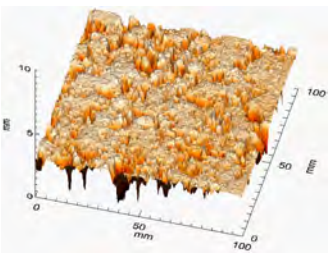

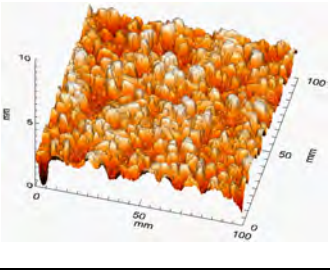

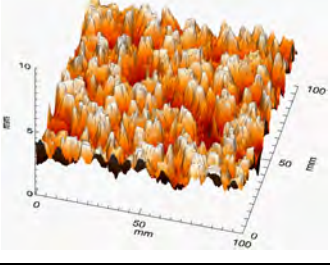
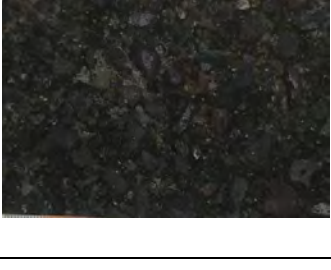
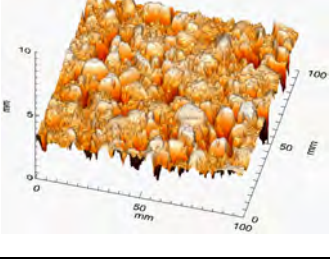

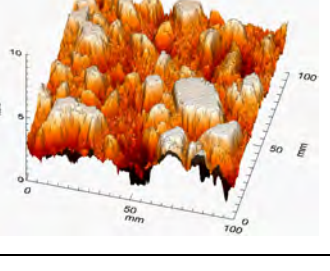
		<p>AA</p> <p>Asphalt, DTV 22.000</p> <p>$V_{\text{Sandfleck}}$: 622,42 cm³/m²</p> <p>V_{Laser}: 848,90 cm³/m²</p> <p>MPD: 0,6 mm</p> <p>μ_{GT}: 0,5</p>
		<p>BB</p> <p>Asphalt, DTV 22.000</p> <p>$V_{\text{Sandfleck}}$: 442,71 cm³/m²</p> <p>V_{Laser}: 594,76 cm³/m²</p> <p>MPD: 0,4</p> <p>μ_{GT}: 0,64</p>
		<p>DC</p> <p>Beton, >10 Jahre, DTV 18.000</p> <p>$V_{\text{Sandfleck}}$: 568,33 cm³/m²</p> <p>V_{Laser}: 780,97 cm³/m²</p> <p>MPD: -</p> <p>μ_{GT}: 0,37</p>
		<p>G1</p> <p>Waschbeton, 1 Jahr, DTV 18.000</p> <p>$V_{\text{Sandfleck}}$: 990,14 cm³/m²</p> <p>V_{Laser}: 1.261,18 cm³/m²</p> <p>MPD: -</p> <p>μ_{GT}: -</p>
		<p>G4</p> <p>Asphalt, 8 Jahre, DTV 18.000</p> <p>$V_{\text{Sandfleck}}$: 597,99 cm³/m²</p> <p>V_{Laser}: 764,55 cm³/m²</p> <p>MPD: 0,5 mm</p> <p>μ_{GT}:</p>
		<p>G6</p> <p>Beton, >20 Jahre, DTV 18.000</p> <p>$V_{\text{Sandfleck}}$: 1.042,84 cm³/m²</p> <p>V_{Laser}: 1.296,97 cm³/m²</p> <p>MPD: 0,5 mm</p> <p>μ_{GT}:</p>

Abbildung 8.20: Echtbilder, 3D Bilder der Textur und Kennwerte von sechs Deckschichten

9 Modellsynthese und -implementierung

Nach der Vorstellung des Modells in Kapitel 1.3, sowie der Entwicklung der einzelnen Module findet in diesem Kapitel die Synthese der Einzelschritte statt. Dazu werden die Ergebnisse der Modellsynthese mit tatsächlichen Messfahrten verglichen, Simulationen für einen Autobahnabschnitt bei unterschiedlichen Witterungen und winterdienstlicher Betreuung durchgeführt. Gleichzeitig sollen auch die Möglichkeiten der Implementation des Modells in die Winterdienstpraxis gezeigt sowie Anwendungen einer Modellsimulation von Winterdiensteinsätzen dargestellt werden.

9.1 Zusammenwirken der Module

Der Ablauf der Berechnung des in dieser Arbeit entwickelten Modells wird im Flowchart in Abbildung 9.1 grafisch dargestellt. Dabei werden die Inputparameter unabhängig von der jeweiligen Quelle als bekannt angenommen. Bei einer Umsetzung in die Praxis ist dies jedoch nicht so ohne weiteres voraussetzbar. So gibt es nur für bestimmte Streckennetze Daten zur Makrotextur der Fahrbahnoberfläche. Auch die Daten zu Fahrbahntemperatur, Niederschlagsintensität, Filmdicke und andere sind meist nur an einigen wenigen Punkten bekannt.

Unterschiede in der Qualität der Eingangsdaten ziehen auch Unterschiede in der Modellgenauigkeit nach sich. Dabei kann die Qualität der Daten unterschiedlicher Module für einen bestimmten Streckenabschnitt durchaus stark voneinander abweichen.

Für die Griffigkeitsprognose, sind auch Eingangswerte der einzelnen Modellparameter notwendig. Dies ist etwa für die Makrotextur aufgrund der nur sehr langsamen Änderung nicht problematisch. Für die meteorologischen Eingangsdaten ist eine exakte Prognose jedoch von sehr hoher Bedeutung. Die Qualität aktueller Wetterprognosen wurde bereits in Kapitel 3.3.3 untersucht und zeigt sehr gute Ergebnisse für kurzfristige Prognosen mit neuesten Nowcast-Modellen.

Für die Anwendung des Modells im Echtzeitbetrieb sind diese Datenquellen eine Mindestvoraussetzung. Zusätzlich ist eine Einsatzdatenerfassung der Streufahrzeuge mit Echtzeitübertragung notwendig. Nur dadurch können Daten der ausgebrachten Streumengen direkt in das Modell einfließen. Ähnliches gilt für die Daten von Glättewarnanlagen. Die notwendigen Grunddaten liegen zwar bereits aus den Wetterprognosen vor, diese weisen aber noch Prognoseungenauigkeiten auf. Mit der Einbindung von Echtzeitdaten aus Glättewarnanlagen können nicht nur die meteorologischen Grunddaten verbessert werden, viel mehr liegen zusätzlich Messdaten von Wasserfilmdicke und Restsalzmenge vor.

Vorhandene Messdaten sollten in Echtzeit in das Modell eingebunden werden und als Basisdaten für eine Kalibration des Modells dienen. Da die Daten nur punktuell vorliegen, können damit Eckdaten für eine etwaige Kalibration des Modells abgegriffen werden, welche die Modellprognosen auf den Abschnitte zwischen den Messsystemen deutlich verbessert.

Mit den in Abbildung 9.1 angegebenen Grunddaten lässt sich das hier entwickelte Modell grundsätzlich berechnen. Anwender sollten jedoch nach Möglichkeit alle zu Verfügung stehenden Daten in Echtzeit einbinden, um die Qualität der Ausgabe zu verbessern.

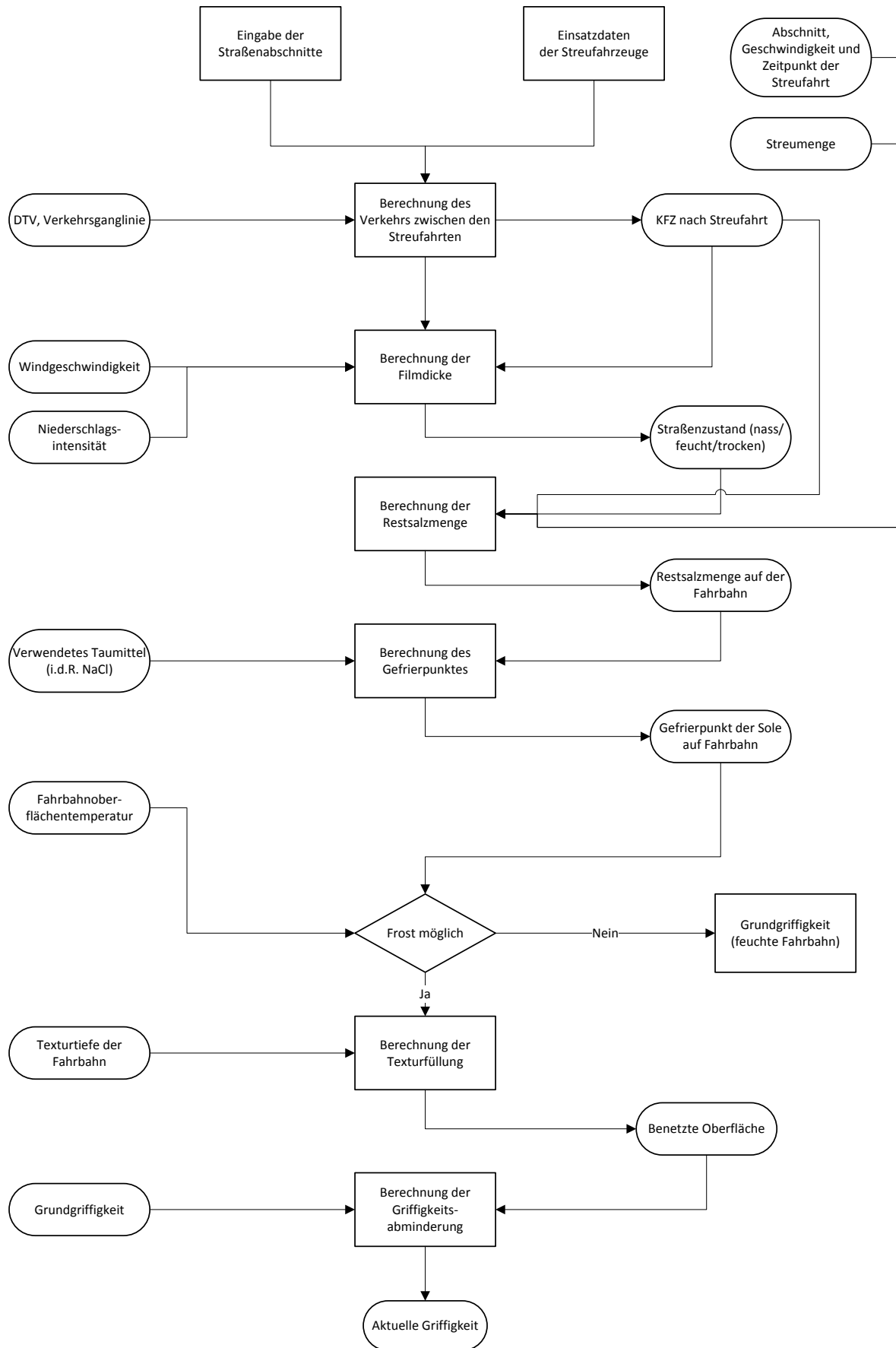


Abbildung 9.1: Flow Chart der Modellrechnung

9.2 Vergleich Modellrechnung und Messung

Um das Modell zu validieren werden die am 5.3.2010 auf der A10 durchgeführten Messungen mit den Modellergebnissen verglichen. Für die Simulation werden die in Tabelle 9.1 aus den Messungen bekannt Größen verwendet. Bei der Fahrbahntemperatur handelt es sich um den Mittelwert der Einzelmessungen einer Messfahrt. Die Niederschlagsmenge ist aus dem Wetter-Nowcast entnommen. Nach der ersten Messfahrt fand um 01:32 Uhr eine Streufahrt mit 20 g/m^2 Feuchtsalz FS 30 statt. Der Zeitraum von 01:00 Uhr bis 03:00 Uhr ist mit etwa 150 KFZ/h eine sehr verkehrsschwache Zeit.

	Messfahrt 1	Messfahrt 2	Messfahrt 3	Messfahrt 4
Uhrzeit	00:56	01:41	02:04	02:33
Niederschlag zw. Messfahrten [mm]	1,5	1,0	0,5	0,5
Fahrbahntemperatur [°C]	-2,09	-1,96	-1,84	-2,17

Tabelle 9.1: Eingangsparameter für die Verifikation des Modells an Messwerten

Die Griffigkeitsmessungen mit dem Griptester zeigen von Streckenabschnitt 0 bis 10 sowie bei Streckenabschnitt 30 bis 33 deutlich höhere Werte als auf dem Rest der Messstrecke (Abbildung 9.2). Dies liegt am trockenen, bzw. nur feuchten Fahrbahnzustand in diesen Bereichen. Am Abschnittsbeginn liegt ein Tunnel, während von Streckenabschnitt 30 bis 33 eine Lawingalerie die Fahrbahn überdeckt. Dadurch sind diese Bereiche nicht von Schneefall betroffen.

Im Gegensatz dazu zeigen die Messungen der Filmdicke, wie in Abbildung 9.3 dargestellt, keine erkennbare Änderung aufgrund der auf unterschiedlichen Umgebung zwischen Tunnel und freier Strecke. Bei einigen Messfahrten ist ein leichter Einfluss des Tunnels zu Beginn der Messfahrten zu sehen, gleichzeitig ist aber hier auch der höchste Messwert der Filmdicke.

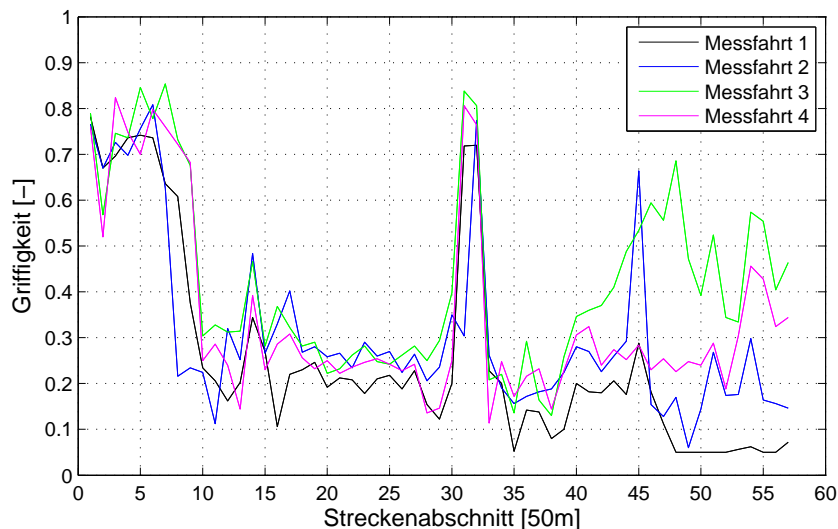


Abbildung 9.2: Auf dem Streckenabschnitt gemessene Fahrbahngriffigkeit (Griptester) von vier Messfahrten

Bildet man jeweils den Mittelwert der gemessenen Griffigkeit bzw. Filmdicke der einzelnen Messfahrten ist jedoch der Grundzusammenhang zwischen Filmdicke und Griffigkeit zu erkennen. Abbildung 9.4(a) zeigt dabei den Boxplot der Griffigkeit mit einem leichten Anstieg des Mittelwertes von der ersten bis zur dritten Messfahrt mit anschließender Reduktion bei der vierten Messfahrt. Nach der ersten Messfahrt wurde Salz gestreut, welches beginnt, den Schnee zu tauen und damit die Griffigkeit verbessert. Durch den anhaltenden Schneefall lässt diese Wirkung jedoch zwischen dritter und vierter Messfahrt wieder nach - eine weitere Streufahrt wird notwendig.

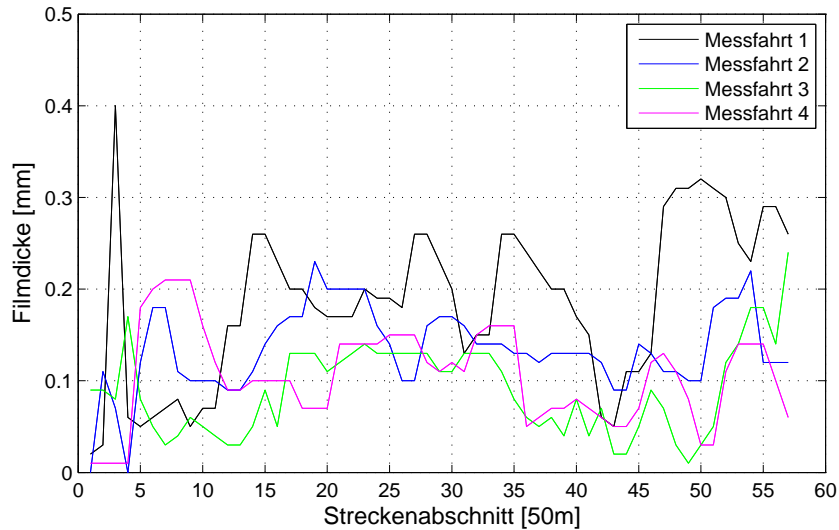
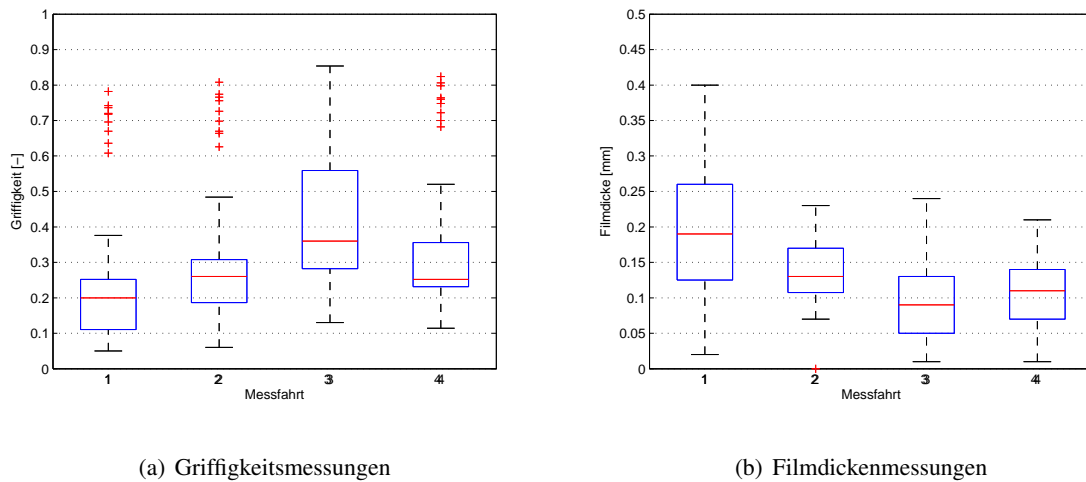


Abbildung 9.3: Auf dem Streckenabschnitt gemessene Filmdicke (Vaisala DSC Prototyp) von vier Messfahrten

Korrespondierend zu den Mittelwerten der Griffigkeit stehen die Mittelwerte der Filmdicke (Abbildung 9.4(b)). Von Messfahrt 1 bis 3 nimmt die Filmdicke ab, danach wieder zu. Zu beachten ist jedoch sowohl bei der Griffigkeitwerten, wie auch bei den Werten der Filmdicke die hohe Streuung.



(a) Griffigkeitsmessungen

(b) Filmdickenmessungen

Abbildung 9.4: Boxplots der Griffigkeitsmessungen und Filmdickenmessungen auf dem Messabschnitt

9.2.1 Simulation eines realen WD-Einsatzes einer Autobahnmeisterei

Der im vorangegangenen Kapitel beschriebene Winterdiensteinsatz wird nun mit dem Modell nachgerechnet und mit der gemessenen und berechneten Fahrbahngriffigkeit verglichen. Das Ergebnis dieses Vergleichs ist in Abbildung 9.6 dargestellt, wobei über die gesamte Länge des Messstrecke gemittelt wird. Das Texturvolumen am Abschnitt von $600 \text{ cm}^3/\text{m}^2$ wurde mittels Sandfleckverfahren ermittelt und findet so Eingang in das Modell. Bei dem Fahrbahnbelag handelt es sich um Asphaltbeton, welcher in Abbildung 8.20 mit Typ G4 gekennzeichnet ist.

Für die Prognose der Griffigkeit ist die Kenntnis über die Filmdicke notwendig, welche sowohl gemessen, als auch berechnet wurde. Die Abweichung zwischen kontinuierlich berechneter und zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessenen Filmdicke ist in Abbildung 9.5 dargestellt. Die gemessenen Werte sind der Mittelwert aller zu dem Zeitpunkt in dem Abschnitt gemessenen Werte. An dieser Darstellung ist nochmals die bereits beschriebene Ungenauigkeit der Berechnung der Filmdicke erkennbar. Neu entwickelte Messgeräte, mobil oder stationär, können diesen Umstand jedoch deutlich verbessern.

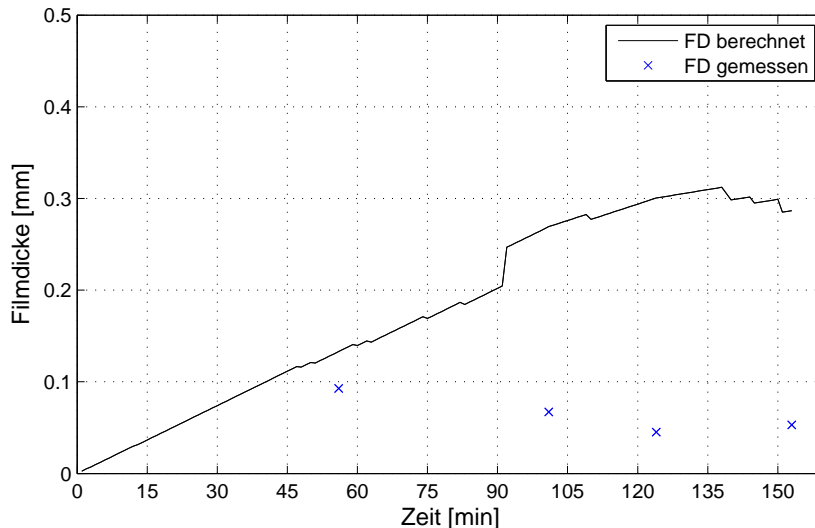


Abbildung 9.5: Bei wiederholten Messfahrten gemessene und kontinuierlich berechnete Filmdicke für einen Abschnitt

Die in Abbildung 9.6 dargestellte geringe Übereinstimmung zwischen gemessener und berechneter Griffigkeit liegt in erster Linie an der, in Kapitel 7 erwähnten, Problematik der Berechnung der Filmdicke. Berechnet man die Griffigkeit mit der bei den Messfahrten aufgenommenen Filmdicke zeigt sich ein deutlich besserer Zusammenhang wie in Abbildung 9.6 deutlich zu erkennen ist. Die mit kontinuierlichen Prognosewerten aus dem Modul Filmdicke berechnete Griffigkeit („Berechnung“) weicht stark von den Messungen mit dem GripTester („Messung“) ab. Legt man der Griffigkeitsprognose Messwerte der Filmdicke zu Grunde („Rechnung FD gemessen“) ist die Übereinstimmung mit den gemessenen Griffigkeitswerten („Messung“) deutlich besser.

Dabei muss jedoch erwähnt werden, dass aufgrund der mit dem Prototyp tendenziell zu niedrig gemessenen Griffigkeit nochmals ein Korrekturfaktor verwendet wurde. Alle gemessenen Filmdicken wurden mit dem Faktor 3 multipliziert um die Unterschiede der Einzelmessungen besser darstellen zu können. Die mittels eines Prototypes eines optischen Filmdickenmessgerätes ermittelten Werte unterschätzen daher die tatsächliche Filmdicke deutlich. Durch den modularen Aufbau des Modells können die seit den Messfahrten im Jahr 2010 stark verbesserten optischen Messgeräte zur Bestimmung der Filmdicke rasch und einfach in eine Gesamtbetrachtung einbezogen werden.

9.2.2 Simulation unterschiedlicher Szenarien

Auf Basis eines fiktiven Streckenabschnittes mit 75 km Länge wird anhand von angenommenen Wetterdaten und Winterdienstseinsätzen mit dem entwickelten Modell eine Simulation durchgeführt. Die Strecke wird dabei in 5 Abschnitte unterteilt, welche die in Tabelle 9.2 angeführten Eigenschaften besitzt.

Die dafür angenommenen Wetterdaten (siehe Tabelle 9.3) spiegeln zwei unterschiedliche, jedoch häufig vorkommende Szenarien wieder. Mit dem sehr geringen Niederschlag in der Nacht und den Morgen-

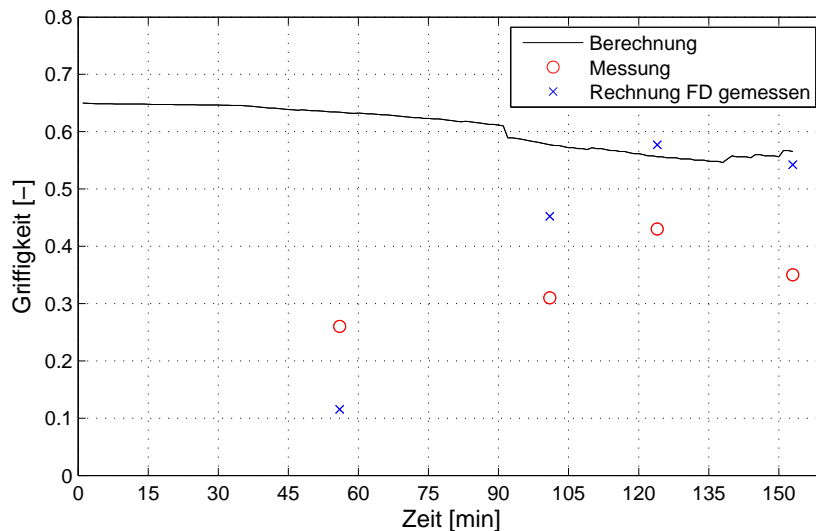


Abbildung 9.6: Gemessene und berechnete Griffigkeit für einen Abschnitt bei wiederholten Messfahrten

	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4	Abschnitt 5
Länge [km]	6	9	13	17	30
DTV [KFZ]	8.250	7.000	6.750	6.500	7.000
Griffigkeit nass [-]	0,5	0,64	0,57	0,8	0,6
Texturvolumen [mm ³]	849	595	781	1.261	756

Tabelle 9.2: Daten der Straßenabschnitte für die Simulation

stunden bis 6:00 Uhr wird Reifbildung auf der Fahrbahn nachgebildet. Diese Fälle können in der Regel mit einigen wenigen Fahrzeugen ausreichend betreut werden.

Im weiteren Verlauf des Tages kommt es zu ergiebigen Niederschlägen mit 5 mm/h von 8:00 Uhr bis 10:00 Uhr. Dieser Schneefall erfordert für viele Straßenbetreiber, insbesondere auf höherrangigen Straßen, bereits einen Volleinsatz der Winterdienstmannschaft.

Abschnitt	Niederschlagsintensität [mm/h]	Anfangszeit	Endzeit
1-5	0,075	00:01	06:00
1-5	5,0	08:00	10:00

Tabelle 9.3: Daten der Wetterlage für die Simulation

Für diese Wettersituationen werden nun entsprechende Winterdiensteinsätze durchgeführt um eine gute Befahrbarkeit der Strecke trotz Schneefalls zu erhalten. Die Daten zu den einzelnen Streufahrten können dabei aus Tabelle 9.4 entnommen werden.

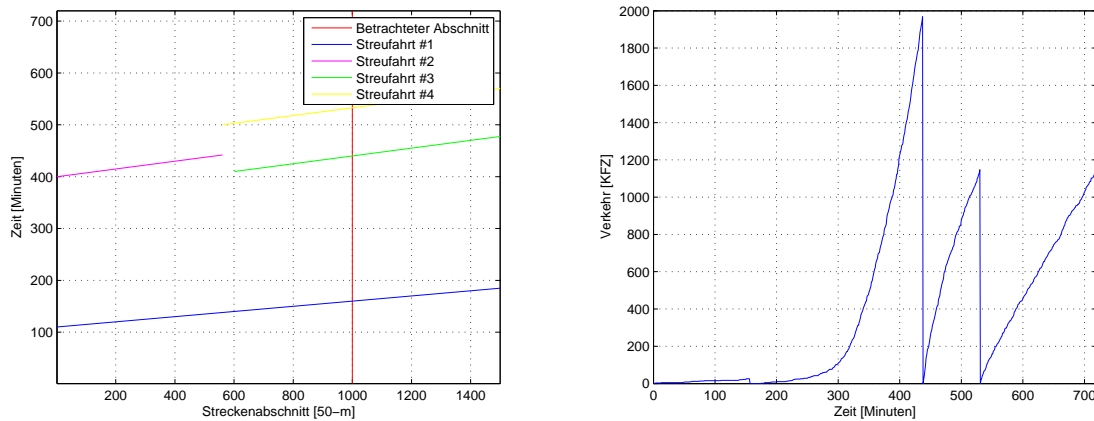
Um die morgendliche Reifglätte zu verhindern, wird dabei eine Streufahrt über alle Streckenabschnitte durchgeführt. Die weiteren Streufahrten bei einsetzendem Schneefall werden nur noch über kürzere Streckenabschnitte mit erhöhter Streumenge durchgeführt. Die Fahrgeschwindigkeit wird bei den Fahrten mit Schneefall aufgrund des Einsatzes von Pflügen von 60 km/h auf 40 km/h reduziert. Als eingesetzte Streutechnologie wird dabei von einer Feuchtsalzstreuung FS 30 ausgegangen.

Abbildung 9.7(a) zeigt eine einfache grafische Darstellung von Zeitpunkt und Ort der einzelnen Streufahrten im Simulationszeitraum und -streckenabschnitt. Zusätzlich ist der betrachtete Streckenabschnitt eingezeichnet, welcher für alle folgenden Darstellungen als Bezugsabschnitt verwendet wird.

Streufahrt #	Anfangspunkt [km]	Endpunkt [km]	Geschwindigkeit [km/h]	Streumenge [g/mm ²]
1	1	75	60	10
2	1	28	40	25
3	30	75	40	30
4	28	75	40	10

Tabelle 9.4: Daten der Streufahrten für die Simulation

Der Verkehr in KFZ nach der letzten Streufahrt wird in Abbildung 9.7(b) für den betrachteten Abschnitt dargestellt. Dabei wird von einer typischen Ganglinie einer Autobahn mit den in Tabelle 9.2 angegebenen täglichen Verkehrsstärken ausgegangen. Ausgangszeitpunkt für die Simulation ist 00:01 Uhr, die morgendliche Verkehrsspitze beginnt um kurz nach 6:00 Uhr.



(a) Übersicht der Streufahrten über die gesamte Simulationsdauer und Strecke mit gekennzeichnetem Betrachtungsabschnitt
 (b) Verkehr nach den Streufahrten für den betrachteten Abschnitt

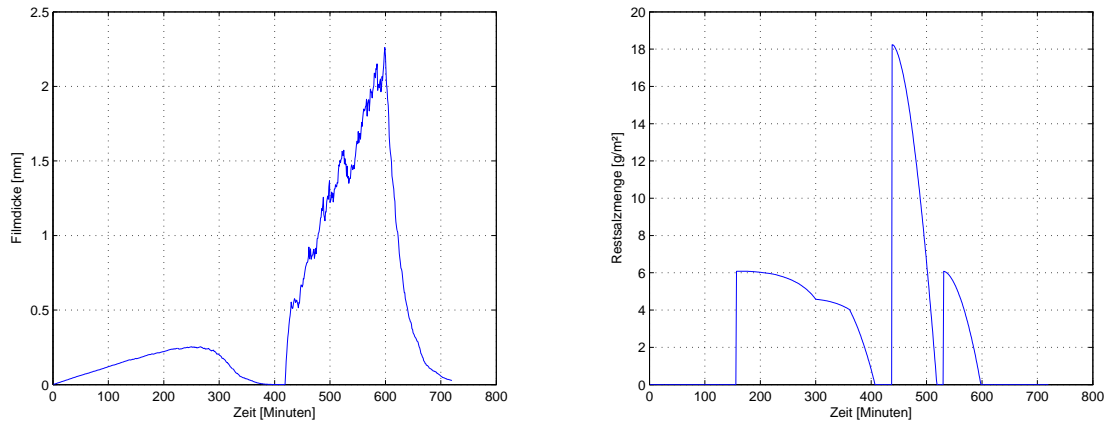
Abbildung 9.7: Übersicht über Streufahrten und Verkehr nach den Streufahrten im beobachteten Abschnitt

Aus den Daten der Verkehrsstärke und der Niederschlagsintensität wird unter Annahme einer konstanten Windgeschwindigkeit von $v_w = 5 \text{ km/h}$ die Filmdicke auf der Fahrbahn berechnet. Abbildung 9.8(a) zeigt die geringe Filmdicke auf Grund der Reifbildung sowie die deutliche Zunahme der Filmdicke durch den anhaltenden Schneefall.

Im beobachteten Zeitraum und Abschnitt fallen in Summe drei Streufahrten an. Der berechnete Verlauf der Restsalzmenge auf der Fahrbahn wird in Abbildung 9.8(b) dargestellt. Dabei sind vor allem zwei Dinge auffällig. Zum einen ist durch den Knick bei Minute 300 der Wechsel des Fahrbahnzustandes von nass auf feucht zu erkennen. Im weiteren Verlauf nimmt die Restsalzmenge aufgrund der stark ansteigenden Verkehrsmenge sehr rasch ab. Weiters zeigt sich deutlich, dass die bei den beiden Streufahrten ausgebrachte Salzmenge während des Schneefalles sehr rasch abnimmt. Hohe Salzmengen, die während eines Niederschlagsereignisses ausgebracht werden sind daher kaum, bzw. nur sehr kurze Zeit wirksam.

Die in Abbildung 9.9(a) für die einzelnen Abschnitte dargestellten Fahrbahntemperaturen basieren auf tatsächlich gemessenen Temperaturverläufen. Abschnitte 1, 4 und 5 basieren dabei auf Daten eines heiteren Tages, Abschnitte 2 und 3 auf bewölkten Tagen. Die Auswirkungen direkter Sonneneinstrahlung auf die Fahrbahntemperatur sind an dem starken Anstieg zur Mittagszeit in den Abschnitte 2 und 3 deutlich zu erkennen. Um zusätzliche Abweichungen zwischen den Abschnitten zu schaffen, wurden die Temperaturverläufe einiger Abschnitte angehoben bzw. abgesenkt.

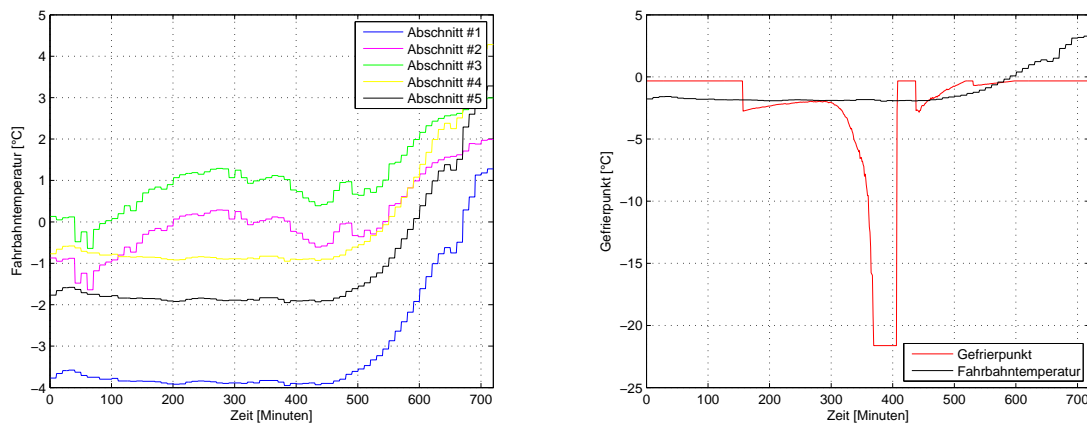
9 Modellsynthese und -implementierung



(a) Berechnete Filmdicke in mm auf dem betrachteten Streckenabschnitt (b) Berechnete Restsalzmenge in g/mm² auf dem betrachteten Streckenabschnitt

Abbildung 9.8: Berechnete Filmdicke und Restsalzmenge auf dem betrachteten Abschnitt

Basierend auf der Filmdicke und der Restsalzmenge, kann die Konzentration der Sole auf der Fahrbahn und damit der Gefrierpunkt berechnet werden. Abbildung 9.9(b) stellt den berechneten Gefrierpunkt der Fahrbahntemperatur gegenüber. Die hohe Wirksamkeit der Streufahrt etwa um Minute 180 im betrachteten Abschnitt gegen Reifbildung steht dabei den Streufahrten mit geringer Absenkung des Gefrierpunktes bei Schneefall ab Minute 420 gegenüber.

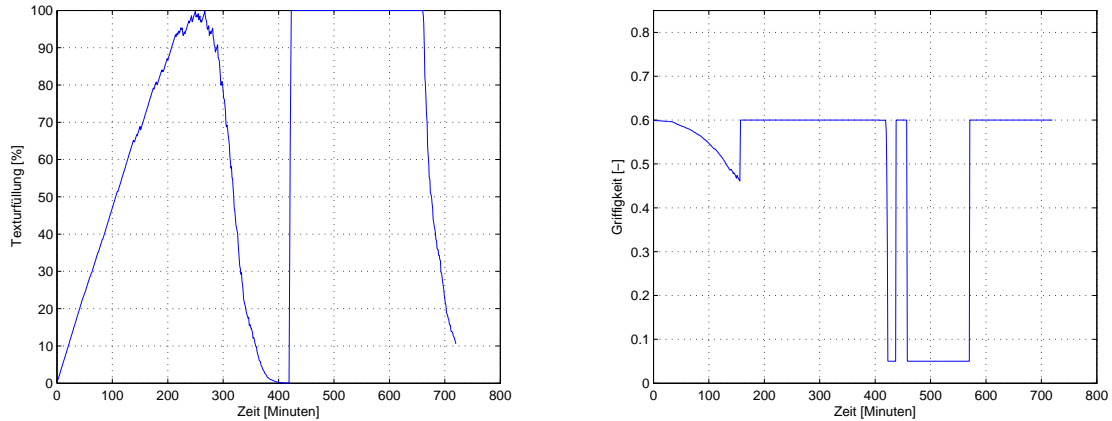


(a) Angenommene Fahrbahntemperatur in °C auf dem betrachteten Streckenabschnitt (b) Berechneter Gefrierpunkt der Sole auf der Fahrbahn in °C auf dem betrachteten Abschnitt

Abbildung 9.9: Angenommene Fahrbahntemperatur und berechneter Gefrierpunkt der Sole auf der Fahrbahn auf dem betrachteten Abschnitt

Die berechnete Filmdicke wird mit dem verfügbaren Texturvolumen des jeweiligen Abschnittes verglichen und ergibt die in Abbildung 9.10(a) dargestellte Texturfüllung. Während der Phase der Reifbildung wird die Textur beinahe vollständig gefüllt. Mit Einsetzen des Schneefalls füllt sich die Fahrbahntextur beinahe sofort und bleibt während des gesamten Ereignisses vollständig gefüllt. Aus der Texturfüllung wird die in Abbildung 9.10(b) dargestellte Fahrbahngriffigkeit berechnet. Zusätzlich wird noch die Fahrbahntemperatur mit dem Gefrierpunkt der Sole auf der Fahrbahn verglichen und das Frostpotential berücksichtigt. Dies ist deutlich an dem drastischen Anstieg der Griffigkeit nach der Streufahrt bei Minute 160 sichtbar. Während sich die Textur weiter füllt wird durch die durchgeführte Salzstreuung die ursprüngliche Griffigkeit einer feuchten Fahrbahn wieder hergestellt.

Die Streufahrten bei starkem Schneefall hingegen können die Griffigkeit nur sehr kurz anheben. Dies ist auch der Grund, warum die meisten Straßenbetreiber während des Schneefalls auf geringere Streumengen setzen und den Schwerpunkt auf Pflügen legen. Durch den Einsatz geringer Streumengen kann jedoch ein Trennfilm erhalten werden, welcher das Anfrieren von Schnee auf der Fahrbahn verhindert.

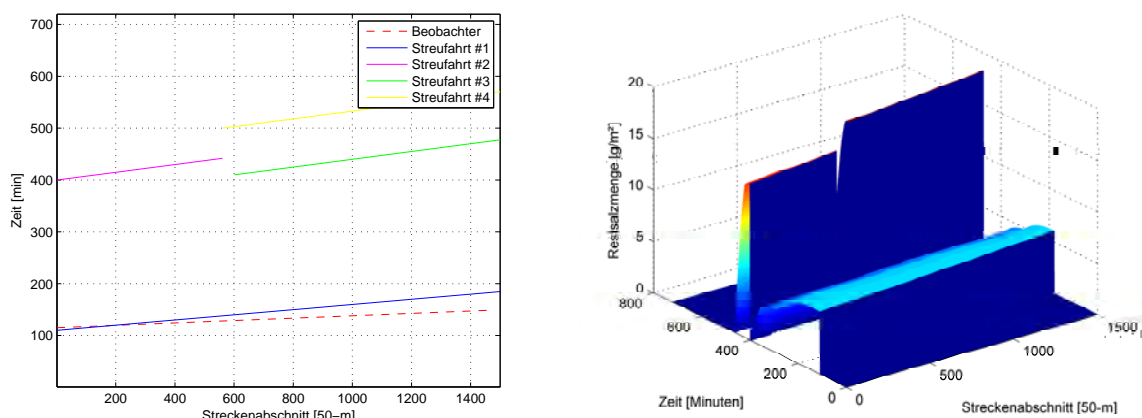


(a) Berechnete Texturfüllung auf dem beobachteten Abschnitt (b) Berechnete Griffigkeit auf dem beobachteten Abschnitt

Abbildung 9.10: Berechnete Texturfüllung und Griffigkeit auf dem beobachteten Abschnitt

9.2.3 Simulation einer Einzelfahrt

Die Berechnung aller Parameter wird für jeden einzelnen Zeitschritt für alle Straßenabschnitte berechnet. Aus diesen Daten lässt sich nicht nur, wie bisher gezeigt, die Entwicklung auf einem einzelnen Straßenabschnitt darstellen, sondern auch der Zustand während der Fahrt durch den Straßenabschnitt. Abbildung 9.11(a) zeigt die einzelnen Streufahrten und die Fahrt des Beobachters auf der simulierten Strecke. Die Umgebungsdaten der Simulation sind identisch mit den bereits vorgestellten Basisdaten. Die zweidimensionale Betrachtung eines einzelnen Parameters auf einem Streckenabschnitt ist ein Ausschnitt aus einem 3-dimensionalen Datensatz. Ein Beispiel für einen solchen Datensatz ist in Abbildung 9.11(b) mit der berechneten Restsalzmenge dargestellt. Die einzelnen Streufahrten sind dabei deutlich zu erkennen.



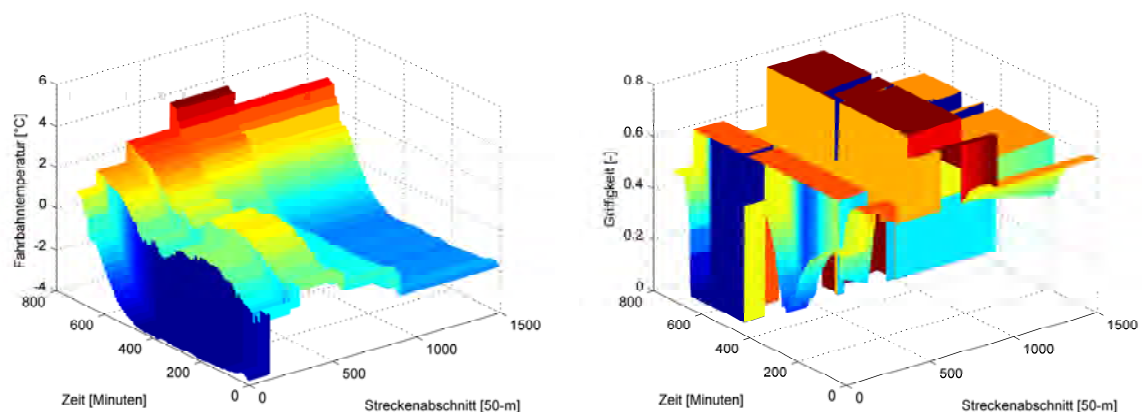
(a) Übersicht der Streufahrten über die gesamte Simulationsdauer und Strecke und der Beobachterfahrt (b) Berechnete Restsalzmenge in allen Abschnitten über die gesamte Simulationsdauer

Abbildung 9.11: Übersicht der Streufahrten und der Beobachtungsfahrt sowie Daten der Restsalzmenge

9 Modellsynthese und -implementierung

Ein weiteres Beispiel für vollständige Datensätze aus der Simulation ist in Abbildung 9.12(a) eine Übersicht über die Fahrbahntemperatur dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass für jeden der fünf Abschnitte nur ein Temperaturverlauf verwendet wurde. Sind für eine Simulation Daten aus einer thermalen Kartierung vorhanden, kann die Qualität der Simulation durch deren Einbindung deutlich verbessert werden. Insbesondere für kleinräumige exponierte Stellen wie Brücken und Durchlässe kann Qualität der Prognose dadurch gesteigert werden.

Daten der berechneten Fahrbahngriffigkeit sind in Abbildung 9.12(b) dargestellt. Die erkennbaren hohen Plateaus stellen jene Zeitpunkte dar, in welchen der Abschnitt trocken ist oder keine Frostgefahr herrscht. Aufgrund der unterschiedlichen Fahrbahnbeläge sind in den verschiedenen Abschnitten auch unterschiedliche Griffigkeiten ohne Frostgefahr vorhanden.



(a) Vollständiger Datensatz zur Fahrbahntemperatur

(b) Vollständiger Datensatz zur Fahrbahngriffigkeit

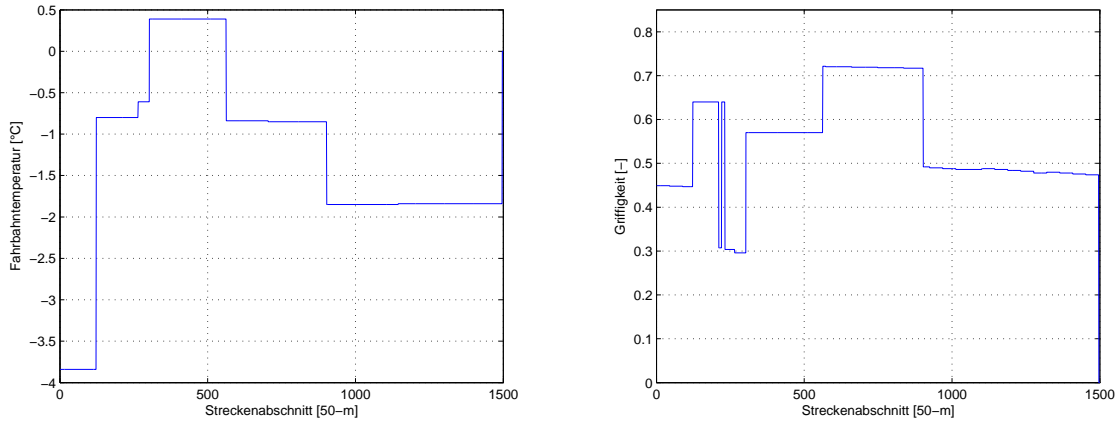
Abbildung 9.12: Vollständige Datensätze zur Fahrbahntemperatur und Fahrbahngriffigkeit

Aus diesen Datensätzen wird nun für die Beobachterfahrt etwa die Fahrbahntemperatur, wie in Abbildung 9.13(a) dargestellt entnommen. Dabei zeigen sich besonders die unterschiedlichen Temperaturen in den einzelnen Abschnitten. Wie bereits erwähnt ist durch eine genauere Information über die Fahrbahntemperatur eine Qualitätssteigerung der Modellberechnung möglich. Sprunghafte Änderungen wie in der Simulation sind in der Regel nicht zu erwarten. Lediglich an Kunstbauten kann sich die Temperatur sprunghaft ändern. Ebenfalls zu beachten ist bei einer noch exakteren Betrachtung die Einwirkung direkter Sonneneinstrahlung auf die Fahrbahntemperatur. Verschattungen, etwa durch Lärmschutzwände, können einen großen Einfluss auf die Oberflächentemperatur der Fahrbahn haben.

Die für die Beobachterfahrt prognostizierte Fahrbahngriffigkeit ist in Abbildung 9.13(b) dargestellt. In den ersten 500 Abschnitten kommt es zu sprunghaften Unterschieden zwischen einzelnen Abschnitten. Grund für diese Sprünge sind die unterschiedlichen Texturvolumina der Fahrbahnbeläge. So ist bei konstanter Reifbildung ein Belag bereits gefüllt, während andere noch genügend Reserve aufweisen. Beim Übergang von einem Fahrbahnbelag zum nächsten kommt es daher zu einem sprunghaften Anstieg der Texturfüllung und damit einhergehendem Griffigkeitsverlust. Die Abschnitte 800 bis 1.500 sind mit einer einheitlichen Deckschicht berechnet, der Einfluss der Texturfüllung ist an der prognostizierten Griffigkeit zu erkennen.

9.2.4 Wirksamkeit von Winterdienstmaßnahmen

Das entwickelte Modell kann auch dazu eingesetzt werden, Kosten und Nutzen des Winterdienstes gegenüber zu stellen. Dazu können Kenngrößen wie Zeitverlust, Unfallraten oder ähnliche herangezogen

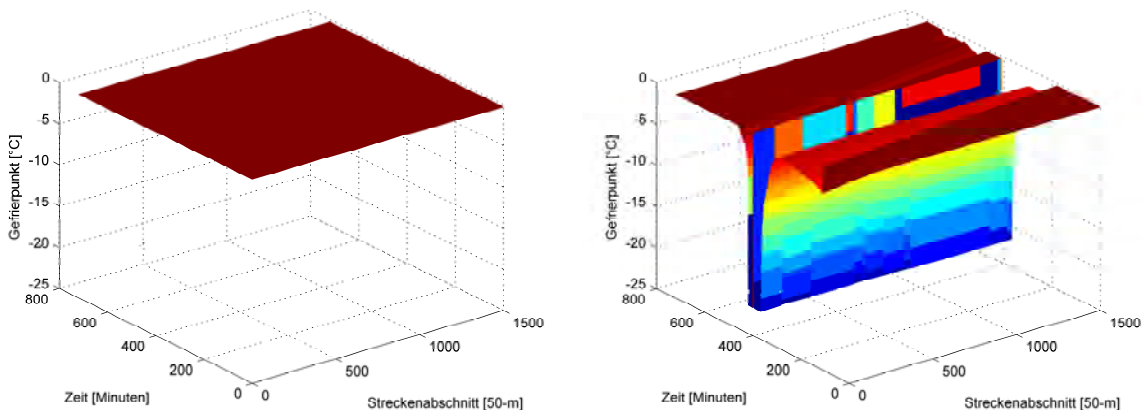


(a) Gewählte Fahrbahntemperatur während der Beobachtungsfahrt (b) Berechnete Griffigkeit während der Beobachtungsfahrt

Abbildung 9.13: Gewählte Temperatur und berechnete Griffigkeit während der Beobachtungsfahrt

gen werden. Im Folgenden wird der Unterschied in den errechneten Modellparametern zwischen einem durchgeführten Winterdienst und einer Nullvariante gezeigt.

Beim Einsatz von Streusalz durch mehrere Winterdienstfahrzeuge sinkt der Gefrierpunkt nach Ausbringung des Taumittels jedoch rasch auf bis zu -23°C ab, wie in Abbildung 9.14(b) zu erkennen ist. Ebenso ist die sehr frühe Streufahrt erkennbar, welche der Verhinderung von Reifglätte dient. Durch den geringen Verkehr in den Morgenstunden und damit geringen Restsalzverlusten bleibt der Gefrierpunkt lange auf einem Niveau von etwa $-2,0^{\circ}\text{C}$.



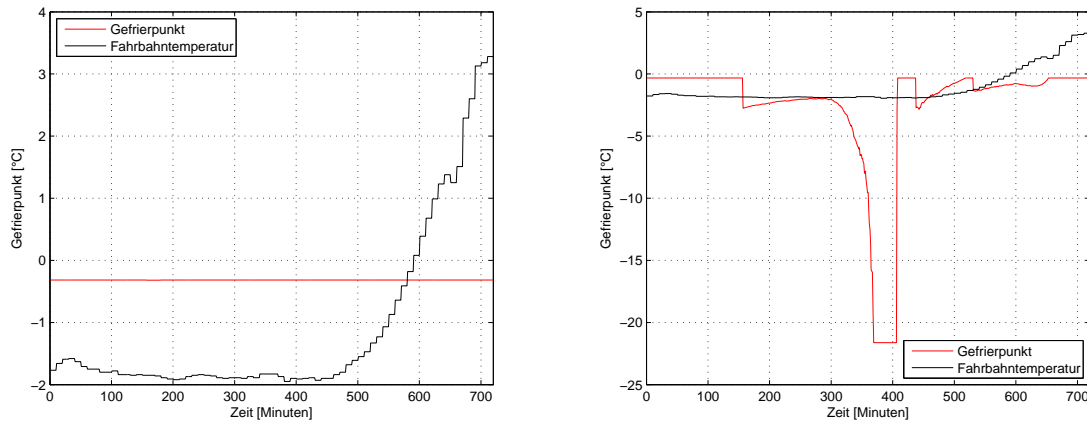
(a) Vollständige Datensätze zur Gefrierpunkttemperatur ohne Streufahrten (Nullvariante) (b) Vollständige Datensätze zur Gefrierpunkttemperatur mit Streufahrten

Abbildung 9.14: Vollständige Datensätze zur Gefrierpunkttemperatur mit und ohne Streufahrten

Zur besseren Erkennbarkeit wird aus dem Datensatz wiederum ein Abschnitt extrahiert. In Abbildung 9.15 ist der Gefrierpunkt der Sole auf der Fahrbahn eines Abschnittes dargestellt. Dabei ist in Abbildung 9.15(a) der Gefrierpunkt ohne Streusalz dargestellt, während in Abbildung 9.15(b) der Gefrierpunkt mit Streufahrten dargestellt ist.

Die berechnete Auswirkung von Winterdiensteinsätzen auf die Fahrbahngriffigkeit sind in Abbildung 9.16 dargestellt. Die Entwicklung der Griffigkeit ohne Streufahrten ist dabei in Abbildung 9.16(a)

9 Modellsynthese und -implementierung

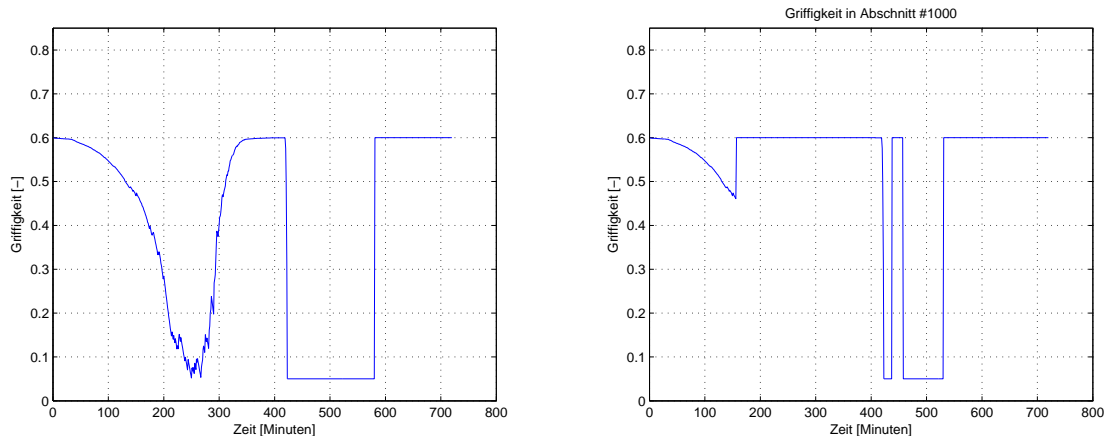


(a) Gefrierpunkt in betrachtetem Abschnitt ohne Streuung (b) Gefrierpunkt in betrachtetem Abschnitt mit Streufahrten

Abbildung 9.15: Gefrierpunkt in betrachtetem Abschnitt mit und ohne Streufahrten

zu erkennen. In den frühen Morgenstunden wird die Griffigkeit aufgrund von Reifglätte reduziert, am Vormittag durch die heftigen Schneefälle in Folge dann auch rasch sehr stark verringert.

Die negativen Auswirkungen der Reifglätte auf die Fahrbahngriffigkeit sind durch eine einzelne Streufahrt zu verhindern wie in Abbildung 9.16(b) zu erkennen ist. Bei anhaltenden Schneefällen kann die Griffigkeit nur immer wieder kurz nach den Streufahrten verbessert werden. Eine längerfristige Anhebung des Griffigkeitsniveaus ist erst nach Abklingen der Schneefälle wieder möglich.



(a) Fahrbahngriffigkeit in betrachtetem Abschnitt ohne Streuung (b) Fahrbahngriffigkeit in betrachtetem Abschnitt mit Streuung

Abbildung 9.16: Fahrbahngriffigkeit in betrachtetem Abschnitt mit und ohne Streuung

Die hier präsentierten Ergebnisse der Modellrechnung stellen den jeweils aktuellen Stand der unterschiedlichen Module dar. Mit der laufenden Forschung an separaten Modulen lässt sich die Prognosequalität verbessern. Insbesondere zur Restsalzmenge laufen im Jahr 2015 noch Forschungen in Österreich [52] und Deutschland [8] und [27] mit neuen Erkenntnissen.

Zur gewählten Darstellung wäre noch eine Kartendarstellung einzelner Parameter (etwa Griffigkeit) denkbar. Damit kann die Griffigkeit beim Befahren der Strecke sehr anschaulich visualisiert werden. Durch die Berechnung der Parameter zu jeder Zeit für jeden einzelnen Abschnitt stehen für die weitere Verarbeitung alle notwendigen Daten zu Verfügung.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Der Winterdienst auf Straßen stellt in Mittel- und Nordeuropa die größte Aufgabe im Straßenbetrieb dar und ist meist ausschlaggebend für die Fuhrparkgestaltung und den Personalstand. Aufgrund der hohen rechtlichen Risiken sind Planung, Durchführung und Dokumentation der Winterdienstesätze mit größter Sorgfalt durchzuführen.

Erhöhte Anforderungen an den Winterdienst von Seiten der KFZ-Lenker einerseits, sowie das generelle Gebot zur Sparsamkeit und Wirtschaftlichkeit andererseits führten zu einem sehr differenzierten Winterdienst. Der moderne Winterdienst läuft nicht nach einer fixen Routine am gesamten Straßennetz ab, viel mehr wird die Intensität der Betreuung an die Notwendigkeit angepasst und gezielt Prioritäten gesetzt. Auch die Fahrer der Winterdienstfahrzeuge werden mit die richtige Wahl des Streumittels und der Streumittelmenge bei modernen Winterdienstgeräten viel stärker gefordert. Zusätzlich entwickelt sich die Streutechnologie immer weiter und bringt damit auch eine Umstellung für die Fahrer mit sich.

Der Einsatz abstumpfender Streumittel hat zugunsten auftauender Streumittel sehr stark abgenommen. Durch die Weiterentwicklung der Feuchtsalztechnik bis hin zur Ausbringung reiner Sole oder Mischverfahren, nimmt die objektive Bewertung auftauender Streumittel stetig zu. Die Grundlagen für die Entwicklung von Laborversuchen zur Bewertung von Auftaumitteln werden ebenfalls in dieser Arbeit vorgestellt. Die entwickelten Laborprüfungen konnten in einem weiteren Forschungsprojekt an der TU Wien zu einem Normenentwurf weiterentwickelt werden [35].

10.1 Modellentwicklung Winterdienst

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten ganzheitlichen Modell für den Winterdienst ist es Möglich, die Betreuung des Straßennetzes für verschiedene Wetterszenarien zu simulieren. Dadurch kann eine exaktere Planung von Routen, sowie einer optimalen Streustrategien erfolgen, bevor es zu tatsächlichen Einsätzen kommt.

Die Entwicklung neuer Sensoren, insbesondere zur mobilen Erfassung des Straßenzustandes und der Filmdicke, hat im Zeitraum von wenigen Jahren von ersten Prototypen hin zu fertigen Produkten mehrerer Hersteller eine rasante Entwicklung hinter sich. Mit der Verbesserung der Sensoren ist eine wichtige Grundlage für die ständige Berechnung und Kalibration des Modells in Echtzeit geschaffen worden.

Neben der automatisierten Berechnung liegt der größte Vorteil des Modells in der Einbindung aller relevanten Kenngrößen zu einer holistischen Betrachtung. In der derzeitigen Planung berücksichtigte Faktoren decken dabei nur einen Bruchteil der Einflüsse ab. Im Wesentlichen finden allein folgende Faktoren Einfluss auf die Einsatzplanung:

- Niederschlagsmenge
- Temperatur
- Wetterentwicklung

Je nach Größe und Ausstattung des Straßenerhalters fallen diese Größen in unterschiedlicher Qualität an. So können Wetterprognosen bereits als Nowcast vorliegen oder noch in Form täglicher Wetterberichte

erfolgen. Ebenso können, insbesondere bei großen Straßenerhaltern, zusätzliche Daten über Glättewarnanlagen bereitgestellt werden.

Diese Informationen sind die Entscheidungsbasis für die gewählte Strategie im Einsatzfall, für die Planung werden häufig bereits Prioritäten für Straßenzügen gesetzt. Die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche fehlt jedoch in den meisten Planung vollständig. Gerade die Beschaffenheit der Fahrbahn ist für die Griffigkeit bereits in trockenem und nassem Zustand ausschlaggebend. Die Textur der Fahrbahn ist im vorgestellten Modell Grundlage für die Prognose der Griffigkeit basierend auf der Niederschlagsmenge, so bietet etwa eine Fahrbahn mit höherem Texturvolumen mehr Pufferkapazität bei der Reifbildung. Zusätzlich sind exponierte Streckenbereiche, etwa eine Brücke, für den Winterdienst gesondert zu betrachten, da an diese häufig kälter sind als Bereiche der freien Strecke.

Zusätzlich zu den bereits erwähnten Eingangsgrößen (Niederschlag, Temperatur, Wetterentwicklung) werden hingegen im Modell noch folgende weitere Kenngrößen betrachtet:

- Anlageverhältnisse
- Art des Fahrbahnbelags und Texturtiefe
- Verkehrsbelastung der Strecke
- Restsalzmenge auf der Fahrbahn
- Fahrbahngriffigkeit

Auch die Anforderungen an die Wetterprognose steigt bei der Einbeziehung in das Modell. Durch die Betrachtung einzelner Straßenabschnitte und einzelner Einsatzfahrten besteht in der Notwendigkeit von exakten Wetterdaten mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Nur damit ist es möglich, die Modellberechnung auch für sehr kurze Straßenabschnitte, etwa 50 Meter, durchzuführen. Mit solch kurzen Abschnittslängen können neben den Daten zur Fahrbahntextur auch kurze Brücken bzw. Durchlässe Eingang in das Modell finden in dem die betroffenen Abschnitte entsprechend ausgewiesen werden. Der hohe Detailgehalt an Daten zur Straße ist der Schlüssel zum Schluss von Winterdienstmaßnahmen auf die Fahrbahngriffigkeit. Der Aufwand für eine so detaillierte Aufnahme der Daten variiert je nach Streckennetz ist aber in den meisten Fällen sehr hoch. Oft kann dabei jedoch auf bereits vorhandene Straßenzustandserfassungen zurückgegriffen werden.

Bei der Verifizierung der einzelnen Module zeigt sich, dass in Einzelfällen noch Verbesserungen notwendig sind. Der modulare Aufbau des entwickelten Modells ist dabei sehr vorteilhaft, da geänderte Daten und Parameter rasch eingebunden und diese zudem lokal durch Messwerte kalibriert werden können ohne das gesamte Modell anpassen zu müssen. So können neueste Erkenntnisse aus Forschungsprojekten zu Verbesserungen einzelner Module führen, bzw. können Berechnungen mittels mobiler Messungen in Echtzeit kalibriert werden.

Die entwickelten Laborversuche zum Test der Tauwirksamkeit auftauender Streumittel liefern wiederholbare Ergebnisse. Insbesondere für das häufig eingesetzte Natriumchlorid sind die abgeleiteten Zusammenhänge sehr gut abgesichert. Durch die Entwicklung von Versuchsanordnungen für feste und flüssige Taumittel können neue Produkte rasch in das Modell einbezogen werden, sollten sich bereits im Labor deutliche Unterschiede zu NaCl herausstellen und in der Praxis bewähren und wirtschaftlich konkurrenzfähig sein.

Die größte derzeit noch größte Unschärfe im Modell betrifft die Berechnung der Filmdicke auf der Fahrbahn. Hierzu muss neben der Verdunstung und der Verspritzung von Wasser auch die Straßenentwässerung mit betrachtet werden. Dieser Mechanismus ist höchst komplex, wodurch hier noch Forschungsbedarf besteht. Im Modell lässt sich dieser Mangel mittels Messdaten aus Glättewarnanlagen bzw. mobiler Sensoren ausreichend gut kompensiert.

Unter Einbeziehung der Fahrbahntextur in ein Winterdienstmodell ist es möglich, Rückschlüsse auf die Auswirkungen von Winterdienstmaßnahmen auf die Griffigkeit zu ziehen. Damit ist das Modell vom

herrschenden Wetter über die Einsatzfahrten der Winterdienstfahrzeuge hin zu den Auswirkungen auf den Straßennutzer durchgängig. Schlussendlich ist für den Lenker nur eine Kenngröße maßgebend, die Griffbarkeit. Daher erlaubt die Prognose der Griffbarkeit in Abhängigkeit von der Einsatzsituation eine Optimierung der Einsätze durch den Betreiber.

Insgesamt wird das vorgestellte ganzheitliche Modell als ein wesentlicher Fortschritt in der strategischen und operativen Optimierung des Straßenwinterdienstes betrachtet.

10.2 Ausblick

Nach der beschriebenen Entwicklung des Modells sollen hier die Möglichkeiten kurz umrissen werden, welche sich unter Verwendung des Modells realisieren lassen. Ebenso wird auf den weiteren Forschungsbedarf, sowie technische Weiterentwicklungen hingewiesen. Die holistische Auslegung des Modells führt zu einer Vielzahl an Parameter, welche Einflussgrößen der jeweiligen Module sind. Dadurch ist durch weitere Forschungsarbeit noch Verbesserungspotential vorhanden. Mit der ganzheitlichen Auslegung stehen mit dem entwickelten Modell sehr viele Nutzungsmöglichkeiten offen.

Prinzipiell zeigen sich zwei Hauptanwendungsgebiete des Modells. Zum einen in der Simulation von Vorgängen im Winterdienst, um etwa Fuhrpark und Infrastruktur anzupassen oder Strategien zu entwickeln bzw. evaluieren. Abseits davon ist die Anwendung des Modells zur Wahl der optimalen Streumenge im operativen Einsatz zu sehen. Dazu müssen auch Einsatz- und Wetterdaten in Echtzeit verarbeitet werden.

10.2.1 Simulation Winterdienst

Sind die Grunddaten des Straßennetzes bekannt, lässt sich mit dem Modell die Entwicklung der Fahrbahngriffbarkeit für jedes Witterungsszenario und Einsatzstrategie prognostizieren. Damit können insbesondere für häufig vorkommende Wetterszenarien die gewählten Strategien überprüft oder optimiert werden. Dabei lassen sich rasch das Verhältnis Nutzen-Kosten betreffend Einsatzfahrten überprüfen und sich damit Einsparungen innerhalb des rechtlichen Rahmens analysieren. In der Folge können auch an die örtlichen Verhältnisse angepasste einheitliche Strategien für Standardwetterlagen entwickelt werden.

Im operativen Einsatz bieten rasche Simulationen eine Hilfestellung zur wirtschaftlichen und zweckmäßigen Einteilung von Einsatzfahrten. Die Auswirkungen sind sofort überprüfbar und einzelne Ausfahrten somit optimierbar. Dabei bleibt eine individuelle Bewertung der Situation durch das verantwortliche Personal erforderlich. Nur dadurch lässt sich der Zielkonflikt unterschiedlicher Interessensgruppen am Winterdienst für die jeweilige Situation lösen. Die Abwägung aus Verkehrssicherheit, Verfügbarkeit, Ressourceneinsatz und Umwelteinflüssen muss dabei, oft auch örtlich beschränkt, von den verantwortlichen Personen festgelegt werden. Das Modell kann hier objektive Daten liefern, welche in Bezug auf die vorhandenen und eingesetzten Ressourcen zu bewerten sind.

Aus den entwickelten Laboruntersuchungen sind die physikalischen Grenzen des jeweiligen Streumiteles bekannt, welche erfahrene Winterdienstfahrer bereits intuitiv nutzen. Aufgrund der hohen Verdünnung von Salz, bereits durch geringe Niederschlagsmengen ist die Konzentration der Sole so gering, dass sich nur sehr wenig Schnee bzw. Eis auftauen lässt. Diese Berechnungen auf Basis von Gefrierpunkt, Konzentration und Temperatur lassen sich in ihren Auswirkungen mit diesem Modell sehr gut darstellen. Das Aufzeigen der Grenzen für die Lenker ist sehr wichtig, da diese auch bei massivem Miteleinsatz nicht überschritten werden können. Sowohl die Modellberechnungen, als auch die praktischen Ergebnisse haben klar gezeigt, wo die jeweiligen physikalischen Grenzen im Winterdienst liegen. Ein erhöhter Einsatz über diese Grenzen hinaus wird daher in der überwiegenden Zahl der Fälle in Hinblick auf die Sicherheit der Nutzer nicht mehr zielführend sein und läuft außerdem dem Gebot des sparsamen und zweckmäßigen Miteleinsatzes zuwider.

Durch die Simulation eines für eine bestimmte Region typischen Winters lässt sich feststellen, wie häufig diese Grenzen überschritten werden und eine Analyse des volkswirtschaftlichen Nutzens des Winterdienstes erstellen. Durch die objektive Berechnungsgrundlage können die entsprechenden Ressourcen angeschafft, oder Fälle identifiziert werden, an welche ökonomisch fraglich sind.

Durch das regionale Zusammenführen von Wetterdaten und Analyse der getätigten Winterdienstleistungen ist die Grundlage für ein effizientes Benchmarksystem geschaffen. Regionale Abweichungen im Ressourcenverbrauch können auf die regionale Wettersituation abgestimmt werden. Für unterschiedliche Klimaregionen lassen sich auch die notwendigen Verbrauchsmengen für Betriebsmittel feststellen und den tatsächlichen Verbräuchen gegenüberstellen.

Aus den so gewonnenen Benchmarks für die erforderlichen Betriebsmittel in Abhängigkeit von den klimatischen Gegebenheiten lässt sich auch die gesamte Infrastruktur für den Winterdienst bewerten, um in der Folge Fahrzeuganzahl, Lagerkapazitäten, Routenlängen und vieles mehr an die maßgeblichen Szenarien anzupassen.

10.3 Automatisierte Berechnung optimaler Streumengen

Der Einsatz elektronischer Bedienpulte in neuen Streugeräten erlaubt es, per Software die gesamte Streumittelausbringung, insbesondere Streumenge und -breite, zu steuern. Gleichzeitig gibt es bereits Produkte, welche die Fahrbahntemperatur mittels Sensor erfassen und damit für verschiedene vom Fahrer zu wählende Programme die Streumenge automatisch einstellt. Ebenso wird eine Positionserfassung mittels GPS-Empfänger und Datenübertragung in Echtzeit bereits von verschiedenen Herstellern angeboten. Der Großteil der technischen Voraussetzungen, die Streumenge durch die Echtzeitberechnung des in der gegenständlichen Arbeit entwickelten Modells regeln zu können, sind damit bereits vorhanden.

Für eine exakte Dosierung basierend auf allen zu Verfügung stehenden Informationen müssten noch fehlende Straßendaten sowie Wetterprognosen hinzugefügt werden, um für jedes Streufahrzeug die ideale Streumenge automatisch zu regeln. Dabei soll der Lenker bei seiner Tätigkeit unterstützt werden. Trotz der mit dem Modell berechneten, deutlich näher am Optimum liegenden Streumenge kann dieser im Bedarfsfall manuell eingreifen. Für weite Teile der Strecke bzw. unerfahrene Lenker wäre ein automatisierter Vorschlag für die Einstellung der Streumenge jedoch vorteilhaft. Gerade an sehr engen oder gefährlichen Stellen kann sich der Lenker damit mehr auf das Fahren konzentrieren, wodurch die Sicherheit erhöht wird.

Werden Winterdienstfahrzeuge zusätzlich mit mobilen Straßenzustandssensoren ausgestattet, kann damit die Qualität der Modellberechnungen deutlich gesteigert werden. Zusätzlich würden diese Sensoren ein aktuelles Bild des Straßenzustands und der Wetterdaten an die Einsatzzentrale liefern. Damit können wiederum die Wetterprognosen bzw. die im Modell prognostizierten Größen, etwa die Filmdicke, kalibriert werden. Mit einem hohen Intervall an Rechenläufen des Modells, aktuellen Nowcast-Daten für die Wetterentwicklung und Echtzeitdaten aus mobilen bzw. stationären Sensoren wäre damit eine lückenlose Darstellung des Straßenzustandes im Winterdienst möglich.

10.4 Weitere Forschung

Der Aufbau des gegenständlichen Modells aus verschiedenen Modulen ermöglicht eine sehr spezifische Forschung in vielen Bereichen.

So können Erkenntnisse aus derzeit laufenden Forschungsprojekten zur Liegedauer von Salz rasch implementiert werden. In diesem Bereich ist eine Forschung in Hinblick auf eine weitere Verfeinerung durch Erweiterung der erfassten Umgebungsvariablen (Neigungsverhältnisse, Spurrinntiefe etc.) möglich. Die dazu notwendige Anzahl an Versuchen ist aufgrund der ausgemachten Einflussgrößen sehr

hoch. Eine andere Möglichkeit die Qualität der Eingangswerte für das Modell zu erhöhen besteht in der Möglichkeit den Salzgehalt über optische Sensoren zu messen. Damit sind automatische Messungen möglich, welche die notwendige Anzahl an Einzelmessungen für bessere Vorhersagen bzw. eine laufende Kalibration der Prognosen des Modells liefern können.

Ein hoher Forschungsbedarf wurde im Bereich der Berechnung der Filmdicke ausgemacht. Mittlerweile existieren mehrere Filmdickensensoren, welche bei geeignetem Messaufbau sehr genaue Untersuchungen erlauben. Dabei muss jedoch zwischen dem Abfließen von Wasser, dem Mechanismus der Verspritzung sowie der Verdunstung unterscheiden werden. Während die beiden Erstgenannten bei größeren Wassermengen einer nassen Fahrbahn dominant sind spielt die Verdunstung bei geringeren Mengen auf feuchter Fahrbahn eine große Rolle.

Bedarf besteht auch bei der Forschung bei der Zustandsgröße Fahrbahngriffigkeit, etwa bei Verwendung unterschiedlicher Messsysteme und Messreifen. In dieser Arbeit wurden die Griffigkeitsmessungen mit dem GripTester MKII mittels standardisiertem PIARC Messreifen durchgeführt. Dieser stellt aufgrund fehlenden Profils die untere Grenze der Bandbreite der Reibung eines Winterreifens auf Schnee- oder Eisfahrbahn dar.

Literaturverzeichnis

- [1] ACHLEITNER, MARKUS: *Untersuchungen zur Griffigkeits- und Texturmessung*. Diplomarbeit, TU Wien, 2007.
- [2] ARCHER, DONALD G. und RICHARD W. CARTER: *Thermodynamic Properties of the NaCl + H₂O System. 4. Heat Capacities of H₂O and NaCl(aq) in Cold-Stable and Supercooled States*. The Journal of Physical Chemistry B, 104(35):8563–8584, 2000.
- [3] ASI: *ÖNORM EN 15518-2 Winterdienstausrüstung - Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme - Teil 2: Straßenwetter - Empfohlene Beobachtung und Vorhersage*, 2009.
- [4] ASI: *ÖNORM EN ISO 13473-1 Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe*, 2013.
- [5] ASTM: *D 1177 -95 Standard Test Method for Freezing Point of Aqueous Engine Coolants*, 1998.
- [6] BADELDT, HORST: *Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen*. Verkehrstechnik V 156, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2007.
- [7] BADELDT, HORST: *A new model for a winter index to estimate and evaluate consumption of salt*. In: *PIARC XIVth International Winter Road Congress*, Andorra, 2014.
- [8] BADELDT, HORST, SANDRA EIMERMACHER und GÜNTER HAUSMANN: *Winterdienst auf offenen Asphalten*. Straße und Autobahn, 65:608–612, 2014.
- [9] BADELDT, HORST und FRANZ GÖTZFRIED: *Wirksamkeit verschiedener Tausalze*. Straßenverkehrstechnik, 10:527–533, 2003.
- [10] BADELDT, HORST und KARL MORITZ: *Beurteilung der Streustoffverteilung im Winterdienst; Beurteilung von Feuchtsalzstreubildern und deren Einflussgrößen*. Verkehrstechnik V 186, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2009.
- [11] BIDMON, VOLKER: *Leistungsbericht 2013 - Abteilung 9*. Leistungsbericht, Amt der Kärntner Landesregierung, Klagenfurt, 2013.
- [12] BMLFUW: *Bemessungsniederschläge in der Siedlungswasserwirtschaft*. Forschungsbericht, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 2006.
- [13] BOUILLOUD, LUDOVIC und ERIC MARTIN: *A Coupled Model to Simulate Snow Behavior on Roads*. J. Appl. Meteor. Climatol., 45(3):500–516, 2006.
- [14] CLUETT, C.: *A Case Study of the Support System (MDSS) in Maine*. Technischer Bericht, U.S. DOT ITS Joint Program Office, 2007.
- [15] DURTH, W. und H. HANKE: *Feuchtsalz-Streuung im kommunalen Straßendienst*. Kirschbaum Verlag, 2004.
- [16] ERF: *ERF 2011 European Road Statistics*. Technischer Bericht, European Union Road Federation, Brüssel, 2011.
- [17] FRIESE, ELMAR: *Ein temperaturabhängiges thermodynamisches Modell für das System H NH₄ Na SO₄ NO₃ Cl H₂O*. Doktorarbeit, Universität zu Köln, 2008.

- [18] FSV: *RVS 12.04.12 Schneeräumung und Streuung*, 2010.
- [19] GRUBER, JOHANNES und PETER MAURER: *Zustandserfassung der Straßenoberfläche auf Bundesstraßen B Messungen mit dem RoadSTAR in den Jahren 2001 und 2002*. Straßenforschung, 542, 2004.
- [20] GSV, GÜTERSCHUTZVERBAND DER ÖSTERREICHISCHEN KIES, SPLITT-UND SCHOTTERWERKE: *Richtlinie Streusplitt*, 2007.
- [21] HAAVASOJA, TAISTO, T. KIURU, J. VALTONEN und T. PELLINEN: *Continuous skid resistance test*. In: *PIARC XIVth International Winter Road Congress*, Andorra, 2014.
- [22] HANKE, H.: *Salzmengenbevorratung und Salzmengenmanagement*. In: *ASTRAD Symposium*, Wels, 2011.
- [23] HAUSMANN, GÜNTER: *Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn*. Verkehrstechnik V 180, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2009.
- [24] HAUSMANN, GÜNTER: *Einsatz von Safecote im Straßenwinterdienst - Zwischenbericht*. Verkehrstechnik, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2010.
- [25] HAUSMANN, GÜNTER: *Empfehlungen zum richtigen Aufbringen von Tausalzlösungen*. Verkehrstechnik V 218, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2012.
- [26] HAUSMANN, GÜNTER: *System for prognostic calculation of the optimal spreading density in winter road clearance services*. In: *PIARC XIVth International Winter Road Congress*, Andorra, 2014.
- [27] HAUSMANN, GÜNTER: *Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst*. Verkehrstechnik V 260, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2015.
- [28] HERRY, MAX, NORBERT SEDLACEK und IRENE KIRNBAUER STEINACHER: *Verkehr in Zahlen*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2011.
- [29] HOFFMANN, G.: *Untersuchungen zum Einsatz von mineralischen Streustoffen beim Straßenwinterdienst in Berlin*. Technischer Bericht, 1984.
- [30] HOFFMANN, MARKUS: *Systematisches Erhaltungsmanagement mit Lebenszykluskosten*. GE-STRATA Journal, 135:14 – 24, 2012.
- [31] HOFFMANN, MARKUS, PETER NUTZ und RONALD BLAB: *Optimierung der Feuchtsalzstreuung*. Forschungsarbeiten VSF 15, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2011.
- [32] HOFFMANN, MARKUS, PETER NUTZ und RONALD BLAB: *Dynamic Modeling of Winter Maintenance Strategies and Their Impact on Skid Resistance*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 48(0):682 – 691, 2012. Transport Research Arena 2012.
- [33] HOFFMANN, MARKUS, PETER NUTZ und RONALD BLAB: *Technische und wirtschaftliche Optimierung von Streumitteln und Streustrategien im Winterdienst*. Unveröffentlichter Forschungsbericht für das Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, 2012.
- [34] HOFFMANN, MARKUS, PETER NUTZ und RONALD BLAB: *Technische und wirtschaftliche Bewertung des Solestreugerätes Stratos Combi Soliplus*. Unveröffentlichter Forschungsbericht für die ASFiNAG Service GmbH, 2013.
- [35] HOFKO, BERNHARD, MARKUS HOFFMANN und DANIEL STEINER: *Eignungskriterien für auf-tauende Streumittel*. Forschungsarbeiten VSF 43, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2015.
- [36] IRVINE, FINDLAY: *GripTester Data Sheet*. Technischer Bericht, Findlay Irvine, Penicuik, 2012.

- [37] JENKS, CHRISTOPHER, CRAWFORD JENCKS, AMIR HANNA, EILEEN DELANEY und DOUG ENGLISH: *Determining Highway Maintenance Costs*. NCHRP Report 688, National cooperative highway research program, Washington, 2011.
- [38] KIRCHMAIER, LUKAS: *Bewertung der Griffigkeit von mit CMA behandelten Innerortstraßen*. In: *CMA-Kongress: Innovativer Winterdienst - Feinstaubreduktion*, Lienz, 2010.
- [39] KIRCHMAIER, LUKAS, RONALD BLAB, NICOLE JANKOWSKI, HANS PUXBAUM und MANFRED NEUBERGER: *Technisch-wirtschaftliche sowie medizinischhygienische Beurteilung des abstumpfenden Streumittel Einsatzes im kommunalen Winterdienst*. Forschungsbericht, Stadt Wien, MA 48, Wien, 2009.
- [40] KLUGER-EIGL, WOLFGANG, JOHANN LITZKA und PETER MAURER: *Grundlagen zur Griffigkeitsmessung mit dem GripTester*. Straßenforschung, 566, 2007.
- [41] KOSTICK, DENNIS S.: *Salt*. US Geological Survey Minerals Yearbook, Seiten 63.1–63.22, 2011.
- [42] KOSTICK, DENNIS S.: *Mineral Commodity Summaries*. U.S. Geological Survey, Seiten 134–135, 2014.
- [43] KURZWEIL, PETER und PAUL SCHEIPERS: *Chemie, Grundlagen, Aufbauwissen, Anwendungen und Experimente*. Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
- [44] LIPPOLD, CHRISTIAN: *Der Elsner 2012. Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen. Planung, Bau, Erhaltung, Verkehr, Betrieb*. 66.Auflage, 2012.
- [45] LOOSE, HEIDI: *Dreidimensionale Straßenmodelle für Fahrerassistenzsysteme auf Landstraßen*. Schriftenreihe Institut für Mess- und Regelungstechnik, Karlsruher Institut für Technologie, 22, 2012.
- [46] MALMIVUO, MIKKO: *Comparison study of mobile optical friction and temperature meters 2013*. Technischer Bericht, Innomikko Ltd., Helsinki, 2013.
- [47] MEIROLD-MAUTNER, INGO, YONG WANG, ALEXANDER KANN, BENEDIKT BICA, CHRISTINE GRUBER, GEORG PISTOTNIK und SABINE RADANOVICS: *Integrated Nowcasting System for the Central European Area: INCA-CE*. In: *Data and Mobility*, Band 81 der Reihe *Advances in Intelligent and Soft Computing*, Seiten 107–114. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [48] MÜLLER, CARINA: *Eignungskriterien für auftauende Streumittel*. Diplomarbeit, TU Wien, Wien, 2014.
- [49] MUNDL, REINHARD: *Skriptum Reifentechnik, TU Wien*, 2012.
- [50] NCAR: *A Comparison of Road Temperature Models: FASST, METRo, and SNTHERM*. Technischer Bericht, National Center for Atmospheric Research Research Applications Laboratory Boulder, Colorado, USA, 2007.
- [51] NELSON, RICK: *Performance metrics and tools for winter maintenance operations*. In: *PIARC XIVth International Winter Road Congress*, Andorra, 2014.
- [52] NEUHOLD, JOSEF und MICHAEL STEININGER: *Erfahrungen zur Solesteuerung in NÖ - Streubildanalysen und Restsalzmessungen*. FSV Schriftenreihe, 14:19–25, 2014.
- [53] NÖLHR: *Rechnungshofbericht: NÖ Straßenverwaltung, Straßenbetrieb, Winterdienst*, 2010.
- [54] NUTZ, PETER: *Beitrag zur Optimierung der Feuchtsalzsteuerung in Österreich*. Diplomarbeit, TU Wien, 2010.
- [55] NUTZ, PETER und MARKUS HOFFMANN: *Towards real-time skid resistance forecast*. In: *SIRWEC 16th International Road Weather Conference*, Helsinki, 2012.

- [56] NUTZ, PETER, MARKUS HOFFMANN und RONALD BLAB: *Technische und wirtschaftliche Bewertung des Solestreugerätes Firestorm*. Unveröffentlichter Forschungsbericht für die ASFiNAG Service GmbH, 2012.
- [57] NUTZ, PETER, MARKUS HOFFMANN und RONALD BLAB: *Begleitende Untersuchungen zur Einführung der Solesteuerung*. Unveröffentlichter Forschungsbericht für die ASFiNAG Service GmbH, 2013.
- [58] NUTZ, PETER, MARKUS HOFFMANN, RONALD BLAB, ALEXANDER KANN und ALEXANDER BECK: *Sensor based adaptation of treatment strategies*. In: *PIARC XIVth International Winter Road Congress*, Andorra, 2014.
- [59] PERSSON, B.: *Theories of rubber friction and contact mechanics*. Journal of chemical physics, 115, 2001.
- [60] PERSSON, B., U. TARTAGLINO und E. ALBOR, O. AN TOSATTI: *Rubber friction on wet and dry road surfaces: The sealing effect*. Physical review, B 71, 2005.
- [61] POPPER, ALFRED, FRANZ BISCHOF, ELISABETH KOCH, HANS LANGER und GERHARD SPET: *Schneeräumung und Streuung; Rechtliche, technische und meteorologische Fragen*. Verlag Österreich, Wien, 1998.
- [62] RAW: *Der Einsatz von ICE & DUST-AWAY zur Reduktion der Feinstaubkonzentration und im Winterdienst*, 2007.
- [63] SCHULZ, SUSANNE: *Lasting of salt on rural roads in Germany*. In: *PIARC XIVth International Winter Road Congress*, Andorra, 2014.
- [64] SCHULZE, CHRISTIAN: *Ein geometrisch basiertes Modell zur Ableitung von Reibwerten bei Nässe aus der Textur*. Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, ISAC, Institut für Straßenwesen, Aachen, Aachen, 2011.
- [65] WEDLER, GERD: *Lehrbuch der Physikalischen Chemie*. Wiley-VCH, Weinheim, 2004.
- [66] WEHNER, B.: *Griffigkeitsmessungen auf winterglatten Fahrbahnoberflächen*. Technischer Bericht, 1960.
- [67] WISTUBA: *Klimaeinflüsse auf Asphaltstraßen - Maßgebende Temperatur für die analytische Oberbaubemessung in Österreich*. Mitteilungen des Forschungsbereichs Straßenwesen 15, Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen, Wien, 2003.
- [68] YOVCHEV, KONSTANTIN: *Laborversuche zur Optimierung der Feuchtsalzsteuerung*. Diplomarbeit, Wien, 2011.
- [69] ZULAUF, R.: *Über das Haftvermögen des Haftsatzes auf der Straßenoberfläche*. Technischer Bericht, 1969.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Screenshot der MDSS Software <i>Quelle: NCAR</i>	10
1.2	Screenshot der MDSS Anwendung <i>Quelle: NCAR</i>	11
1.3	Saug-Spülgerät <i>Quelle: [24]</i>	13
1.4	Schematische Darstellung der geplanten Integration des entwickelten Modells in den Winterdienstbetrieb	16
1.5	Schemaskizze des entwickelten Winterdienstmodells	18
2.1	Abgrenzung des Straßenbetriebes von der baulichen Straßenerhaltung	22
2.2	Straßennetz der Bundesstraßen und ausgewählter Landesstraßen B in Österreich 2011 <i>Quelle: [28]</i>	22
2.3	Mittlere Betreuungslängen im Straßenbetrieb in den Bundesländern bzw. bei der ASFiNAG	23
2.4	Aufteilung des Straßenbaubudgets des Landes Niederösterreich im Jahr 2008	24
2.5	Vergleich der Kosten für den Straßenbetrieb in €/km (Datenbasis: 2011)	26
3.1	Schematische Darstellung präventiver und kurativer Streufahrten	28
3.2	Zielkonflikte der vom Winterdienst betroffenen Gruppen	30
3.3	Bemessungsniederschlagswerte in mm für Österreich (Dauer 60 Minuten, Jährlichkeit 10 Jahre) <i>Quelle: [12]</i>	41
3.4	Schneefallereignisse in Österreich (Datengrundlage: Nov.-März 2005-2010)	41
3.5	Schneefallereignisse nach Höhenlagen in Österreich (Datengrundlage: Nov.-März 2005-2010)	42
3.6	Energiehaushalt der Straßenoberfläche	43
3.7	Vergleich verschiedener Prognosemodelle der Fahrbahntemperatur (<i>Quelle: [50]</i>)	44
3.8	Bsp. Ergebnisse der tatsächlich gemessenen Lufttemperatur (Sensor #9) und 2h Prognosen auf der A2 am 13.03.2013. <i>Quelle: [33]</i>	45
3.9	Beispielhafte Abweichung der Ergebnisse der tatsächlich gemessenen Lufttemperatur (Sensor #9) und 2-h-Prognosen auf der A2 am 13.03.2013. <i>Quelle: [33]</i>	46
3.10	Boxplot Abweichung der Lufttemperatur von allen Sensormessungen je Tag und den zugehörigen 2-h-Prognosen vom 01. bis 31.03.2013. <i>Quelle: [33]</i>	47
3.11	Boxplot Gesamtabweichung der Lufttemperatur aus allen Sensormessungen von den Ergebnissen der 2 h Prognosen im gesamten Messzeitraum. <i>Quelle: [33]</i>	48
3.12	Histogramm und gefittete Normalverteilung zur Gesamtabweichung der Lufttemperatur aus allen Sensormessungen von den Ergebnissen der 2-h-Prognosen im Monat März 2013. <i>Quelle: [33]</i>	48
3.13	Beispielhafte Ergebnisse der tatsächlich gemessenen Fahrbahntemperatur (Sensor #9) und 2-h-Prognosen auf der A2 am 13.03.2013. <i>Quelle: [33]</i>	49
3.14	Abweichung der tatsächlich gemessenen Fahrbahntemperatur (Sensor #9) und 2-h-Prognosen für gemittelte Stundenwerte auf der A2 am 13.03.2013. <i>Quelle: [33]</i>	50
3.15	Boxplot der Abweichung der Fahrbahntemperatur von allen Sensormessungen je Tag und den zugehörigen 2-h-Prognosen vom 01. bis 31.03.2013. <i>Quelle: [33]</i>	51
3.16	Boxplot der Abweichung der Fahrbahntemperatur von allen Sensormessungen und den zugehörigen 2-h-Prognosen vom 01. bis 31.03.2013. <i>Quelle: [33]</i>	52
3.17	Histogramm und gefittete Normalverteilung zur Gesamtabweichung der Fahrbahntemperatur aus allen Sensormessungen von den Ergebnissen der 2-h-Prognosen im Monat März 2013. <i>Quelle: [33]</i>	52

3.18	Prognostizierte und tatsächlich gemessene Niederschlagsintensität (LUFFT - Wetterstation) auf der A2 am 13.03.2013. Quelle: [33]	53
3.19	Prognostizierte und tatsächlich gemessene Niederschlagssumme (LUFFT - Wetterstation) auf der A2 am 13.03.2013. Quelle: [33]	54
3.20	Abweichung von Niederschlagssumme und Niederschlagsbeginn aus 13 Einzelereignissen im März 2013. Quelle: [33]	55
3.21	Im Winterdienst eingesetzte Fahrzeuge	56
3.22	Für den Winterdienst verfügbare Fahrzeuge nach Bundesländern (Quelle: [11])	57
3.23	Lagerung von Streusalz in Silos bzw. Hallen	58
3.24	Grundlegende Möglichkeiten zum Räumen von Schnee von der Fahrbahn	60
3.25	Schneepflüge im Einsatz	60
3.26	Beispiel einer Routenführung auf verschiedenen Netzen mit Anfangs- und Endpunkt (A, E) sowie Stützpunkten (S)	62
4.1	Wirkungsweise und Abnahme von Streusplitt auf der Fahrbahn	63
4.2	Eutektisches Diagramm für NaCl und Wasser	67
4.3	Streuteller zum Ausbringen von Streumitteln	71
4.4	Trockensalzstreuung im Vergleich zu Feuchtsalzstreuung FS 30	72
4.5	Reine Solestreuung und Kombination aus Sole- und Feuchtsalzstreuung	74
4.6	Schematisches Lösen eines NaCl-Kristalles in Wasser	75
4.7	Gitterenthalpie und Hydratationsenthalpie von NaCl bei 25°C	76
4.8	Thermografische Aufnahmen eines Schneefeldes vor und nach manueller Salzausbringung. Quelle: [31]	79
4.9	Überlagerung Thermoaufnahme mit Echtfarbbild des Firestorm und Auswertung der Temperaturdifferenzen. Quelle: [56]	80
4.10	Thermografische Aufnahmen der Teststrecke mit festgefahretem Schnee	81
4.11	Phasenübergangsdiagramm einer Lösung und Gefrierpunktskurven für eine NaCl-Lösung	82
4.12	Sieblinien von Natriumchlorid verschiedener Hersteller und Grenzwerte gemäß RVS 12.04.16	85
4.13	Messpunkte aus den Laborversuchen und Trendlinien der Tauwirksamkeit von Natriumchlorid mit Korngröße 2,0 mm bis 3,15 mm in Abhängigkeit der Versuchstemperatur (-2,5°C, -5,0°C und -7,5°C)	85
4.14	Messpunkte aus den Laborversuchen und Trendlinien der Tauwirksamkeit von Natriumchlorid bei gleicher Versuchstemperatur (-7,5°C), Korngruppen 0,5 bis 0,75 mm und 2,0 bis 3,15 mm sowie Tauquotienten TQ ₁ und TQ ₁₁₋₂₄₀	86
4.15	Tauquotient TQ ₁₋₁₀ und TQ ₁₁₋₂₄₀ für Korndurchmesser 0,5 mm bis 0,75 mm und 2,0 mm bis 3,15 mm bei Versuchstemperaturen von -2,5°C, -5,0°C und -7,5°C	87
4.16	Tauquotient TQ ₁₋₁₀ und TQ ₁₁₋₂₄₀ nach Temperatur	88
4.17	Schematische Darstellung der Tauwirkung kleiner und großer Korndurchmesser mit „Ice-Untercutting-Effekt“	89
4.18	Probekörper für die Tauwirksamkeitsversuche flüssiger Taumittel	90
4.19	Arbeitsschritte bei Versuchsdurchführung: Probekörper wägen - Sole mittels Spritze aufbringen - definierte Zeit einwirken lassen - abgießen und getautes Eis und Sole wägen	91
4.20	Messpunkte aus den Laborversuchen und Trendlinien der Tauwirksamkeit von NaCl-Sole mit einer Konzentration von 20 % bei Versuchstemperaturen von -2,5°C, -5,0°C und -7,5°C	92
4.21	Messpunkte aus den Laborversuchen und Trendlinien der Tauwirksamkeit von NaCl-Sole mit einer Konzentration von 10 %, 16 % und 20 % bei einer Versuchstemperatur von -2,5°C	92
4.22	Aus Messungen errechnete Tauwirksamkeitskurven verschiedener Taumittelmischungen bei einer Versuchstemperatur von -5,0°C	93
5.1	Klimaschrank und Proben zur Bestimmung des Gefrierpunktes von Lösungen	95
5.2	Theoretisches Halteplateau beim Gefriervorgang mit Gefrierpunkt nach ASTM D1177-94	96

5.3	Halteplateau aus realem Gefriervorgang dargestellt in Auswertesoftware ELPROLOG . . .	97
5.4	Gefrierpunktverläufe von NaCl, CaCl ₂ und MgCl ₂	97
5.5	Verifikation der Kurve mit Störfaktoren für NaCl	99
6.1	Verdrängungsmechanismen von Salz auf der Fahrbahn	101
6.2	Messgerät SOBO20 und Messaufbau zur Messung von Restsalz auf der Fahrbahn	102
6.3	Ideale und reale Messstrecke für Restsalzmessungen. Quelle:[31]	103
6.4	Relative Anfangsverluste (Bis 150 KFZ oder 5 Minuten nach einer Streufahrt) aller Einzelmessungen bezogen auf die eingestellte Salzmenge	104
6.5	Darstellung aller durchgeführten Messungen von Restsalz als Mittelwert von 3 bis 5 Einzelmessungen je Punkt	105
6.6	Darstellung aller durchgeführten Messungen von Restsalz getrennt nach trockenem, feuchtem oder nassem Fahrbahnzustand	106
6.7	Darstellung der Verkehrsverluste getrennt nach trockenem, feuchtem oder nassem Fahrbahnzustand	107
6.8	Skizze der Berechnung der Restsalzmenge basierend auf Streuzeitpunkt und -menge sowie Fahrbahnzustand infolge Niederschlag	109
7.1	Entwicklung der Wasserfilmdicke gemäß Formel 7.6 für 3 Windgeschwindigkeiten und 2 Niederschlagsmengen	113
7.2	Gemessene und berechnete Wasserfilmdicke sowie Niederschlagsmenge für ein Ereignis und Abweichung über alle Ereignisse in der Saison 2014/2015	114
7.3	Gemessene und berechnete Wasserfilmdicke sowie Niederschlagsmenge für verschiedene Regenereignisse	114
7.4	Gemessene und berechnete Wasserfilmdicke sowie Niederschlagsmenge für mehrere kurze Regenereignisse innerhalb von acht Stunden	115
7.5	Überprüfung 3 unterschiedlicher Sensortypen zur Bestimmung der Wasserfilmdicke . . .	116
8.1	Schematische Darstellung der Adhäsionskomponente nach [49]	120
8.2	Schematische Darstellung der Hysteresekomponente nach [49]	120
8.3	Schematische Darstellung der Viskosekomponente nach [49]	121
8.4	Schematische Darstellung der Kohäsionskomponente nach [49]	121
8.5	Einfluss der Texturfüllung auf die Griffigkeit	122
8.6	Definition der mittleren Profiltiefe MPD gemäß EN ISO 13473-1	123
8.7	Schematischer Vergleich der unterschiedlichen Texturmessmethoden	124
8.8	Bestimmung des Texturvolumens mittels Sandfleckverfahren bzw. Lasertexturerfassung an Bohrkernen aus Asphaltbeton- und Waschbetondeckschichten	125
8.9	Vergleich der gemessenen Texturtiefen zwischen Sandfleckverfahren (MTD) und RoadSTAR (MPD) n=53, R ² =0,646, σ=0,2231 Datenquelle: [1]	126
8.10	Überhöhte 3-dimensionale Darstellung unterschiedlicher Makrotexturen	127
8.11	Schematische Darstellung der Berechnung des Verhältnisses Volumen der gefüllten Textur zu der Flüssigkeitsoberfläche der gefüllten Textur	128
8.12	Verhältniss von relativem mit Flüssigkeit gefülltem Texturvolumen zu relativer Flüssigkeitsoberfläche	128
8.13	Verhältnis von mit Flüssigkeit gefülltem Texturvolumen zu Flüssigkeitsoberfläche von 16 Probekörpern mit 10 cm x 10 cm Analysefläche	129
8.14	Typisches Verhältnis von mit Flüssigkeit gefülltem Texturvolumen zu relativer Flüssigkeitsoberfläche für gebräuchliche Deckschichttypen	129
8.15	Regressionskurve des Verhältnis von mit Flüssigkeit gefülltem Texturvolumen zu Flüssigkeitsoberfläche für ausgewählte Asphaltbetondecken	130
8.16	Modellannahme der Entwicklung der Fahrbahngriffigkeit mit zunehmender Texturfüllung für drei Grundgriffigkeiten	131

8.17	Darstellung der Texturfüllung bei einem gefüllten Volumen von 30%, 60% und 90% auf einem Texturausschnitt von 2x2 cm	131
8.18	Entwicklung der Fahrbahngriffigkeit mit zunehmender Texturfüllung für verschiedene Texturen mit der Annahme gleicher Grundgriffigkeit bei feuchter Fahrbahn	132
8.19	Entwicklung der Fahrbahngriffigkeit mit fortschreitendem Niederschlag für verschiedene Texturen mit der Annahme gleicher Grundgriffigkeit bei feuchter Fahrbahn	132
8.20	Echtbilder, 3D Bilder der Textur und Kennwerte von sechs Deckschichten	133
9.1	Flow Chart der Modellrechnung	136
9.2	Auf dem Streckenabschnitt gemessene Fahrbahngriffigkeit (Griptester) von vier Messfahrten	137
9.3	Auf dem Streckenabschnitt gemessene Filmdicke (Vaisala DSC Prototyp) von vier Messfahrten	138
9.4	Boxplots der Griffigkeitsmessungen und Filmdickenmessungen auf dem Messabschnitt .	138
9.5	Bei wiederholten Messfahrten gemessene und kontinuierlich berechnete Filmdicke für einen Abschnitt	139
9.6	Gemessene und berechnete Griffigkeit für einen Abschnitt bei wiederholten Messfahrten	140
9.7	Übersicht über Streufahrten und Verkehr nach den Streufahrten im beobachteten Abschnitt	141
9.8	Berechnete Filmdicke und Restsalzmenge auf dem betrachteten Abschnitt	142
9.9	Angenommene Fahrbahntemperatur und berechneter Gefrierpunkt der Sole auf der Fahrbahn auf dem betrachteten Abschnitt	142
9.10	Berechnete Texturfüllung und Griffigkeit auf dem beobachteten Abschnitt	143
9.11	Übersicht der Streufahrten und der Beobachtungsfahrt sowie Daten der Restsalzmenge .	143
9.12	Vollständige Datensätze zur Fahrbahntemperatur und Fahrbahngriffigkeit	144
9.13	Gewählte Temperatur und berechnete Griffigkeit während der Beobachtungsfahrt	145
9.14	Vollständige Datensätze zur Gefrierpunktemperatur mit und ohne Streufahrten	145
9.15	Gefrierpunkt in betrachtetem Abschnitt mit und ohne Streufahrten	146
9.16	Fahrbahngriffigkeit in betrachtetem Abschnitt mit und ohne Streuung	146

Tabellenverzeichnis

2.1	Straßenbetreiber in Österreich (Stand 2015, Quelle:bmvit, Statistik Straße und Verkehr) .	22
2.2	Bestandskenngrößen einer durchschnittlichen Autobahnmeisterei in Deutschland [44] . .	24
3.1	Winterdienstkategorien im Außerortsbereich nach [18]	29
3.2	Winterdienstkategorien im urbanen Bereich nach [18]	29
3.3	Fahrzeug- und Personalausstattung einer durchschnittlichen Straßenmeisterei in Nieder- österreich (Quelle: NÖ LRH Bericht 12/2009)	58
3.4	Empfohlene Lagerkapazität von Streusalz, berechnet auf Basis von Lieferfristen und Ver- brauch pro Volleinsatztag (5 Volleinsatztage mit Extremwetterlage; Bezug Salznetz, 2 Fahrstreifen). Quelle: [22]	59
4.1	Anteil einzelner Verwendungsbereiche von Natriumchlorid in den USA. Quelle: [41] . .	66
4.2	Molare Masse von Kalziumchlorid-Dihydrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	68
4.3	Molare Masse von Magnesiumchlorid-Hexahydrat	68
4.4	Gegenüberstellung der chemischen Eigenschaften und Kosten der häufigsten Tausalze . .	70
4.5	Lösungsenthalpien gebräuchlicher Tausalze	78
4.6	Parameter a und b für die Berechnung der Tauwirksamkeit gemäß Gleichung 4.13	86
4.7	Bestimmtheitsmaß R^2 ausgewählter Tauquotienten	88
4.8	Parameter a und b für die Berechnung der Tauwirksamkeit einer NaCl-Sole gemäß Glei- chung 4.13 sowie Bestimmtheitsmaß R^2	93
4.9	Parameter a und b für die Berechnung der Tauwirksamkeit unterschiedlicher Mischungen bei $-5,0^\circ\text{C}$ gemäß Gleichung 4.13 sowie Bestimmtheitsmaß R^2	93
5.1	Parameter für die Berechnung des Gefrierpunktes nach Formel 5.1 (Mittelwert)	98
5.2	Parameter für die Berechnung des Gefrierpunktes nach Formel 5.1 (Untere 95%-Perzentile)	98
5.3	Parameter für die Berechnung des Gefrierpunktes nach Formel 5.2 (Mittelwert)	98
6.1	Koeffizienten für die Berechnung der Restsalzmenge gemäß Gleichung 6.1	108
6.2	Koeffizienten für die Berechnung der Anfangsverluste gemäß Gleichung 6.1	108
8.1	Angaben zu den analysierten Bohrkernen	128
9.1	Eingangsparameter für die Verifikation des Modells an Messwerten	137
9.2	Daten der Straßenabschnitte für die Simulation	140
9.3	Daten der Wetterlage für die Simulation	140
9.4	Daten der Streufahrten für die Simulation	141