

**TU**

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN**

DIPLOMARBEIT

MASTER'S THESIS

# **Beitrag zur Optimierung des Winterdienstes in Österreich**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen  
Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Anleitung von

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

und

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Markus Hoffmann**

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Peter Nutz**

Matr. Nr.: 02 25 203  
Thallernstraße 11  
A - 2352 Gumpoldskirchen

Wien, im Juni 2010

## 0.1 Kurzfassung

### Feuchtsalzstreuung, Safecote und Griffigkeit von Straßen

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Winterdienst auf hochrangigen Straßen und der Untersuchung des Optimierungspotentiales der Taumittelausbringung durch verschiedene Streutechnologien und neuartige Streustoffzusätze. Als zentraler Indikator für die Bewertung des Winterdienstes wird die Griffigkeit der Straße herangezogen, die das ausschlaggebende Kriterium für die Fahrsicherheit ist. Zur Erreichung derselben wurden Streustrategien für typische Wetter- und Verkehrssituationen entwickelt und ihre Wirkung untersucht. Die Arbeit liefert einen Beitrag zu der zentralen Fragestellung des richtigen Streuzeitpunktes bei eingesetztem Streumittel und Streumenge sowie den für den Netzbetreiber damit verbundenen Kosten.

Ausgehend vom Stand der Forschung und der Praxis des Winterdienstes ging es um eine Weiterentwicklung bestehender Ansätze und Darstellung möglicher Optimierungspotentiale. Während sich die wissenschaftliche Forschung weitgehend auf die Untersuchung von Einzelparametern konzentriert, besteht in der Praxis das Problem stark voneinander abweichender Streumengen in vergleichbaren Situationen. Dagegen wird in der Arbeit versucht konsistente Modelle zu entwickeln, welche die Situation auf der Straße wirklichkeitsnahe abbilden und daraus praxisnahe Streuempfehlungen ableiten. Derzeit begegnet man der komplexen Situation mittels standardisierter Wetterszenarien und Streumengen.

Ausgehend von den wesentlichen Einflussparametern Niederschlagsmenge, Verkehrsmenge, Fahrbahntextur und Fahrbahntemperatur im Tagesverlauf wurde ein Modellansatz formuliert, mit dem die (theoretische) Gefrierpunktttemperatur des Flüssigkeitsfilmes auf der Fahrbahn sowie der tatsächlichen Fahrbahntemperatur prognostiziert werden kann. Je nach Fahrbahntextur und Dicke des Flüssigkeitsfilmes kommt es zu einem starken Abfall der Griffigkeit, wenn die Gefriertemperatur des Flüssigkeitsfilmes über jener der Fahrbahn liegt.

Zur Bestimmung der einzelnen Einflussparameter wurde ein umfangreiches Programm von Labor- und Feldversuchen zusammen mit den Straßenverwaltungen der Länder sowie BMVIT und ASFINAG ausgearbeitet. Anhand dieser Versuche wurde eine Datenbasis für eine erste Quantifizierung der Einflussparameter erstellt. In Abstimmung mit vorhandenen Untersuchungen wurde eine erste Version eines Winterdienstmodelles erstellt, mit dem Prognoserechnungen für verschiedene Wetterszenarien möglich sind. Aufgrund der vorhandenen Streuungen der Eingangsparameter ist die Definition klar unterscheidbarer Wetter- und dazu passender Streuszenarien ein wesentlicher Schritt für die praktische Umsetzbarkeit der Berechnungsergebnisse.

Bei der Ausarbeitung der Zielsetzungen sowie der Zusammenstellung der Ergebnisse wurde besonderes Augenmerk auf die Anforderungen der Streupraxis aus strategischer Sicht, aus Sicht der Einsatz- und Kostenplanung sowie der operativen Umsetzung der Streuempfehlungen gelegt. Zur Erleichterung der Umsetzung in den Streufahrzeugen wurden die wesentlichsten Erkenntnisse in einer Tabelle mit klar definierten und gut erkennbaren Fahrbahnsituationen und Winterdienstempfehlungen kondensiert. Fahrempfehlungen für den Straßennutzer zu diesen typischen Fahrbahnsituationen runden das Ergebnis der Arbeit ab und bilden die Basis für eine Umsetzung der Erkenntnisse auch auf Seiten der Verkehrsteilnehmer.

## 0.2 Summary

### Prewetted salt, spreading, grip, costs, optimization

This master's thesis deals with winter maintenance on high-level roads and the optimization of spreading by different strategies and additional spreading agents. As major indicator for the assessment of winter maintenance skid resistance is investigated, which is the decisive criterion for driving safety. In order to achieve driving safety strategies for typical weather and traffic conditions were developed and their effects analysed. The central challenge was to find answers to following question: „ When is salting necessary and if, what kind of salt and how much of it is needed and what are the costs for the road operator? “

Based on the state of the art and practice of winter maintenance the existing approaches were compiled into a holistic model which allow an assessment of the optimization potential of winter maintenance technologies. While the scientific research focuses mainly on the investigation of individual parameters, the main problem is the lacking knowledge of the precise amount of the needed salt resulting in quite different amounts of spreading in similar situations. Instead of a consistent model that reflects the real situation on the street and derives practical recommendations, the complex situation is encountered with attempts using standardized weather scenarios & spreading quantities.

Based on the significant impact of the influencing factors rainfall, traffic volume and road texture and road surface temperature over day time, a model approach has been formulated to predict the (theoretical) freezing temperature of the liquid film on the road and the actual road surface temperature. Depending on road surface texture and thickness of the liquid film a strong drop in the level of skid resistance when the freezing point of liquid film on the road is lower than the actual road surface temperature.

To determine the influence of various parameters an extensive program of laboratory and field tests, in cooperation with the road authorities of the regions, the Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology and the Austrian freeway operation company were performed. Based on these experiments a database for a first quantification of the influencing factors was developed. In coordination with existing investigations, a first version of a winter model was created, including the possibility of forecast calculations for different typical weather scenarios. Because of the existing variations on the input parameters the definition of recognisable weather scenarios and matching spreading scenarios is an essential step towards the practical feasibility of the calculated results.

While developing the objectives and the compilation of the results, special attention was paid to the requirements of the spreading practice from a strategic point of view, the view of winter maintenance planning and operational implementation of the salting recommendations. To facilitate the implementation of the salting recommendations in the vehicles the most important findings were condensed into a table with clearly defined and easily recognizable situations and winter road maintenance recommendations. Road Driver's recommendations using these typical road situations, complete the result of this master's thesis and form the basis for implementation of the findings to public guidelines.

### 0.3 Vorwort

Ich möchte mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab und besonders bei Herrn Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Hoffmann für die Möglichkeit, diese Diplomarbeit am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßen- und Flugbetriebsflächenbau durchführen zu können und die intensive Betreuung während der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Besonders sei an dieser Stelle auch Herrn Dipl.-Ing. Josef Neuhold und Herrn Dipl.-Ing. HR Rudolf Schacherl, Projektverantwortliche des Forschungsprojektes „Optimierung der Feuchtsalzstreuung“ der Länder, der ASFINAG und des BMVIT sowie Herrn Dipl.-Ing. Gilbert Hinterberger, Projektleiter des Forschungsprojektes „Safecote und Griffigkeit“ der ASFINAG gedankt, die mit ihrer fachlichen und finanziellen Unterstützung wesentlich zum Gelingen des Projektes beigetragen haben.

Danken möchte ich auch der Mannschaft der Autobahnmeisterei Golling, insbesondere Herrn Alfred Evers und Herrn Josef Wintersteller deren Engagement für die Messreihen unersetzlich war. Ihre umfangreichen Erfahrungen haben uns dabei geholfen die praktischen Anforderungen des Winterdienstes in das Modell zu integrieren.

Besonderer Dank gilt auch meiner Familie, die mir das Studium ermöglichte und während meiner Studienzeit in jeder Hinsicht hinter mir stand. Meinen Freunden und Kommilitonen danke ich für die Unterstützung während des Lernens und auch die schöne Zeit dazwischen.

Peter Nutz

# Inhaltsverzeichnis

0.1	Kurzfassung . . . . .	1
0.2	Summary . . . . .	2
0.3	Vorwort . . . . .	3
<b>1</b>	<b>Forschungsfragen und Zielsetzung</b>	<b>7</b>
1.1	Zielsetzungen nach Beteiligten . . . . .	8
1.2	Zielsetzungen nach Ebenen beim Straßenbetreiber . . . . .	10
1.2.1	Oberes Management . . . . .	10
1.2.2	Mittleres Management . . . . .	10
1.2.3	Operative Ebene . . . . .	10
1.3	Stand der Praxis in Österreich . . . . .	11
1.4	Stand der Forschung . . . . .	15
1.5	Methodische Herangehensweise . . . . .	20
<b>2</b>	<b>Grundlagen Winterdienst</b>	<b>23</b>
2.1	Griffigkeit . . . . .	23
2.2	Streumittel . . . . .	27
2.3	Feuchtsalzstreuung . . . . .	29
2.3.1	Streusalze . . . . .	31
2.3.2	Eutektische Diagramme . . . . .	35
2.3.3	Zusammenhang Streumenge – Niederschlag – Gefrierpunkt . . . . .	37
2.3.4	Zusatzmittel . . . . .	39
2.3.5	Effektiver Taumittelanteil verschiedener Streugutzusammensetzungen . . . . .	41
2.3.6	Streutechnologie . . . . .	42
2.4	Skizze Winterdienstmodell . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Feldmessungen</b>	<b>45</b>
3.1	Messgeräte . . . . .	46
3.1.1	Griptester . . . . .	46

3.1.2	Vaisala Kameras . . . . .	47
3.1.3	Infrarotkamera . . . . .	48
3.1.4	Restsalzmessgerät . . . . .	49
3.2	Messstrecke . . . . .	50
3.2.1	Versuche auf der Autobahn . . . . .	50
3.2.2	Versuche auf einem abgesperrten Parkplatz . . . . .	52
3.3	Mitwirkende Autobahnmeisterei . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Messergebnisse</b>	<b>54</b>
4.1	Parkplatzversuche . . . . .	54
4.2	Auswirkungen des Niederschlages auf die Griffigkeit . . . . .	56
4.2.1	Szenario: Salznasse Fahrbahn (13.01.2010) . . . . .	57
4.2.2	Übergangszone Schneeregen, beginnender Griffigkeitsrückgang . . . . .	59
4.2.3	Gefahrenzone länger anhaltender Schneefall, glatte Fahrbahn . . . . .	61
4.3	Zusammenhang Griffigkeit - Streumittel . . . . .	63
4.4	Vergleich der Griffigkeiten Griptester - Vaisala . . . . .	64
4.5	Bestimmung der Restsalzabnahme auf der Fahrbahn . . . . .	65
4.6	Messreihen zur Bestimmung der Fahrbahntemperatur auf der Fahrbahn . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Modellbildung</b>	<b>69</b>
5.1	Modellaufbau . . . . .	69
5.2	Einflussgrößen . . . . .	72
5.2.1	Niederschlagsmenge . . . . .	72
5.2.2	Wind . . . . .	72
5.2.3	Verkehr . . . . .	72
5.2.4	Zeit . . . . .	73
5.2.5	Luft- und Fahrbahntemperatur . . . . .	73
5.3	Modellparameter Wasserfilmdicke . . . . .	74
5.3.1	Niederschlagsmenge . . . . .	74
5.3.2	Reifbildung . . . . .	74
5.3.3	Abminderung durch Verkehr und Verdunstung . . . . .	76
5.4	Modellparameter Restsalzmenge . . . . .	77
5.5	Gefrierpunktberechnung . . . . .	77
5.6	Einfluss der Fahrbahntextur . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der Szenarienrechnungen mit dem Modell</b>	<b>80</b>

6.1	Wetterszenarien . . . . .	80
6.2	Fahrbahnsituationen . . . . .	82
6.2.1	Trockene Fahrbahn . . . . .	83
6.2.2	Nasse Fahrbahn . . . . .	84
6.2.3	Schnee in der Rollspur . . . . .	85
6.2.4	Schnee neben der Rollspur . . . . .	86
6.2.5	Eis in der Rollspur . . . . .	86
6.3	Längere Streuintervalle durch verbesserte Streumittel . . . . .	86
6.4	Geringerer Salzverbrauch durch variable Streumenge . . . . .	87
6.5	Geringerer Salzverbrauch durch Vermeidung ineffizienter Streuvorgänge . . . . .	87
6.5.1	Zeitnahes Streuen . . . . .	87
6.5.2	Keine Maximalmengen bei starkem Schneefall ausbringen . . . . .	87
6.5.3	Reduktion der Streufahrten an trockenen Wintertagen . . . . .	88
6.6	Wirtschaftlichkeit & Überlegungen zu den Streufahrten . . . . .	90
6.6.1	Kosten pro Kilogramm Streugut . . . . .	90
6.6.2	Kosten pro Streufahrt . . . . .	92
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>94</b>
7.1	Erkenntnisse zu Einflussparametern und Modellansätze . . . . .	94
7.2	Streuszenarien und Modellergebnisse . . . . .	94
7.3	Streuempfehlungen für den Straßenbetreiber . . . . .	97
7.3.1	Oberes Management . . . . .	97
7.3.2	Mittleres Management . . . . .	97
7.3.3	Operative Ebene . . . . .	98
7.4	Fahrempfehlungen für den Straßennutzer . . . . .	102
7.5	Ausblick auf weitere Schritte . . . . .	104
<b>A</b>	<b>Tabelle aller Messfahrten im Winter 2009/10</b>	<b>112</b>
<b>B</b>	<b>Vergleich Vaisala VS Griptester</b>	<b>126</b>
<b>C</b>	<b>Temperaturdiagramme der Wintermonate 2009</b>	<b>127</b>

# Kapitel 1

## Forschungsfragen und Zielsetzung

Die vorliegende Diplomarbeit „Feuchtsalzstreuung, Safecote und Griffigkeit von Straßen“ ist im Rahmen zweier Projekte am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßen- und Flugbetriebsflächenbau entstanden und beinhaltet Grundlegendes sowie Analysen und Optimierungspotentiale zum Winterdienst. Die erwähnten Projekte sind:

- *Forschungsprojekt Safecote & Griffigkeit*

Dieses Forschungsprojekt wurde von der ASFINAG initialisiert und finanziert und läuft von Anfang 2010 bis etwa Mitte 2010. Das Projektziel besteht in der Feststellung der Wirksamkeit der Feuchtsalzstreuung bei Verwendung von Safecote als Zusatzmittel. Zusätzlich geht es um die Erfassung der bestehenden Winterdienststrategie sowie eine wirtschaftliche Optimierung insbesondere der Streueinsätze mit speziellem Augenmerk auf das erhöhte Anforderungsniveau auf Straßen A+S.

- *Forschungsprojekt zur Optimierung der Feuchtsalzstreuung*

Dieses Forschungsprojekt wird von den Ländern, der ASFINAG, und dem BMVIT getragen, startete ebenfalls Anfang 2010, wird aber noch über die Wintersaison 2010/11 (Feldmessungen) und darüber hinaus (Auswertung) andauern. Das Projektziel besteht in der wissenschaftlichen Untersuchung bzw. Optimierung der Feuchtsalzstreuung in Abhängigkeit von Verkehr, Witterung und Streumenge bzw. der durch Salzstreuung erzielbaren Griffigkeit.

Da beide Projekte thematisch eng miteinander verbunden sind, waren viele Schritte der Einarbeitung und der Modellbildung beiden Projekten dienlich. Zudem sind die wissenschaftlichen Grundlagen des Winterdienstes bei beiden Projekten ähnlich, auch wenn die Zielsetzung der Projekte eine andere ist. Der Zwischenstand der Projekte erlaubt es ein erstes Gesamtmodell im Rahmen der Diplomarbeit zu präsentieren. Es ist zu erwarten, dass diese Modelle im Laufe der Projekte noch verfeinert werden. Die Zielsetzungen der Projekte sind sehr vielseitig, aber die grundsätzliche Frage, die sich bei der Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten des Winterdienstes stellt, lässt sich wie folgt zusammenfassen:

*Wann muss gestreut werden, und welche Streumittel und Streumengen sind erforderlich und welche Kosten ergeben sich daraus für den Netzbetreiber?*

Die Ziele des Winterdienstes unterscheiden sich nach den beteiligten Gruppen, wobei die vorher erwähnten Forschungsprojekte und damit die Diplomarbeit in erster Linie eine Optimierung des Winterdienstes aus Sicht des Straßenerhalters zum Ziel haben.

## 1.1 Zielsetzungen nach Beteiligten

Die Durchführung des Winterdienstes erfolgt grundsätzlich durch den Straßenbetreiber oder ein von ihm beauftragtes Unternehmen. Der Betreiber ist jedoch nicht der einzige Beteiligte bzw. Betroffene des Winterdienstes die zum Teil gemeinsame aber auch unterschiedliche Interessen haben. Die Überschneidungen und Zielsetzungen der einzelnen Gruppen sind in Abbildung 1.1 dargestellt.

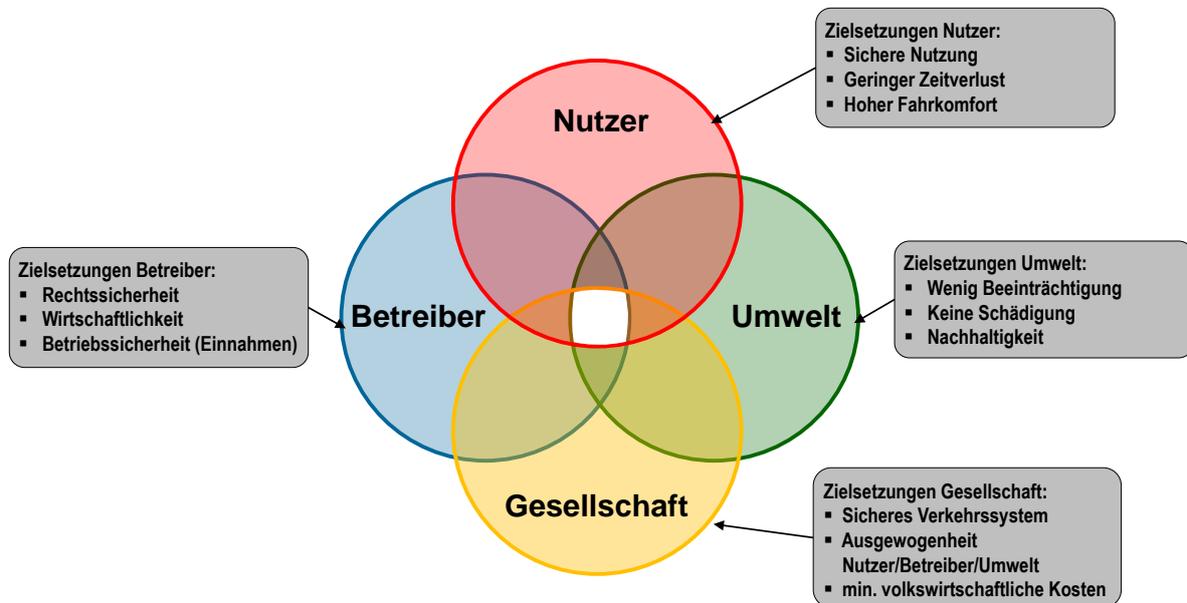


Abbildung 1.1: Vom Winterdienst betroffene Gruppen und deren Interessen

### **Betreiber:**

#### **Rechtssicherheit**

Der Betreiber wünscht sich eine rechtliche Grundlage (etwa eine Norm), die den Betreiber vor Schadenersatzzahlungen schützt.

#### **Wirtschaftlichkeit**

Da die Kosten für die eingesetzten Mittel (Streumittel, Personal etc.) in vollem Ausmaß vom Betreiber zu übernehmen sind, ist dieser an einem sparsamen und damit wirtschaftlichen Mitteleinsatz interessiert.

#### **Betriebssicherheit (Einnahmen)**

Verlangt der Betreiber von den Benutzern seiner Straßen Maut, wie etwa die ASFINAG, ist er an einer konstanten, guten Befahrbarkeit seiner Straßen und damit konstanten Einnahmen interessiert. Wird die Befahrbarkeit nicht durch einen guten Winterdienst sichergestellt, weicht der Benutzer auf mautfreie Strecken aus, da der Vorteil der Zeiteinsparung durch die Benutzung des Autobahnnetzes verloren geht.

### **Nutzer:**

#### **Sichere Nutzung**

Der Nutzer erwartet, dass er eine Straße bei angepasster Fahrgeschwindigkeit ohne die Gefahr eines durch den Fahrbahnzustand

<b>Geringer Zeitverlust</b>	bedingten plötzlichen Kontrollverlustes über sein Fahrzeug befahren kann. Kennt der Nutzer die Zeit, die er im Normalfall für die Überwindung einer bestimmten Strecke benötigt, nimmt er bei schlechter Witterung einen Zeitverlust auf Dauer nicht in Kauf.
<b>Hoher Fahrkomfort</b>	Der Nutzer ist einen hohen Fahrkomfort gewohnt und erwartet diesen selbst bei schlechten Witterungsverhältnissen. Dies bedeutet auch, dass er, insbesondere wenn er Maut entrichtet hat, nicht bereit ist, bei starkem Schneefall sein KFZ zu verlassen, um etwa Schneeketten anzulegen.

### ***Umwelt:***

<b>Wenig Beeinträchtigung</b>	Die Beeinträchtigungen der Umwelt durch den Winterdienst bzw. die eingesetzten Streumittel sind so gering wie möglich zu halten, um ein natürliches Ökosystem zu erhalten.
<b>Keine Schädigung</b>	Wesentlich Beeinträchtigungen und Schädigungen der Umwelt wie etwa Absterben der Pflanzen in Straßennähe oder Sterben der Fischpopulation in Gewässern durch den Winterdienst sind in jedem Fall zu vermeiden.
<b>Nachhaltigkeit</b>	Ein nachhaltiger Winterdienst zu keinen Beeinträchtigungen oder Kummulierung, die nicht innerhalb eines Jahres von der Natur wieder ausgeglichen werden können.

### ***Gesellschaft:***

<b>Sicheres Verkehrssystem</b>	Für die Gesellschaft ist ein Verkehrssystem wichtig, in dem die durch Unfälle entstehenden volkswirtschaftlichen Kosten so gering wie möglich bleiben.
<b>Ausgewogenheit</b>	Da in der Gesellschaft keine einheitliche Wertmaßstab bezüglich Umwelt und Verkehr besteht, ist auf die Ausgewogenheit bei der Erfüllung der Bedürfnisse von Betreiber, Nutzer, Umwelt und die Gesamtheit der Bevölkerung zu achten.
<b>min. volkswirtschaftliche Kosten</b>	Da die meisten Straßenbetreiber mit öffentlichen Geldern finanziert werden, ist es für die Gesellschaft wichtig, dass mit ihrem Geld sorgsam umgegangen wird und aus minimalen Kosten ein maximaler Nutzen erzeugt wird. Dies kann im Gegensatz zu den Zielsetzungen der Betreiber auch Einsparungen durch Zusammenlegung einzelner Straßenbetreiber bedeuten, um Synergien zu nutzen.

Die Optimierung des Winterdienstes kann also nicht auf eine alleinige Optimierung der Betreiberseite abzielen. Vielmehr muss eine Optimierung an der Schnittstelle aller betroffenen Gruppen erfolgen. Für alle Gruppen ist eine Reduktion des ausgebrachten Streumittels zielführend, wenn gleichzeitig die Verkehrssicherheit nicht sinkt. Die Verkehrssicherheit ist jedoch nicht ausschließlich Sache des Betreibers, sondern hängt zum Großteil von dem Verhalten des Straßenbenutzers ab. Das Motto für einen optimierten Winterdienst lautet also:

*Gezielt und sparsam streuen – verantwortungsvoll und sicher fahren!*

## 1.2 Zielsetzungen nach Ebenen beim Straßenbetreiber

Da die vorliegende Diplomarbeit im Rahmen von zwei Forschungsprojekten im Auftrag von Straßenbetreibern durchgeführt wurde und diese für die Umsetzung der Ergebnisse verantwortlich sind, waren die Anforderungen aus Sicht dieser Betreiber vorrangig. Wie jedes Unternehmen sind auch die mit dem Winterdienst betrauten Körperschaften in verschiedene Ebenen geteilt, deren Ziele der Rechtssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit generell dieselben sind. Die unterschiedlichen Anforderungen dieser Ebenen werden im folgenden erläutert.

### 1.2.1 Oberes Management

Diese oberste Ebene der Entscheidungs pyramid besteht meist aus wenigen Personen, die vor allem Vorgaben und Entscheidungen strategischer Natur trifft. Bei den Straßenbetreibern betrifft dies grundsätzliche Fragen der Fahrzeugflotte, die Budgetaufteilung und die Betriebsorganisation. Das obere Management trifft die Entscheidungen über die Rahmenbedingungen für den Winterdienst. Fragestellungen dieser Ebene sind:

- Welches Budget, wieviel Personal und welche Betriebsmittel werden für Winterdienst benötigt?
- Welche Betriebskennzahlen und Benchmarks stehen zur Verfügung, um die Effizienz des Winterdienstes zu beurteilen?

### 1.2.2 Mittleres Management

Die Einsatzleitung ist für die Vergabe und Einteilung verschiedener konkreter Arbeitsschritte zuständig und somit an einer Planbarkeit für den Personaleinsatz interessiert. In dieser Ebene können Computerprogramme eingesetzt werden, welche die Einteilung der Streufahrten unterstützen. Von dieser Ebene müssen die Randbedingungen für einen optimierten Streueinsatz an die Mannschaft weitergegeben werden. Fragestellungen dieser Ebene sind:

- Wie müssen die Routen für den Winterdienst organisiert werden um ein Optimum aus vorhandenem Gerät und Personal zu holen?
- Welche Winterdienstgeräte sind für das betreute Netz und die Winterszenarien optimal?
- Welche Streumittel sind für welche Situation optimal, und wo liegt die Bandbreite einer optimalen Streumenge?
- Welche Informationen und Schulungen brauchen die operativen Kräfte, um den Winterdienst eigenverantwortlich durchführen zu können?

### 1.2.3 Operative Ebene

Auf der operativen Ebene geht es um die eigenverantwortliche, an die örtlichen Verhältnisse angepasste Umsetzung der Streuvorgaben, mit besonderem Augenmerk auf der raschen Einschätzung der Situation und einer entsprechenden Anpassung des Streuvorganges. Fragestellungen dieser Ebene sind:

- Wie kann die aktuelle Fahrbahnsituation augenscheinlich sofort einer vordefinierten Kategorie zugeordnet und damit die zu erwartende Situation eingeschätzt werden?
- Welche Streumenge, und -intervalle sind für diese Kategorie optimal?

## 1.3 Stand der Praxis in Österreich

Hier wird der aktuelle Stand der Streustrategien, also insbesondere die Methoden zur Festlegung der Streuintervalle, Streumengen etc. in Österreich beschrieben. Die Aufgabe des Winterdienstes besteht darin, die Befahrbarkeit der öffentlichen Straßen auch im Winter, also bei Schneefall und Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, zu gewährleisten sowie bei winterlichen Straßenverhältnissen die Verkehrssicherheit so weit wie möglich zu erhöhen. Das lässt sich im Wesentlichen durch zwei Maßnahmen erreichen:

- Dem Beseitigen des auf der Fahrbahn liegenden Schnees, also dem *Räumen*
- Dem 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 zwei<sup>1</sup> 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.

Generell hat der Fahrer die Möglichkeit während der Fahrt zwischen Trockensalz- und Feuchtsalzstreuerung zu wechseln, sowie die ausgebrachte Streumittelmenge in  $\text{g/m}^2$  einzustellen. Er ist schlussendlich die letzte Entscheidungsebene und hat damit eine gewisse Verantwortung. Der Straßenmeister gibt oft eine aus Streutabellen abgelesene fixe Streumengen vor, die lokal z. B. auf Brücken angepasst werden muss. Prinzipiell lassen sich zwei Arten der Streufahrten unterscheiden:

**Anlassstreuerung** Dies 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 so lange durchgeführt, bis das Niederschlagsereignis endet und der Schnee entfernt ist.

**Präventivstreuerung** Hier wird vor einem Niederschlagsereignis eine geringe Menge an Taumittel auf der Fahrbahn aufgebracht, um ein Anfrieren 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 Präventivstreuerung der Verhinderung von Reifglättebildung, die auch ohne atmosphärischen Niederschlag stattfindet.

In Österreich wird der Winterdienst, mit Ausnahme einiger kleiner privater Straßen- bzw. Winterdienstbetreiber, von drei Körperschaften durchgeführt.

<sup>1</sup>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 unwirtschaftlich. Diese Art der Räumung ist jedoch der Bevölkerung bekannt, welche das Fahrverhalten dementsprechend anpasst.

<b>ASFINAG</b>	betreut die Autobahnen und Schnellstraßen sowie deren Netzanschlüsse
<b>Länder</b>	betreuen alle Landesstraßen B sowie einige wichtige Landesstraßen L
<b>Gemeinden</b>	betreuen untergeordnete Landes- und alle Gemeindestraßen

In der Praxis wird vom Straßenmeister ein Dienstplan erstellt, der Mitarbeiter zu Bereitschaft (in der Straßenmeisterei) und zu Rufbereitschaft (zu Hause) einteilt. Die zu Bereitschaft eingeteilten Mitarbeiter informieren sich über Wetterdienste, Kameras oder durch Kontrollfahrten über den aktuellen Fahrbahnzustand und fahren bei Bedarf Streu-, Räum- bzw. Streu- und Räumfahrten. Wichtig ist, dass genügend Mitarbeiter und Fahrzeuge zur Verfügung stehen, falls starker Schneefall eintritt und mehr Personal für eine intensivere Streckenbetreuung notwendig ist. Zu viele Mitarbeiter auf Bereitschaft wiederum bedeuten aber auch enorme Kosten, die sich vermeiden ließen, wenn der tatsächliche Bedarf genauer bekannt wäre. Eine guten Wetterprognose und ausreichende 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.

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 Niederschlag kann auf den Verkehr keine Rücksicht genommen werden, da Streuintervalle einzuhalten sind und der Schnee von der Fahrbahn entfernt werden muss.

Das Anforderungsniveau ist österreichweit einheitlich geregelt und abhängig von Wettersituation sowie Straßenkategorie in Tabellen gefasst. Die unterschiedlichen Anforderungsniveaus ergeben und aus der Bedeutung einer Straße sowie dem jährliche durchschnittlichen täglichen Verkehr (JDTV) einer Straße, welche in folgenden, aus [Winterdienst, 2010] entnommenen Listen festgelegt sind. Für Freilandstraßen und Stadtstraßen existieren jeweils eigene Straßenkategorien und Betreuungslisten.

#### **Freilandstraßen, Winterdienstkategorien A bis D:**

**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

#### **Urbaner Bereich, Winterdienstkategorien P1 bis P6:**

**Kategorie P1:** Innerstädtische Hauptverkehrsstraßen, Einfahrtstraßen, Straßen mit Linien / Straßenbahnverkehr, Zufahrten zu öffentlichen Krankenhäusern und Feuerwachen

**Kategorie P2:** Straßen mit untergeordneter Verkehrsbedeutung, Zubringerstraßen in Siedlungs- und Gewerbegebieten, Bergstraßen

**Kategorie P3:** Getrennt geführte Radwege als Verbindung von Ortsteilen bzw. mit Bedeutung für den Berufsverkehr / Schulverkehr

**Kategorie P4:** Getrennt geführte Radwege als Verbindung mit einer örtlichen Erschließungsfunktion bzw. Freizeitverkehr

**Kategorie P5:** Ausgewiesene Gehwege, Fußgängerzonen, Einkaufstraßen, Schulwege, Wege im Bereich von Krankenhäusern u.ä. Einrichtungen, Haltestellen von Öffis, soweit diese im Aufgabenbereich der Kommunen liegen

**Kategorie P6:** Parkplätze, Abstellflächen, Parkwege, sonstige Verkehrsflächen

Die Winterdienstbetreuungsintensitäten für die Kategorien A - D sind gemäß [Skerlan, 2001] in Tabelle 1.1 dargestellt. Für die neu hinzugekommenen innerstädtischen Kategorien P1-P6 ist eine durchgängige Betreuung in [Neuhold, 2009] zusammengestellt worden, die in Tabelle 1.2 ersichtlich ist.

<b>Kategorie</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>Betreuungsintervalle</b>	max. 3 Stunden	3–5 Stunden	3–5 Stunden	>5h
<b>Wettersituation 1</b> leichter Schneefall, Reif, leichte Schneeverwehungen	Straßenzustand Befahrbarkeit aller Fahrspuren, Ausfahrten und Zubringerstraßen; Räumfahrten von 00:00 bis 24:00; Streuen von auftauenden Streumitteln; Schneehöhen von 5 cm–10 cm können zwischen den Räumfahrten auftreten	Straßenzustand Befahrbarkeit; Räumfahrten von 04:00 bis 22:00; Streuen von vorwiegend auftauenden Streumitteln; Schneehöhen > 10 cm können zwischen den Räumfahrten auftreten; Behinderungen zwischen 22:00 und 06:00 möglich	Straßenzustand Räumfahrten von 05:00 bis 20:00; Streuen von vorwiegend auftauenden Streumitteln oder Splitt; Schneehöhen > 10 cm können zwischen den Räumfahrten auftreten; Behinderungen zwischen 20:00 und 07:00 möglich	Straßenzustand Befahrbarkeit; Räumfahrten einmal täglich; Streuen von Splitt; Behinderungen möglich
<b>Wettersituation 2</b> anhaltender Schneefall, Schneeverwehungen, Schneehöhen > 10 cm	Straßenzustand Befahrbarkeit mindestens einer Fahrspur je Richtung, Ausfahrten und Zubringerstraßen; Räumfahrten von 00:00 bis 24:00; Streuen von auftauenden Streumitteln; Befahrbarkeit von Parkplätzen nicht gesichert; Fahrbahn kann Schneebedeckt sein; Verwendung von Schneeketten bei Bedarf	Straßenzustand Befahrbarkeit mindestens einer Fahrspur je Richtung; Streuen von vorwiegend auftauenden Streumitteln; Beeinträchtigungen bei Schneehöhen > 10 cm; Verwendung von Schneeketten bei Bedarf	Straßenzustand	Straßenzustand Befahrbarkeit mindestens einer Fahrspur je Richtung; Räumfahrten zweimal täglich (>10cm) Streuen von Splitt; Verwendung von Schneeketten bei Bedarf
<b>Wettersituation 3</b> gefrierender Regen; starke Schneeschauer; Lawinen und Katastrophen	Straßenzustand Befahrbarkeit kann nicht garantiert werden; Sperre von Straßen während der Beseitigung großer Schneemengen (Lawinen) möglich	Straßenzustand	Straßenzustand	Straßenzustand

Tabelle 1.1: Betreuungen nach Winderdienstkategorien Bundesstraßen [Skerlan, 2001]

	Winterdienst- kategorie P1	Winterdienst- kategorie P2	Winterdienst- kategorie P3	Winterdienst- kategorie P4	Winterdienst- kategorie P5	Winterdienst- kategorie P6
<b>Leichte Schneefälle, auch in Verbindung mit Glätte durch Temperaturwechsel, Reifglätte, leichte Verwehungen</b>	Befahrbarkeit mit Winterdienstausrüstung gewährleistet, mit Behinderungen gerechnet werden.	Befahrbarkeit mit Winterausrüstung innerhalb der vorgegebenen Zeiten gewährleistet. Außerhalb der Betreuungszeiten Behinderungen möglich.	Befahrbarkeit mit geeigneten Fahrern innerhalb der vorgegebenen Zeiten gewährleistet. Außerhalb der Betreuungszeiten Behinderungen möglich.	Befahrbarkeit nicht immer gewährleistet.	Begehrbarkeit mit geeignetem Schuhwerk innerhalb der vorgegebenen Zeiten gewährleistet.	Betreuung nur nach Maßgabe der Kapazitäten, Behinderungen sind wahrscheinlich. Nicht betreute Wege sind physisch zu sperren.
<b>Betreuungsart</b>	Schwarzräumung und Streuung	Schwarzräumung und Marginalstreuung punktuelle Streuung	Räumung und Streuung			Räumung nach dem Einsatz
<b>Winterdienstbetreuungszeitraum</b>	4 bis 22 Uhr	5 bis 22 Uhr	6 bis 19 Uhr	6 bis 19 Uhr	6 bis 22 Uhr analog § 93 StVO	keine Angaben
<b>Maximale Schneehöhen</b>	10 cm	10 cm, in der Nacht darüber				Behinderungen jederzeit möglich
<b>Umlaufzeit eines Winterdienstesatzes</b>	max. 5 Stunden	max. 12 Stunden		nach Bedarf	gem. § 93 StVO oder Weegerhalter § 1319a ABGB	Keine
<b>Verwendete Streumittel</b>	Auftauende vorzugsweise Feuchtsalz	Auftauende vorzugsweise Feuchtsalz gegebenfalls gemischt		Auftauend oder abstumpfend		
<b>Zustand der Betreuungsfläche nach Einsatzen</b>	Feuchte oder trockene Fahrbahn, fallweise Beeinträchtigungen nicht auszuschließen	Feuchte oder trockene Fahrbahn, Vereisungsreste und Spurrinnen nicht auszuschließen	Trockene Fahrbahn, Vereisungsreste und Spurrinnen nicht auszuschließen, Rollsplitt möglich	Befahrbar. Mit Schnee- und Vereisungsresten bzw. Spurrinnen ist zu rechnen. Rollsplitt ist möglich	Trocken, Vereisungsreste und Unebenheiten nicht auszuschließen	Nach Maßgabe der Möglichkeiten. Nutzungseinschränkungen durch Schneelagerungen möglich

Tabelle 1.2: Betreuungen nach Winterdienstkategorien Innerstädtisch *Quelle: [Neuhold, 2009]*



weise 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 (vorgeschriebene Mindestintervalle in Österreich auf A+S-Straßen sind 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 auch viele der verwendeten Prognosen ohnehin schon in der Praxis verwendet wurden.

Die von der Software vorgeschlagenen Winterdienststeinsätze werden in einem eigenen Modul behandelt, das in Abbildung 1.4 skizziert ist. Wie im vorherigen Absatz beschrieben führt das Durchlaufen einer Schleife in manchen Fällen zu einem Überfluss an Meldungen, dem durch einen geeigneten Filter entgegenzuwirken wäre.

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 zwischen 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 Trockene Fahrbahn (1,0) über 4-6 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 6.0 ist im Herbst 2009 veröffentlicht worden 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 1.5 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.

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

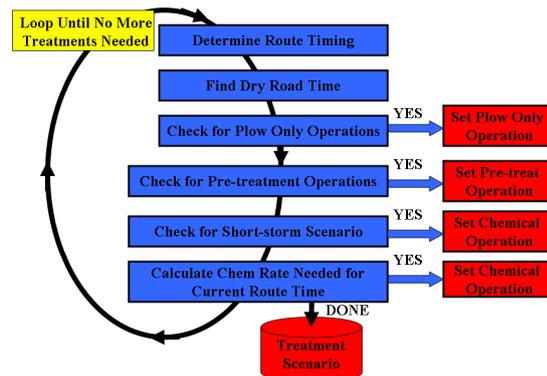


Abbildung 1.4: Darstellung der Funktion des Treatmentmoduls *Quelle: NCAR*

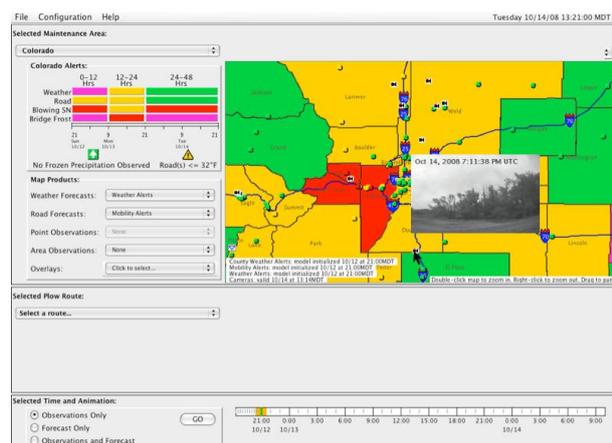


Abbildung 1.5: Screenshot der MDSS Anwendung *Quelle: NCAR*

den Berechnungsalgorithmen liegen im Handbuch Flussdiagramme vor, die jedoch leider keine genauen Berechnungsschritte enthalten. Obwohl alle Eingabegrößen berücksichtigt wurden, gibt es im Handbuch keine Informationen, um Aussagen über die Qualität des Modelles treffen zu können. Es sind jedoch noch Anpassungen an Mikroklima und Streuempfehlungen, insbesondere in Hinblick auf die Warnungen und Vorschläge im Praxiseinsatz, durchzuführen.

Unabhängig von den Modellen, die in der MDSS-Software verwendet werden, sind die im gegenständlichen Projekt am Institut für Verkehrswissenschaften, Fachbereich Straßenwesen Modellüberlegungen entstanden, die auf dieselben Indikatoren zurückgreifen, um die Mechanismen des Winterdienstes abzubilden. Zusätzlich wurde jedoch die Griffigkeit als Qualitätsmerkmal des Winterdienstes eingeführt und von Beginn an auf eine einfache und rasche Umsetzung der Empfehlungen in der Praxis wert gelegt.

## **Europäische Forschung**

In Europa gab es eine drei Jahre dauernde Untersuchung zum Thema Winterdienst bis 2002 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* die Ergebnisse veröffentlicht wurden. Dabei wurde die übliche Winterdienstpraxis der 18 teilnehmenden Länder analysierten, 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.

Da einzelne Länder aber in Teilbereichen weiter fortgeschrittene Ansätze haben, erscheint eine Steigerung der Gesamteffizienz des Winterdienste europaweit betrachtet, z. B. durch Kooperation, möglich.

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 trockenen Regionen (kontinentales Klima) die Feuchtsalzstreuung dominiert.

In Tabelle 1.3 sind Winterdienstbeschreibungen für einige ausgewählte Länder dargestellt. Diese Angaben sind Stand 2002 und somit leider nicht mehr auf dem aktuellsten Stand (so gibt es mittlerweile eine Winterreifenpflicht für KFZ in Österreich während der Wintermonate). Deutschland wurde gewählt, da es geografisch nahe ist und viele deutsche Normen von Österreich übernommen wurden, was zu einer guten Vergleichbarkeit führt. Norwegen und Spanien wurden aufgrund ihrer extem nördlichen bzw. südlichen Lage gewählt. So ist in Norwegen etwa aufgrund der strengen Winter die Infrastruktur und auch die Beschaffenheit der Fahrzeuge so, dass Schneefahrbahnen zu keinen größeren Problemen führen, während Spanien zwar Gesetze hat, diese aber aufgrund der geringen Schneefälle im Winter lange nicht so ausgeift sind.

Country	General legal obligation	other regulations or codes of practice	Service categories depending on	service categories	service times	winter period	Equipment of traffic
<b>(A) Austria</b>	yes, legal obligation defined in the traffic regulations		Road type; traffic volume; weather situation	classification A..D A: Motorways and federal highways in direct connection to motorways B: Highways > 3000 ADT C: Highways 1000..3000 ADT or buses or tourism D: other highways 3 weather situations	A: 0..24 h B: 4..20 h C: 5..20 h D: once daily A : max 3h B, C: max 5h	11-01..03-31 in the alpine region the time interval for winter maintenance activities can be expanded	There is no obligation to use winter tyres, Studded tyres are allowed between 15.11. - the Monday after Easter Monday
<b>(D) Germany</b>	no (only for dangerous situations)	national; states	Importance of roads	traffic ability	motorways: 0..24h important roads: 6..22h other roads: 8..20h	different depending on climatic situation in specific	
<b>(N) Norway</b>	yes (>standards)	by road owner	Traffic volume and Type of road (national road, county road, municipal road)	The Road should be passable for vehicles that are normally equipped for winter driving; max. snow heights; min. friction for de-icing >1500ADT: black roads rest: winter roads: no salt (often white during winter) some: closed in winter	before 6:00h	standby 10-15..04-15	studded tires with special tax in a few towns when amount of studded tires is > 20%
<b>(E) Spain</b>	yes			1: permanent transit on roads 2: some traffic disruption due to snow and ice 3: Definition of worst cases (applicable only some days per some years) Service time 2..3 h			

Tabelle 1.3: Vergleich der Betreuungsintensitäten ausgewählter Länder, *Quelle: COST 344*

## Deutschland

Über den richtigen Anfeuchtungsgrad von Feuchtsalz wurden von der BAST Untersuchungen angestellt, die sich einerseits auf die Tauleistung sowie andererseits auf das Streubild konzentrierten [Badelt, 2007].

Die Tauleistung ist dabei mit dem Inzeller Eisplattenversuch beurteilt worden, 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 FS20 ein Abnehmen der Verluste durch Verwehung, bis bei FS30 keine sichtbaren Verluste mehr auftreten (Die Bedeutung von FS30 wird in Kapitel 2.3 erläutert). Weiters wird darauf hingewiesen, dass eine FS30-Streuung, im Gegensatz zur reinen Trockensalzstreuung, einen erhöhten Wartungs- und Kallibrierungsbedarf an den Geräten bedeutet.

Eine Untersuchung zum Thema „Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn“ ist im Rahmen der Schriftenreihe „Verkehrstechnik“ der BAST erschienen [Hausmann, 2009], 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.



Abbildung 1.6: Saug-Spülgerät *Quelle: [Hausmann, 2010]*

Im Winter 2009/10 wurden Versuche mit einem Sprüh-Sauggerät (Abbildung 1.6) durchgeführt, wobei hier der Einsatz von Safecote als Zusatzmittel (siehe auch Kapitel 2.3.4) 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, der sich mit zunehmender Zeit deutlich verlangsamt.

Die in Deutschland angestellten Untersuchungen liefern gute Erkenntnisse über einzelne Faktoren, eine Verknüpfung dieser Faktoren ist nach derzeitigem Stand der Recherche aber noch nicht passiert.

## 1.5 Methodische Herangehensweise

Die Vorgehensweise zur Lösung der Fragestellungen lässt sich in mehrere Schritte gliedern, die in einem zyklischen Arbeitsprozess immer wieder überprüft und verbessert wurden. Obwohl diese Schritte einzeln beschrieben sind, ist ein ständiger Einfluss aufeinander entstanden, um Fortschritte in Teilbereichen auf die beiden den Winterdienst betreffenden Projekte zu übertragen. Nach der Konkretisierung der Forschungsprojekte durch die Beteiligten aller Seiten konnten die Vorgehensweisen, die zu einer raschen Projektabwicklung führen sollen, in folgenden Schritten dargestellt werden:

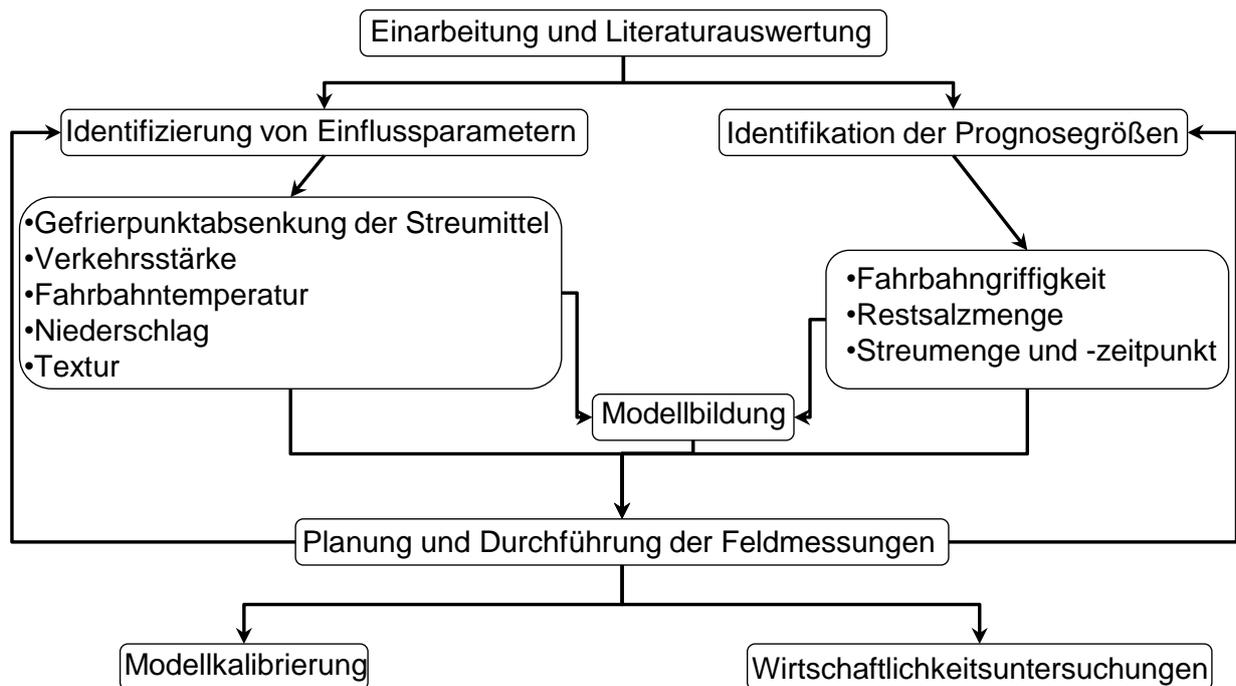


Abbildung 1.7: Skizze der Herangehensweise

### Einarbeiten, Modellüberlegungen und Wetterszenarien

Am Beginn des Projektes standen Gespräche mit dem Ausschuss Winterdienst am Programm. Die dabei aufgetretenen Fragen konzentrierten sich in erster Linie auf die Einsparung von Streumitteln und einer kritischen wissenschaftlichen Betrachtung der bisherigen Winterdienstpraxis bzw. der Streumengenempfehlungen. In der Literaturrecherche konnte kein konsistentes Gesamtmodell identifiziert werden, wohl aber eine systematische Betrachtung verschiedener Einflussparameter. Hier kristallisierte sich insbesondere der Einfluss von Niederschlagsmenge und Verkehr auf die verbleibende Restsalzmenge als entscheidende Parameter heraus. Basierend auf den Besprechungen und Literaturrecherchen wurden die Einflussparameter *Griffigkeit*, *Verkehrsstärke*, *Fahrbahntemperatur*, *Niederschlagsmenge (inkl. Reif)*, *Fahrbahntextur*, *Gefrierpunkt Streumittel* und *Restsalzabnahme* zu einer Modellhypothese verknüpft. Zielsetzung der Modellhypothese war die Simulation unterschiedlicher Streustrategien bei wechselnden Wetterszenarien. Zusätzlich wurden die aktuellen Streutechnologien, vor allem in Hinblick auf Streugutmischungen, Berechnung des Taumittelanteils und Kosten untersucht.

## Durchgeführte Feldmessungen

Die Einflussparameter Verkehrsstärke und Niederschlagsmenge wurden durch bereits existierende Sensoren laufend erfasst, wodurch kein zusätzlicher Messaufwand für diese erforderlich waren. Für alle anderen Einflussparameter wurden eigene Messverfahren benötigt, die in der Folge kurz beschrieben werden:

- *Fahrbahngriffigkeit* ist für die Verkehrssicherheit von zentraler Bedeutung, und wird von winterlichen Verhältnissen besonders negativ beeinflusst, weshalb eine Integration trotz der komplexen Zusammenhänge schwierig ist, aber letztendlich alle anderen Einflussfaktoren nur als Zwischenschritte zur Abschätzung der Griffigkeit dienen. Besondere Bedeutung hat die Griffigkeit bei der Kalibrierung des Modells, da hier reale Werte mit berechneten verglichen werden können. Die Griffigkeit der Straße wurde mit dem System „Griptester“ kontinuierlich gemessen.
- *Fahrbahntemperatur* ist für die Zustandsänderung der Zwischenmedien (Wasser, Schnee, Eis) und damit verbundenen Veränderungen des Griffigkeitsniveaus verantwortlich. Die Fahrbahntemperatur wurde mit dem Messsystem „Vaisala“ semikontinuierlich und mit einer Thermokamera punktuell gemessen, wobei auch Daten einer Langzeitmessung (Vaisala) zur Verfügung standen.
- *Restsalzmenge* ist jene Menge an Tausalz, die nach einer Streufahrt auf der Fahrbahn über die Zeit wirksam bleibt und für eine Gefrierpunktsabsenkung des Wasserfilms auf der Straßenoberfläche sorgt. Durch verschiedene Zusatzstoffe ( $\text{CaCl}_2$ , Safecote, CMA) sollen gemäß Herstellerangaben Verbesserungen durch Einsparungen erreicht werden. Die Restsalzmengen wurden mit dem Gerät SOBO 20 auf Basis von Widerstandsmessungen punktuell bestimmt (Kalibration je nach Zusatzmittel erforderlich).

Genauere Ausführungen zu den Messsystemen für Griffigkeit, Fahrbahntemperatur und Restsalzmenge, die schon zum Einsatz kamen findet sich in Abschnitt 3.1 auf Seite 46 in dieser Arbeit. Da vor allem in Deutschland bereits eine Vielzahl an Untersuchungen einzelner Einflussgrößen durchgeführt wurden bzw. noch durchgeführt werden, wird eine Kooperation mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) angestrebt, die einen gegenseitigen Wissensaustausch und eventuell auch die Leihgabe von Messtechnik und Erfahrungen beinhalten würde.

## Modellkalibrierung und Analyse der Modellberechnungen

Der im Modell berechnete Vorgang des Gefrierens basiert auf physikalischen Zusammenhängen, die allerdings von der Salzkonzentration abhängig sind, welche wiederum an die Restsalzmenge gekoppelt ist, für die eine beschreibende mathematische Funktion gesucht wurde. Aus der Vielzahl an Messungen der die Restsalzmenge beeinflussenden Parameter wurden mittels multipler Regressionsrechnung jene Faktoren bestimmt, welche eine kontinuierliche Berechnung der Restsalzmenge bei bekannten Einflussgrößen Verkehrsmenge, Zeit und Niederschlagsmenge seit dem Steuzeitpunkt, ermöglichen.

Um den Witterungseinfluss einfacher handhaben zu können, wurden sieben Wetterszenarien festgelegt, die eine Optimierung der Streuintervalle und Streumengen für das jeweilige Szenario durch Modellsimulationen erleichtern. Basierend auf Wetter- und Fahrbahnzustandsszenarien konnten sowohl Streuempfehlungen als auch Empfehlungen für den Straßennutzer abgeleitet werden, die zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht endgültig abgesichert sind, aber als Richtwerte genügend geeignet erscheinen.

## **Wirtschaftlichkeit einzelner Streufahrten und Ausweitung auf Gesamtbetrieb**

Durch die Kombination der Modellberechnungen, Wetterszenarien und Streugutkosten konnten die Auswirkungen aktueller Streustrategien beurteilt und mögliche Optimierungspotentiale aufgezeigt werden. Die Anteile der Wetterszenarien an den Winterdiensttagen in den einzelnen Regionen sowie die zugehörigen bisherigen Streustrategien wurde über einen Fragebogen in den Straßen- und Autobahnmeistereien erhoben die Überprüfung und Verfeinerung wird in einem weiteren Schritt auf Basis der Wetterdaten der ZAMG erfolgen. Auf Basis dieser Ergebnisdaten und Zuordnung der Straßenmeistereien zu vergleichbaren Klimazonen soll es in Zukunft möglich sein, sowohl den Ressourcenbedarf, als auch das Optimierungspotential der Streustrategien besser abschätzen zu können. Aus den Einsparpotentialen aller Betriebe bei den einzelnen Wetterszenarien sowie deren Häufigkeit kann in weiterer Folge das Optimierungspotential im Winterdienst für ganz Österreich abgeschätzt werden.

## **Geplante Feld- und Labormessungen**

Zur Einbindung der Griffigkeitsprognose in das Modell sind noch folgende weitere Messreihen notwendig:

- *Gefrierpunkt* ist jene Temperatur, bei der das Zwischenmedium Reifen/Fahrbahn vom flüssigen in den festen Aggregatzustand wechselt. Die Gefrierpunkttemperatur wird bei Lösungen durch die chemischen Eigenschaften des gelösten Taumittels und dem Taumittelgehalt der Lösung bestimmt.
- *Textur* ist gekennzeichnet durch die Rautiefe (Makrotextur) der Fahrbahnoberfläche, in den durch die Rautiefe bedingten Hohlräumen kann sich Wasser aber auch Eis oder Schnee ohne wesentlichen Einfluss auf die Griffigkeit befinden.

Gleichzeitig werden weitere Messungen der *Fahrbahngriffigkeit*, *Fahrbahntemperatur* und *Restsalzmenge* um das Modell genauer kalibrieren zu können.

# Kapitel 2

## Grundlagen Winterdienst

In diesem Kapitel werden die für den Winterdienst grundlegenden Fakten und Zusammenhänge erläutert. Detailliertere Ausführungen zu einzelnen Aspekten sind aus den Verweisen im Text bzw. in den im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen zu finden. Bei den praktischen Aspekten des Winterdienstes sind nur jene hervorgehoben, die für den Winterdienst bzw. das in der gegenständlichen Arbeit entwickelte Modell von Bedeutung sind.

### 2.1 Griffigkeit

Als Griffigkeit bezeichnet man die horizontal übertragbaren Reibungskräfte zwischen der Fahrbahnoberfläche und dem Fahrzeugreifen in Abhängigkeit von der Anpresskraft. Als Messgröße dient der Reibungsbeiwert  $\mu$ , welcher als Quotient der übertragbaren Horizontalkräfte zu den gleichzeitig wirkenden Normalkräften definiert ist.

$$\mu = \frac{H}{N} \quad (2.1)$$

Es bedeuten:

- $\mu$  - Reibungskoeffizient [-]
- H - Horizontalkraft, die am Körper zieht [N]
- N - Normalkraft, die den Körper auf den Boden drückt [N]

Anschaulich kann der Reibungsbeiwert an folgendem Beispiel dargestellt werden. Ein kistenförmiger Körper mit einer Masse von 100 kg liegt auf einer Fahrbahn. Der *Reibungsbeiwert* zwischen der Kiste und der Fahrbahnoberfläche soll  $\mu = 0,7$  betragen. Um die Kiste nun horizontal zu bewegen, muss mit einer Kraft, die 70 kg entspricht, angezogen werden. Diese Reibung entspricht der *Gleitreibung*, da die Kiste immer mit derselben Seite auf der Fahrbahn aufliegt und eine ausschließlich translatorische Bewegung der Kiste (siehe Abb. 2.1) erfolgt.

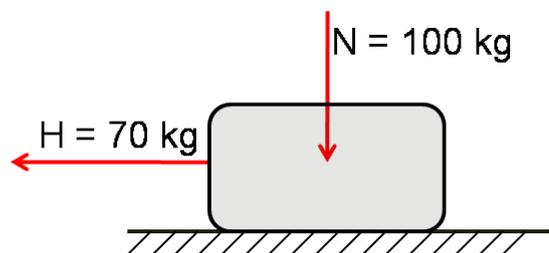


Abbildung 2.1: Zusammenhang H-N

Die wichtigsten für den Reibungsbeiwert  $\mu$  bestimmenden Faktoren sind:

- Textur der Fahrbahn
- Verunreinigungen der Fahrbahnoberfläche
- Trockene oder feuchte Fahrbahn
- Wasser-, Schnee- oder Eisfilmdicke
- Schlupf
- Reifentyp (Sommer-, Winterreifen)
- Reifenprofil, -druck etc.

Für den Reibungsvorgang zwischen Rad und Straße ist der klassische Ansatz der Coulombschen Reibungstheorie nicht zutreffend, da zu viele Variablen den Vorgang bestimmen und die Komplexität zu sehr steigt, vor allem was die Variabilität in Auflast und Geschwindigkeit betrifft. Das angeführte Beispiel der Gleitreibung ist für die Kraftübertragung zwischen Fahrbahn und Gummi nur in Sonderfällen, wie einem blockierenden Rad, von Bedeutung. Durch die Weiterentwicklung der Fahrzeugtechnik befindet sich der Reifen bei neuen Fahrzeugen praktisch immer in einem Abrollvorgang bei dem Kräfte (Brems-, Beschleunigungs- oder Seitenführungskräfte) übertragen werden. Blockierende Reifen, bei denen die Gleitreibung maßgebend ist, werden durch ABS verhindert, schleudernde Reifen, die ohne Kraftübertragung durchdrehen, werden durch Antriebsschlupfregelung (ASR) verhindert.

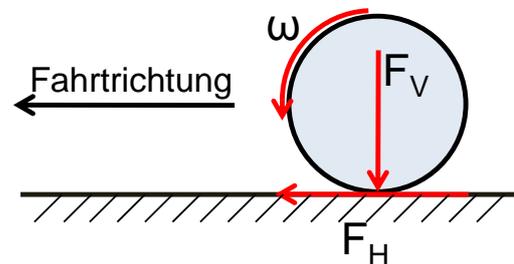


Abbildung 2.2: Kräfte am rollenden Rad

Wenn ein Reifen in Längsrichtung Kraft überträgt, entsteht ein gewisser Verlust bei positiver oder negativer Beschleunigung, das heißt, dass es einen Unterschied in der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  eines beschleunigten Rades und der Winkelgeschwindigkeit  $\omega_0$  (entspricht der Fahrgeschwindigkeit  $v$ ) eines frei rollenden Rades gibt. Diese Geschwindigkeitsdifferenz wird *Schlupf* genannt.

$$S_b = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = 1 - \frac{\omega}{\omega_0} \quad (2.2)$$

Es bedeuten:

- $S_b$  - Bremsschlupf
- $\omega_0$  - Winkelgeschwindigkeit des frei rollenden Rades [m/s] ( $\hat{=}$  Fahrgeschwindigkeit)
- $\omega$  - Winkelgeschwindigkeit des gebremsten Rades [m/s]

Ein Schlupfwert von 0% entspricht einem frei rollenden Rad, d. h. es werden keine Kräfte in Längsrichtung übertragen. Dieser Wert ist allerdings praktisch nicht erreichbar, da auch bei nicht angetriebenen bzw. gebremsten Kfz-Rädern ein gewisser Widerstand überwunden werden muss und damit eine Kraftübertragung erfolgen muss. Brems- und Beschleunigungskräfte können also nur übertragen werden, wenn Schlupf aktiviert wird. Bei einem Schlupf von 100% beträgt die Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 0$ , man spricht von einem blockierenden Rad. Der höchste Wert des Reibungskoeffizienten wird in Abhängigkeit des Fahrbahnzustandes (trocken/naß) bei einem Schlupf zwischen 15% und 25% erreicht. Dies ist auch jener Bereich, in dem moderne ABS-Systeme versuchen den Schlupf zu halten, um möglichst viel Reibungskraft zu aktivieren.

Der Verlauf des Reibungskoeffizienten bei Schlupf von 0 % bis 100 % in Abb. 2.3 ist nur eine qualitative Darstellung bei *einer* Geschwindigkeit da sich diese bei Schlupfwerten von mehr als 15 % mit der Geschwindigkeit (höhere Geschwindigkeit ergibt geringeren Griffigkeitsbeiwert bei gleichem Schlupf) ändern. Genauere Ausführungen zum Thema Schlupf finden sich in [Pfeiler, 2004] und [Maurer, 2007]. Je öfter eine Straße befahren wird, umso mehr wird die ehemals raue Oberfläche der Straße glattpoliert und die Griffigkeit nimmt ab. Wie schnell das geschieht, hängt im Wesentlichen von der Verkehrsstärke und dem Polierwiderstand des verwendeten Gesteins ab.

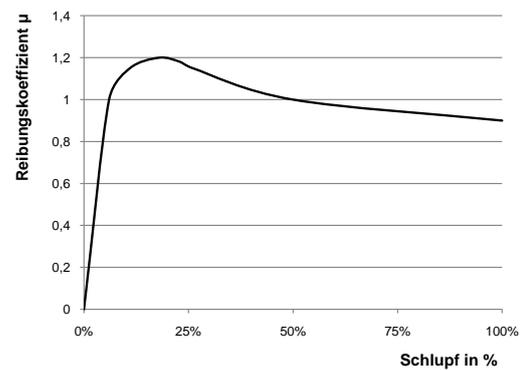


Abbildung 2.3: Zusammenhang  $\mu$ – Schlupf

Von praktischer Bedeutung ist der Reibungskoeffizient einerseits für den Straßenbenutzer, der davon ausgeht, dass die erlaubten Höchstgeschwindigkeiten auch gefahren werden können, ohne in Kurven von der Straße abzukommen bzw. einen angemessenen Bremsweg zur Verfügung zu haben. Andererseits für den Straßenbetreiber, weil damit seine Leistungen gemessen werden und er bei fahrlässigem Verhalten auch Haftung übernehmen muss. In der folgenden Tabelle 2.1 wird die Beurteilung des Straßenzustandes hinsichtlich Griffigkeit gemäß RVS 13.01.15 (2006) dargestellt.

Griffigkeitsklasse	Summenhäufigkeit [%]	Bezeichnung	Reibungsbeiwert $\mu_{RoadSTAR}$
Sehr gut	30	I	> 0,75
Gut	70	II	0,59-0,75
Ausreichend	90	III	0,45-0,59
Schlecht	95	IV	0,38-0,45
Sehr schlecht	100	V	< 0,38

Tabelle 2.1: Griffigkeitsklassen des neuen österreichischen Bewertungshintergrundes 1996

Die in Tabelle 2.1 angegebenen  $\mu$ -Werte beziehen sich auf Messungen mit dem *RoadSTAR* mit 60 km/h, einem definierten Schlupf von 18 % und einem genau definierten Wasserfilm (100 l/min) und sind nicht mit jenen des Griptesters zu verwechseln, dessen Werte etwas geringer sind. Eine kurze Beschreibung der Umrechnung von Messwerten des Griptesters MKII auf andere Systeme erfolgt in Abschnitt 3.1.1.

Der Reibungsbeiwert  $\mu_{RoadSTAR} = 0,38$  stellt den Schwellenwert zu Sofortmaßnahmen dar. Bei Straßenabschnitten mit geringerer Griffigkeit muss der Straßenerhalter sofort Maßnahmen zur Erhöhung der Griffigkeit treffen, da er sonst auch im Falle eines Unfalles ggf. haftbar gemacht werden kann. Dieser rechtliche Aspekt betrifft in Österreich besonders die ASFINAG, die auf ihren Straßen eine Maut einhebt, wodurch auch das Anforderungsniveau an die Straßenerhaltung höher ist. Das bedeutet, dass die ASFINAG schon bei Fahrlässigkeit haftbar gemacht werden kann und das eine Beweislastumkehr stattfindet, also die ASFINAG beweisen muss, dass sie keine Schuld trifft. Generell ist auf hochrangigen Straßen aufgrund der sehr großen Kurvenradien die Verlängerung des Bremsweges durch einen Griffigkeitsabfall problematisch, während auf Landesstraßen auch der Abfall der möglichen Kurvengeschwindigkeit in engen Kurven zu Unfällen führen kann. Sehr detailliert wird in [Maurer, 2007] auf die Griffigkeit eingegangen.

## Bedeutung der Griffigkeit für den Winterdienst

Die Bedeutung der Fahrbahngriffigkeit für den Winterdienst ist in dem Diagramm in Abb. 2.4 zu erkennen. Die Grundgriffigkeit der Fahrbahn ist hauptsächlich abhängig von der Textur und relativ konstant (Abnutzung geschieht längerfristig). Zu kurzfristigen Änderungen im Griffigkeitsniveau kommt es durch Zwischenmedien (für den Winterdienst Wasser, Schnee und Eis) die sich zwischen Reifen und Fahrbahn befinden. Dieses Diagramm stellt ein Beispiel für die Änderung der Bremsweglänge bei einer Fahrgeschwindigkeit von 130 km/h und 1 s Reaktionszeit, je nach Zwischenmedium (und damit Griffigkeit) dar. Warum sich die Griffigkeitswerte mit dem Zwischenmedium ändern wird in Abschnitt 5.6 kurz erläutert.

Bei trockener Fahrbahn beträgt der Bremsweg etwa 145 m die für die Bremsweglängen bei anderen Zwischenmedien als Referenz (100%) festgelegt werden, da hier nur relative Änderungen dargestellt werden. Bei nasser Fahrbahn auf etwa 125% und ist damit noch in einem sicheren Rahmen. Befindet sich jedoch Schnee in der Rollspur der Fahrbahn, dann steigt die Bremsweglänge auf ca. 480% des ursprünglichen Wertes. Ist die Fahrbahn komplett vereist, steigt die Bremsweglänge um mehr als das 10-fache. Wegen dieser starken Änderung der Bremsweglänge durch Schnee und Eis ist auf öffentlichen Straßen der Winterdienst durchzuführen. Ziel des Winterdienstes ist es, die Fahrbahn (Salz)nass zu halten und somit die Verkehrssicherheit zu erhöhen.

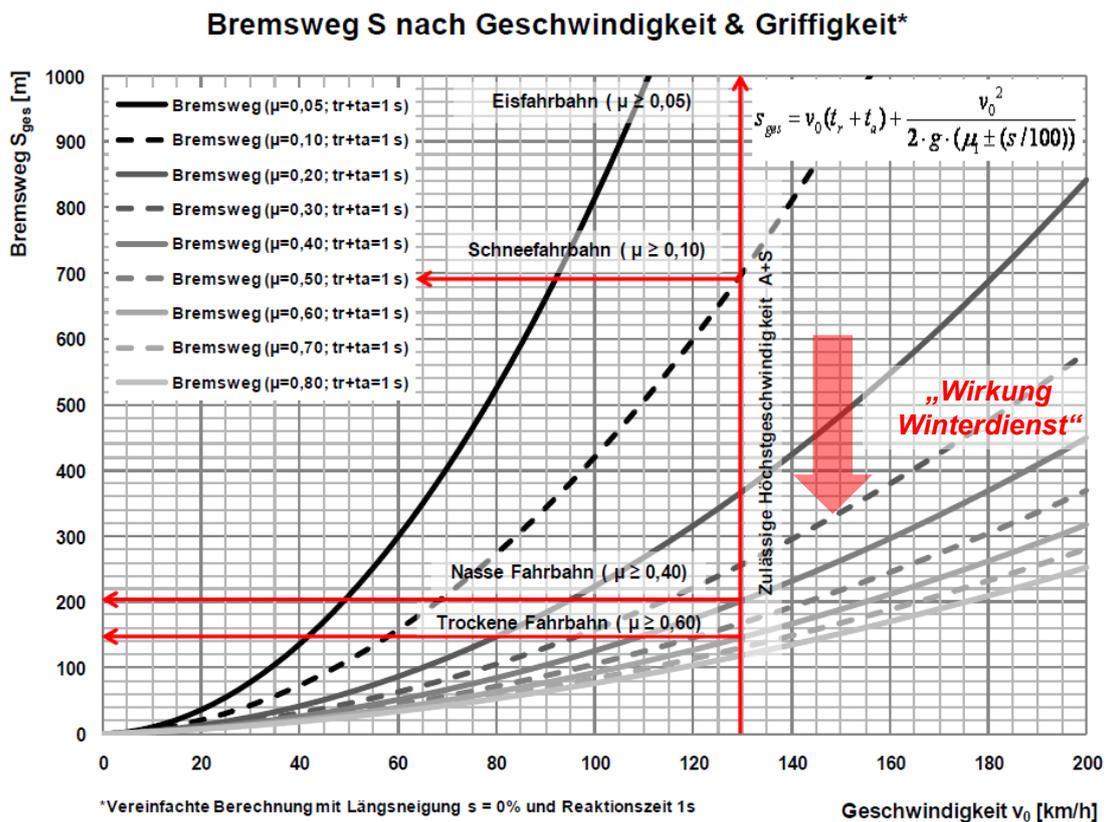


Abbildung 2.4: Bremsweg bei unterschiedlichen Griffigkeitswerten

## 2.2 Streumittel

Die Aufgabe eines Streumittels besteht darin, dem Reifen den Kontakt mit der Fahrbahn sicherzustellen bzw. die vorhandene Griffigkeit zu erhöhen. Dies geschieht nach zwei verschiedenen Prinzipien:

### Abstumpfende Streumittel

Diese Bezeichnung umfasst alle zur Verbesserung der Griffigkeit aufgestreuten Splitte (gebrochenes Gestein). Das Wirkungsprinzip besteht darin, die Schnee- bzw. Eisschicht zwischen Fahrbahn und Reifen mit Splitt zu durchsetzen und eine Kraftübertragung durch Verkanten des Kornes zwischen Straße und Reifen zu ermöglichen (siehe Abb. 2.5). Dafür 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. Es dürfen keine bindigen oder andere schmierige Stoffe im Streumittel vorhanden sein.

Hier liegt auch der Vorteil der Splittstreuung, die unmittelbare Wirksamkeit nach der Streuung, und dass auch auf schon festgefahrenen Schneedecken die Griffigkeit erhöht wird, da sich der Splitt beim Überfahren der Schneedecke durch KFZ in den Schnee bzw. in das Eis eindrückt. Auftauende Streumittel brauchen eine gewisse Zeit (5 min bis 30 min), um ihre Wirkung im lockeren Schnee zu entfalten, und sind bei einer festgefahrenen Schneedecke bzw. Eisplatten praktisch wirkungslos. Für Straßen mit einem DTV von im Schnitt mehr als etwa 1.000 KFZ/24 h sind abstumpfende Streumittel nicht zu empfehlen, da sich schon nach 400 KFZ durch die Verteilungswirkung des Verkehrs kein Splitt mehr in den Rollspuren befindet, wie in Abbildung 2.6 dargestellt ist Wehner [1960], Hoffmann [1984]. Das bedeutet, dass sich Streumengen bzw. Streuintervalle in Bereichen befinden, die schwer logistisch durchführbar und nicht mehr wirtschaftlich sind.



Abbildung 2.5: Wirkungsweise von Streusplitt

### Salzstreuung VS Verkehr

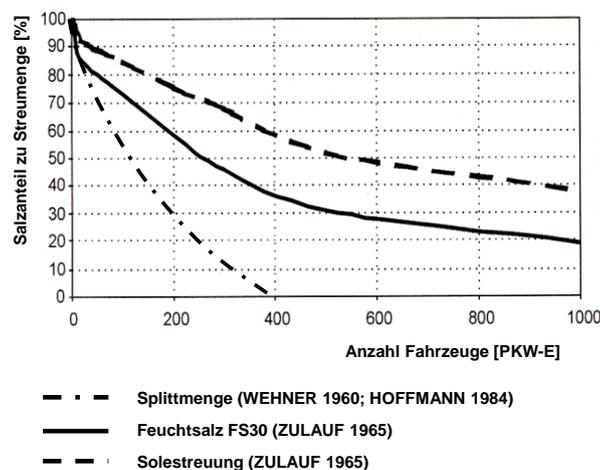


Abbildung 2.6: Abnahme der Splitt- und Restsalzmengen in der Rollspur im Vergleich

Ein weiterer Nachteil des Splitts liegt in der Feinstaubbelastung der Luft, der entsteht wenn der Splitt durch den Verkehrseinfluss zerrieben wird. Dies gilt besonders für den innerstädtischen Raum, in dem es aufgrund der geringen Verkehrsstärke noch wirtschaftlich wäre Splitt zu streuen, wo jedoch wegen der große Bevölkerungsdichte die Feinstaubbelastung gesundheitlich nicht tragbar ist. Im Gegensatz zu Streusalz verbleibt der ausgebrachte Splitt auf der Fahrbahn, wenn auch nicht in der Rollspur, sondern meist in den Randbereichen und muss vom Straßenbetreiber wieder eingekehrt werden, was zu einem zusätzlichem Aufwand und höheren Kosten führt. Die Unterschiede verschiedener Splitte in toxikologischer, winterdienstspezifischer Hinsicht sowie dem Emissionspotential wurden in Kirchmaier u. a. [2009] untersucht und bewertet.

## Auftauende Streumittel

Diese Bezeichnung umfasst alle Taumittel, die durch einen chemischen Vorgang den Gefrierpunkt von Wasser unter die Fahrbahntemperatur absenken und so die Bildung einer Eisfläche auf der Fahrbahn verhindern. Im Allgemeinen sind dies Salze, die auf die Fahrbahn aufgebracht werden und in Lösung mit dem Wasser, das sich auf der Fahrbahn entweder durch Reif- bzw. Taubildung oder Niederschlag gesammelt hat, gehen. Die so entstehende Sole verhindert die Eisbildung durch die chemisch herbeigeführte Gefrierpunktniedrigung, die von der Konzentration der Lösung abhängig ist und in Abschnitt 5.5 ausführlich behandelt wird.

In Abbildung 2.7 sind Auswertungen eines Versuches mit einer Thermokamera zum Verständnis des Lösungsvorganges von Tausalz dargestellt. Der Versuch fand am Gelände der Autobahnmeisterei Golling (A10) statt, die im Winter ganzjährig im Schatten liegt, weshalb die Bodentemperatur sehr gering ist.

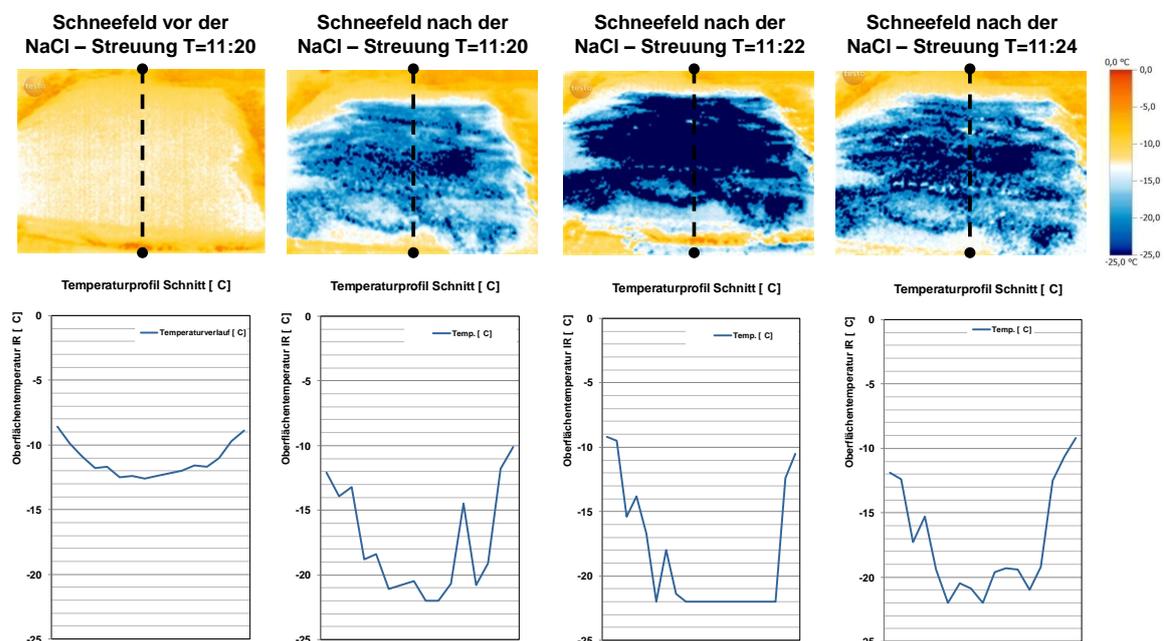


Abbildung 2.7: Thermografischer Verlauf des Tautvorganges auf einem Schneefeld

Auf eine abgegrenzte Fläche von etwa 2 m x 2 m Neuschnee mit einer Schnehöhe von etwa 7 cm wurde per Hand Trockensalz (NaCl) ausgestreut. Ohne nennenswerte Verzögerung (die ersten beiden Infrarotbilder haben auch denselben Zeitstempel) begann der Tautvorgang durch das Salz. Bei diesem Vorgang wird Energie benötigt, die aus der „Wärme“ des Schnees bezogen wird, wodurch die Temperatur abfällt. Im gebrachten Beispiel hat der Schnee etwa -12 °C und

nach Salzaufbringung sinkt diese praktisch unmittelbar auf etwa  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Im zweiten Bild ist auch noch eine Unregelmäßigkeit in der Temperaturverteilung zu erkennen, die durch die Ausbringung des Salzes per Hand entsteht.

Bereits zwei Minuten später ist der Tauvorgang so weit fortgeschritten, dass sich ein gleichmäßigeres Temperaturbild mit einer konstanten Mindesttemperatur von  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$  ergibt. Dies hat den Grund, dass hier der eutektische Punkt von Natriumchlorid liegt, ab dem keine weitere Abkühlung (der Sole) möglich ist und auch die Thermokamera an ihre Grenzen stößt. In Bild drei ist also an der Oberfläche eine gesättigte Sole mit einer Temperatur von etwa  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , die nicht weiter abkühlt.

Bei der weiteren Verdünnung der Sole durch getauten Schnee steigt die Temperatur wieder an, das ungelöste Salz vollständig gelöst wurde, jedoch liegt die Temperatur immer noch unter der ursprünglichen Bodentemperatur. Im weiteren Verlauf steigt die Temperatur immer langsamer aber stetig weiter an und gleichzeitig wird immer mehr Schnee getaut, bis sich ein Gleichgewicht zwischen Temperatur und Solekonzentration bewirkt.

## 2.3 Feuchtsalzstreuung

Bei der Feuchtsalzstreuung wird trockenes, rieselfähiges Salz mit Wasser zu einer gesättigten Sole vermischt, um eine gewisse Anfeuchtung am Streuteller zu erzielen, die ein besseres Streubild bewirkt. Durch die Feuchtigkeit kleben einzelne Salzkörner zusammen und bilden größere schlierenförmige Streifen, die durch Wind weniger stark verweht werden und zusätzlich besser auf der Fahrbahn haften. Es bleibt also mehr Salz auf der Fahrbahn liegen als bei Trockensalzstreuung, bei der ein Großteil sofort durch den Wind vertragen wird. Zusätzlich haftet das Salz besser an der Fahrbahnoberfläche, wenn es angefeuchtet bzw. überhaupt gelöst ausgebracht wird.

Die Flüssigkeit, mit der das Trockensalz angefeuchtet wird, ist in der Regel eine Salzlösung, wobei meist Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ ) verwendet wird, aber auch Kalziumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) oder Magnesiumchlorid ( $\text{MgCl}_2$ ) eingesetzt werden kann. Das am häufigsten verwendete Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ ) kann in Form von Siedesalz, Meersalz oder Verbrennungssalz (als industrielles Abfallprodukt) gewonnen werden und wird in unterschiedlichen Qualitäten (Korngröße) geliefert. Um noch bessere Streuergebnisse zu erreichen, werden oft noch weitere Zusatzmittel beigemischt (siehe Kapitel 2.3.4).

Die Sole wird in einem Tank (in Abbildung 2.8 als blauer Bauteil erkennbar) am Streuwagen mitgeführt, wobei eine Salzkonzentration von etwa 23%, wo auch der Bereich der Sättigung der Sole liegt, zur Anwendung kommt. Da bei sehr tiefen Temperaturen die Gefahr des Frierens der Sole während einer Streufahrt bei sehr kalter Witterung besteht, wird in dieser Form entweder  $\text{CaCl}_2$  verwendet oder nur Trockensalz gestreut. Die Sole kann entweder als Fertigmischung in Tankwägen bzw. Großkanistern geliefert werden oder durch die Straßenmeisterei selbst hergestellt werden. Die Lieferung der fertig gemischten Sole ist etwas teurer, wenn man die Kosten pro Tonne Sole betrachtet, dafür fallen aber die Anschaffungskosten einer geeigneten Mischmaschine sowie Personalkosten weg. Es sollten



Abbildung 2.8: Streufahrzeug zur Feuchtsalzstreuung

jedenfalls beide Methoden für jeden Betrieb durchgerechnet werden und die Entscheidung auf Basis der Wirtschaftlichkeit über einen längeren Zeitraum getroffen werden.

Die Vermischung von trockenem Salz und Sole geschieht auf dem Streuteller, der in Abbildung 2.9 dargestellt ist, erst unmittelbar vor dem Ausbringen des Taumittels, um eine schwierig zu behebbende Klumpenbildung im Gerät zu vermeiden. Außerdem ist die Lagerung feuchten Salzes auch über kurze Zeit nicht möglich, da es nicht mehr rieselfähig und damit für den Streudienst unbrauchbar ist. Der Streuteller muss vor jeder Streufahrt augenscheinlich auf Schäden bzw. Salzurückstände kontrolliert werden, und diese sind gegebenenfalls zu entfernen. In Abbildung 2.9 ist auch gut die ungleichmäßige Ausbringung durch den Streuteller zu erkennen, die auf der Fahrbahn zu „Streufahnen“ führt, in denen das Salz konzentriert liegt und erst durch den Verkehr gleichmäßig verteilt wird.



Abbildung 2.9: Streuteller

Die technischen Daten von STRATOS Aufbau-Streumaschinen der Firma Aebi-Schmidt, die auf herkömmliche LKWs montiert und auch wieder demontiert werden können, was somit eine andere Nutzung der Trägerfahrzeuge während der Sommermonate ermöglicht, sind in der folgenden Tabelle angegeben. Die Daten dieser Tabelle werden für Reichweitenberechnungen gebraucht. Da diese Modellreihe in Österreich Marktführer ist, eignen sich die Zahlen als realistische Ausgangsgröße. Es existieren noch kleinere Systeme der Firma Aebi-Schmidt, die auch entsprechend kleinere Fahrzeuge benötigen und für den innerstädtischen Einsatz konzipiert sind, sowie Produkte anderer Hersteller, die aber ähnliche Größenordnungen haben.

Bezeichnung	35	40	50	60	70	80	90	100	120	140
<b>Behältergröße [m<sup>3</sup>]</b>	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	12,0	14,0
<b>Soletank [l]</b>	1.760	1.760	1.760	2.200	3.000	3.000	3.000	3.000 - 5.000	3.000 - 5.000	3.000 - 5.000
<b>alternativer Soletank [l]</b>	-	2.200	2.200	3.000	3.860	3.860	3.860	-	-	-
<b>Leergewicht [kg]</b>	912	952	992	1.191	1.276	1.326	1.376	1.850	1.905	1.960

Tabelle 2.2: Technische Daten der STRATOS Aufbau-Streumaschinen *Quelle: Aebi-Schmidt*

Es sind Mischungsverhältnisse von 0 % Sole (Trockenstreuung) bis 100 % Sole (reine Solestreuung) denkbar, wobei sich ein Mischungsverhältnis von 70 % Trockensalz und 30 % Sole, die sogenannte FS30 Variante in der Praxis bewährt hat. Eine Untersuchung, basierend auf visuellen Beobachtungen, die ebenfalls für FS30 spricht, findet sich in [Badelt, 2007]. Aus dieser Untersuchung und aus Gesprächen mit Praktikern folgt, dass eine geringere Anfeuchtung zu hohen Verlusten durch Verwehungen führt. Wird mehr Sole als 30 % hinzugegeben, führt dies zur Klumpenbildung, die sich negativ auf das Streubild auswirkt. Weiters wird die Menge an effektivem Tausalz bei gleicher Streumenge durch die Wasserzugabe reduziert, da sich die ausgebrachte Streumenge auf das schon angefeuchtete Salz, das unwirksames Wasser enthält, bezieht.

## 2.3.1 Streusalze

### Natriumchlorid (NaCl)

Das am häufigsten für den Winterdienst verwendete Salz ist Natriumchlorid (auch Kochsalz oder Speisesalz) mit der chemischen Formel  $NaCl$ , das in ganz Europa den Hauptbestandteil des Streugutes ausmacht. Natriumchlorid wird hauptsächlich über Verdunstung von Meerwasser und aus dem Bergbau gewonnen, wobei es auch bei chemischen Prozessen als Nebenprodukt entstehen kann. Die weltweite jährliche Salzproduktion lag 2006 bei 255,6 Mio. Tonnen [Wikipedia, 2010].

#### SALINE EBENSEE: GEWINNUNG VON SIEDESALZ

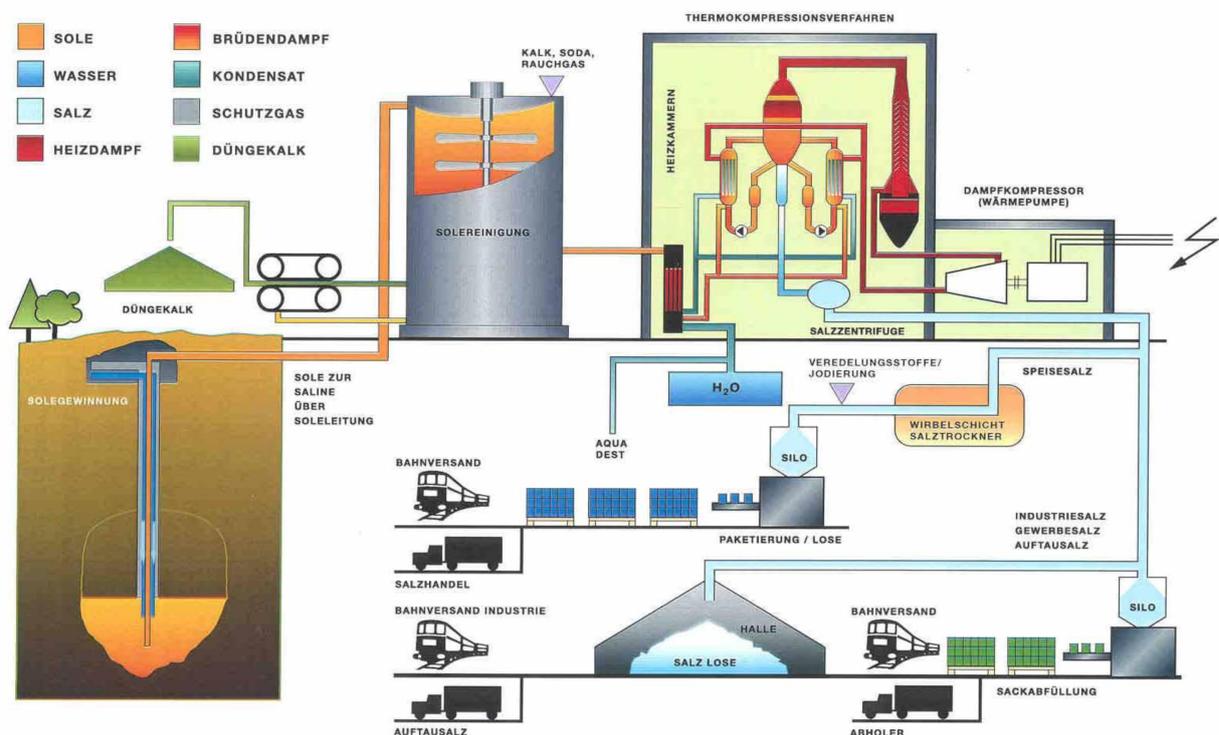


Abbildung 2.10: Schema der Salzgewinnung in Ebensee *Quelle: Salinen Austria AG*

Der wichtigste Lieferant für Salz ist in Österreich die Salinen Austria AG, die jährlich etwa 1,1 Mio Tonnen Salz mit einem Maximum von 3.350 Tonnen pro Tag 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 Verdunstung und Zentrifugieren aus der Sole gewonnen und gereinigt. In Abb. 2.10 ist der Produktionsvorgang der Saline in Ebensee dargestellt.

Natriumchlorid mit der chemischen Formel  $NaCl$  hat eine Dichte von  $2,17 \text{ g/cm}^3$  bei  $20^\circ\text{C}$  und eine Löslichkeit in Wasser von  $359 \text{ g/l}$  bei  $20^\circ\text{C}$ . Eine Salzlösung leitet durch die freien Ionen elektrischen Strom, während weder reines  $\text{H}_2\text{O}$  noch reines  $\text{NaCl}$  elektrisch leitfähig sind. Eine Sole mit einem Salzgehalt von 23,4 Gew-% bildet ein eutektisches Gemisch, das bei  $-21,3^\circ\text{C}$  ohne Entmischung gefriert.

Wie wichtig und vielseitig Natriumchlorid ist, lässt sich an dem sehr breit gefächerten Einsatzgebiet darstellen. Die folgende Liste ist die Produktpalette der Salinen Austria AG, wobei sich diese Produkte in den Punkten Reinheit, Korngröße sowie Zusätze und damit auch den Preisen unterscheiden.

- Speisesalz
- Auftausalz
- Gewerbesalz
- Industriesalz
- Pharmasalz
- Viehsalz

Welche Mengen NaCl verbraucht werden, lässt sich aus Tabelle 2.3 ablesen. Der Anteil an Speisesalz, als das die meisten Menschen Natriumchlorid kennen, ist sehr gering. Wohingegen der Anteil an industriellem Salzverbrauch sehr hoch ist.

	<b>Industriesalz</b>	<b>Auftausalz</b>	<b>Gewerbesalz</b>	<b>Speisesalz</b>	<b>Sonstige</b>
<b>Deutschland</b>	80 %	12 %	5 %	3 %	0 %
<b>USA (2007)</b>	39 %	37 %	12 %	3 %	9 %

Tabelle 2.3: Verwendung von NaCl, *Quelle: Wikipedia, Stand: Mai 2010*

In Österreich liegt der durchschnittliche Salzverbrauch für den Winterdienst der letzten Jahre bei 345.000 Tonnen pro Jahr. In Tabelle 2.4 ist der Salzverbrauch nach Wintersaison und Bundesland aufgelistet, wobei hier auch die starken Schwankungen des Salzverbrauches auffallen, die von der Anzahl der Winterdiensttage pro Winter abhängen. Der große Unterschied im Salzverbrauch zwischen den Bundesländern entsteht hauptsächlich durch die unterschiedliche Netzlänge und die Anzahl der Winterdiensttage in den verschiedenen Regionen. Bezogen auf die Streumenge pro m<sup>2</sup> und Winterdiensttag fallen die Differenzen geringer aus. Es zeigt sich jedoch auch, dass sich für Gesamtösterreich der Verbrauch durchaus um den Faktor 3 je nach Winter ändern kann. So wurden im milden Winter 2006/07 nur 174.000 Tonnen verbraucht, während im harten Winter 2008/09 der Verbrauch 455.000 Tonnen betrug.

	<b>2004/05</b>	<b>2005/06</b>	<b>2006/07</b>	<b>2007/08</b>	<b>2008/09</b>	<b>Mittel Länder</b>
	[1.000 t]					
<b>Burgenland</b>	12,7	18,7	3,6	10,0	15,7	<b>12,14</b>
<b>Kärnten</b>	16,9	22,6	13,0	13,3	28,1	<b>18,77</b>
<b>Niederösterreich</b>	108,1	146,9	75,0	129,4	205,6	<b>133,00</b>
<b>Oberösterreich</b>	111,2	85,2	23,2	35,9	56,8	<b>62,46</b>
<b>Salzburg</b>	24,2	27,3	10,7	17,8	23,7	<b>20,75</b>
<b>Steiermark</b>	41,2	47,8	21,4	32,3	46,8	<b>37,91</b>
<b>Tirol</b>	38,7	45,1	19,7	29,8	39,5	<b>34,54</b>
<b>Vorarlberg</b>	8,0	7,7	3,6	5,9	9,1	<b>6,85</b>
<b>Wien</b>	16,7	22,4	3,8	20,6	29,8	<b>18,64</b>
<b>Summe Österreich</b>	<b>378</b>	<b>424</b>	<b>174</b>	<b>295</b>	<b>455</b>	<b>345,06</b>

Tabelle 2.4: Salzverbrauch für den Winterdienst in Österreich *Quelle: FSV-Ausschuss Winterdienst*

Der Preis für eine Tonne Natriumchlorid liegt bei etwa 80 - 100 €. Im Vergleich dazu: 500 g jodiertes Speisesalz kosten im Einzelhandel 0,39 €, was einem Preis von 624 € pro Tonne (ohne USt.) entspricht, also knapp dem 7-fachen.

## Kalziumchlorid $\text{CaCl}_2$

Kalziumchlorid (auch Calciumchlorid) mit der chemischen Formel  $\text{CaCl}_2$  hat eine Dichte von  $2,16 \text{ g/cm}^3$  bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und eine Löslichkeit in Wasser von  $740 \text{ g/l}$  bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .  $\text{CaCl}_2$  kommt zwar in der Natur als Solelösung vor, wird aber für die industrielle Verwendung hauptsächlich aus Salzsäure  $\text{HCl}$  und Calciumcarbonat  $\text{CaCO}_3$  hergestellt bzw. als Nebenprodukt bei der Sodaherstellung gewonnen. Die Kristallbildung ist unregelmäßiger als bei  $\text{NaCl}$ , 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  $\text{CaCl}_2$  gestreute Fahrbahn auch dann feucht aussieht, wenn kein Niederschlag fällt bzw. sich kein Reif bildet. Der Fahrer streut, da die Fahrbahn feucht ist und er ein Frieren des Wasserfilms befürchtet, obwohl die Feuchtigkeit erst durch das Salz auf die Fahrbahn gelangte.

Wie  $\text{NaCl}$  bildet auch  $\text{CaCl}_2$  eine eutektische Lösung, wobei der Gefrierpunkt weiter herabgesetzt wird. Deswegen wird es vor allem bei sehr tiefen Temperaturen angewendet. Hier allerdings praktisch immer nur zur Verwendung bei der Soleherstellung zur Anfeuchtung von Natriumchlorid, womit die Gefrierpunktherabsetzung des gesamten Streugutes praktisch keinen Unterschied verglichen mit reiner  $\text{NaCl}$ -Feuchtsalzzstreueung macht. Wichtiger ist hier jedoch, dass die Sole im Tank des Streufahrzeuges nicht während der Streufahrt friert. Dies wird durch die Verwendung von  $\text{CaCl}_2$  bei der Soleherstellung zuverlässig für bis zu  $-45 \text{ }^\circ\text{C}$  verhindert. Es wird in der Praxis jedoch bereits ab Temperaturen von weniger als  $-6 \text{ }^\circ\text{C}$  begonnen, mit Kalziumchlorid zu streuen.

Der Preis für eine Tonne Kalziumchlorid liegt bei etwa  $250 - 309 \text{ €}$ .

## Magnesiumchlorid $\text{MgCl}_2$

Magnesiumchlorid mit der chemischen Formel  $\text{MgCl}_2$  hat eine Dichte von  $2,32 \text{ g/cm}^3$  bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und eine Löslichkeit in Wasser von  $542 \text{ g/l}$  bei  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Magnesiumchlorid kommt in der Natur mineralisch gebunden und in Meerwasser vor. Wie Kalziumchlorid ist es stark hygroskopisch mit den gleichen oben beschriebenen Nachteilen. Der eutektische Punkt einer gesättigten  $\text{MgCl}_2$ -Sole liegt bei  $-33 \text{ }^\circ\text{C}$ . Es wird aus Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ), Chlor ( $\text{Cl}_2$ ) und Koks ( $\text{C}$ ) gewonnen und dient als Grundlage zur Gewinnung elementaren Magnesiums sowie als Lebensmittelzusatzstoff.

Der Preis für eine Tonne Magnesiumchlorid liegt bei etwa  $180 - 220 \text{ €}$ .

## 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 (die als Streugut eingesetzte Lösung hat einen CMA-Anteil von 25 %) 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  $-6 \text{ }^\circ\text{C}$  ganz ohne zusätzliche Streumittel auszukommen, so kann die gewünschte Doppelwirkung nicht immer erreicht werden. Da CMA nur als Flüssigkeit ausgebracht wird, kann es nicht mit den herkömmlichen Streumaschinen ausgebracht werden. Es sind reine Solestreuwägen zu verwenden, die so adaptiert sind, dass die Klebrigkeit von CMA keine Probleme verursacht. CMA wird nicht nur als Taumittel, 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 Geruchsbelästigung kommen.

Versuche und praktische Erfahrungen zeigen, dass CMA sich bei größeren Streumengen negativ auf die Griffbarkeit auswirken kann, was auch von einem Hersteller bestätigt wird [www.raw-bindemittel.de/fileadmin/pdf/ICE-DUST-AWAY-Fakten-v1.pdf, 2010]. Die erlaubte Höchststreuemenge liegt dadurch bei 10 g/m<sup>2</sup> und die Geschwindigkeit auf der Teststrecke ist mit 30 km/h zu begrenzen. Zusätzlich muss die Teststrecke noch als solche durch entsprechende Beschilderung (siehe Abbildung 2.11) ausgewiesen werden.

Die Europäische Kommission begann 1992 mit der Einführung eines Programmes zur Finanzierung umweltrelevanter Projekte, unter anderem auch dem *EU Life+ Projekt CMA*. Nach mehrmaliger Weiterführung wurde 2007 das Programm Life+ gestartet. Seit 1992 wurden mehr als 3000 Projekte mit einem Gesamtbudget von etwa 2 Mrd. € mitfinanziert. Das EU-Programm Life+ gliedert sich in drei Gruppen: LIFE+ Nature and Biodiversity, LIFE+ Environment Policy and Governance, 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. € wovon etwa 50% über Fördermittel des EU Life+ Programmes finanziert werden. Die teilnehmenden Städte sind in Österreich Klagenfurt, Lienz und Bruneck (Südtirol).

Der Preis für eine Tonne CMA liegt bei etwa 1200 € bis 1800 €.

### Kaliumkarbonat (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

Kaliumkarbonat mit der chemischen Formel K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> hat eine Dichte von 2,428 g/cm<sup>3</sup> 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, da es auch als Grundstoff für Düngemittel verwendet wird und der Markt hier starken Schwankungen unterliegt.

Der Preis für eine Tonne Kaliumkarbonat liegt bei etwa 320 € bis 540 €.

### Sonstige

Einige weitere Streumittel, die auf Straßen kaum zum Einsatz kommen, sind

- Harnstoff CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>
- Ammoniumsulfat (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>
- Natriumacetat Na(CH<sub>3</sub>COO)
- Kaliumformiat K(HCOO)

## Versuchsstrecke für eine saubere Luft



Abbildung 2.11: Beschilderung der Teststrecke in Bruneck *Quelle: www.life-cma.at*

## Vergleichstabelle verschiedener Tausalze

	Natriumchlorid	Kalziumchlorid	Magnesiumchlorid	CMA (25%ige Lösung)	Kaliumkarbonat
<b>Chemische Formel</b>	NaCl	CaCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	Ca <sub>x</sub> Mg <sub>y</sub> -(CH <sub>3</sub> COO) <sub>2(x+y)</sub>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
∅ <b>Kosten [€/to] (Stand 2010)</b>	90	270	200	1200–1800	320–540
<b>Hygroskopizität</b>	gering	stark	stark	stark	mittel
<b>Löslichkeit in Wasser [g/l]</b>	359	740	542	k.A.	1120
<b>eutektischer Punkt [°C]</b>	-21,3	-55	-33	-19	-36,5
<b>eutektische Konzentration [Masse-%]</b>	22,4	30,2	21,4	k.A.	39,5
<b>spez. Gewicht [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2,17	2,16	2,32	1,12	2,43

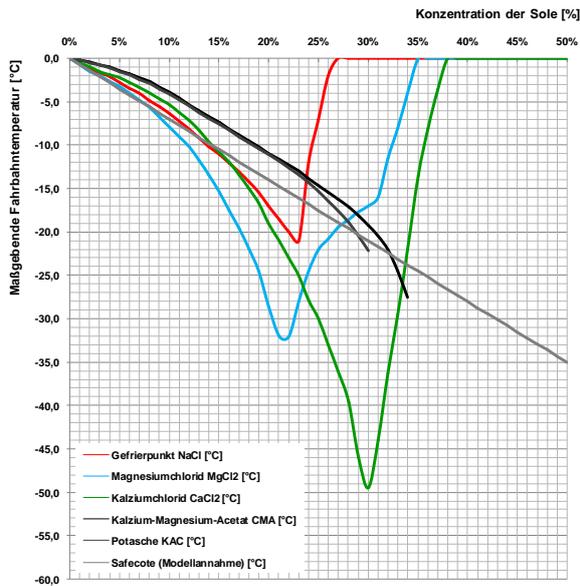
Tabelle 2.5: Gegenüberstellung der Eigenschaften verschiedener Tausalze

### 2.3.2 Eutektische Diagramme

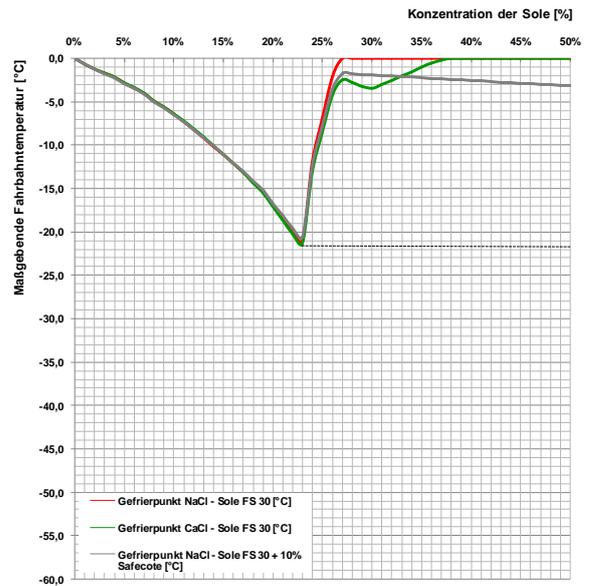
Bei der Beschreibung der Streusalze wurde von einer „eutektischen Lösung“ bzw. einem „eutektischen Punkt“ gesprochen, der im Fall von Salzlösungen jene Temperatur ist, bei der die Sole vom flüssigen in den festen Aggregatzustand übergeht, die Sole also gefriert. Dieser Punkt ist von der Solekonzentration, die in Gewichtsprozent angegeben wird, und den chemischen Eigenschaften des gelösten Salzes abhängig. Der tiefste Punkt des Diagrammes (siehe Abbildung 2.12) ist der „eutektische Punkt“, weiter als bis zu dieser Temperatur ist auch bei höherer Konzentration der Sole keine Gefrierpunktabsenkung möglich. Die Darstellung erfolgt in Diagrammen, bei denen sich aus jeder beliebiger Konzentration der Gefrierpunkt der Sole direkt ablesen lässt. Zu einer prognostizierten Fahrbahntemperatur lässt sich daraus umgekehrt auch die mindestens benötigte Konzentration ablesen, die notwendig ist, um ein Gefrieren zu verhindern.

Da, wie in Abschnitt 2.3.5 ausgeführt, der Anteil an Salzen zum Grundtaumittel NaCl allerdings gering ist, geht die Wirkung der starken Gefrierpunktserniedrigung verloren. Abbildung 2.12 zeigt die berechneten Gefrierpunktskurven auf Basis des in der Praxis üblichen Mischungsverhältnisses NaCl mit sonstigem Salz sowie die verschiedenen Salze in ihrer reinen Form in Abhängigkeit der Solekonzentration. Die Mischung aus NaCl und anderem Salz entsteht im Wesentlichen dadurch, dass die teureren anderen Salze nur zur Herstellung der Sole zum Einsatz kommen und NaCl immer noch den Hauptteil des Streugutes ausmacht.

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Diplomarbeit stand leider noch kein geeignetes Gerät zur Verfügung, um die berechneten Gefrierpunkt-Solekonzentrationen-Verläufe (siehe Abb. 2.12(b)) der fertig gemischten Streugüter zu bestätigen. Es wurden jedoch von der Firma MAPAG Analysen des Gefrierpunktes für verschiedene Mischungen im Auftrag der ASFINAG durchgeführt. Diese zeigen die zu erwartenden sehr geringen Auswirkungen auf die Gefrierpunktserniedrigung durch Zusatzstoffen, wenn die beigemischten Mengen relativ gering sind (siehe Abbildung 2.13). Der Gefrierpunkt kann an dem „Halteplateau“ das bei etwa -23 °C liegt, erkannt werden. Eigene Untersuchungen dazu werden noch im weiteren Verlauf des Projektes „Optimierung der Feuchtsalzstreuung“ durchgeführt.



(a) Reines Salz



(b) Streufertiges Gemisch

Abbildung 2.12: Eutektische Diagramme für reines Salz und fertig gemischtes Streugut

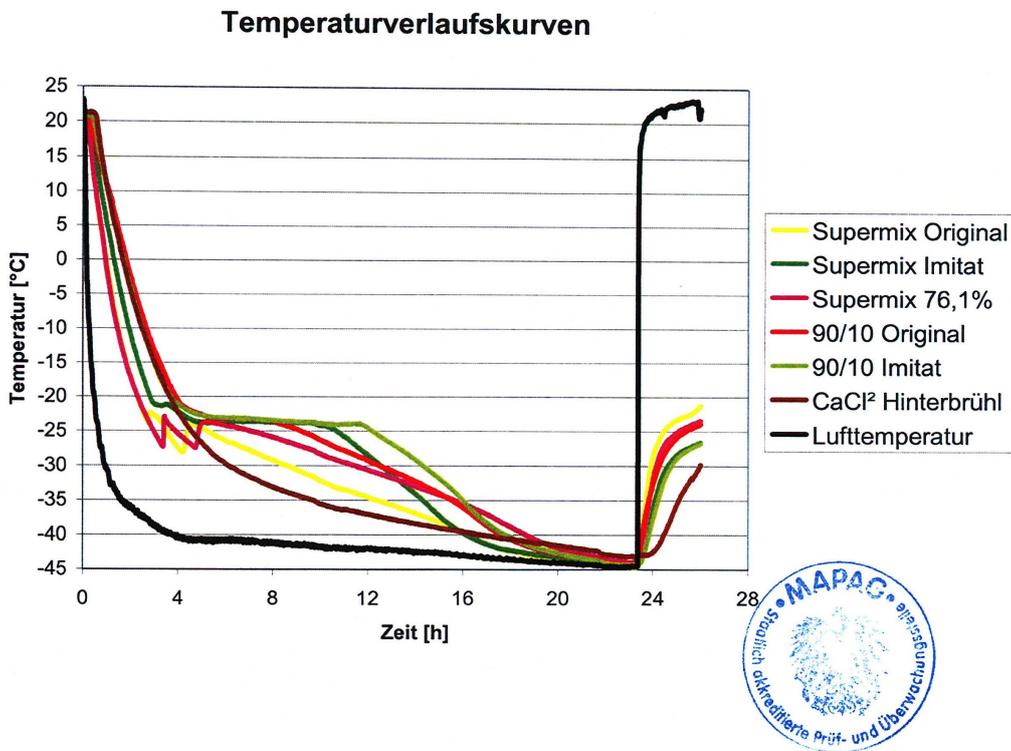


Abbildung 2.13: Gefrierpunktanalyse der Streumittel. *Quelle: MAPAG*

### 2.3.3 Zusammenhang Streumenge – Niederschlag – Gefrierpunkt

Aus den eutektischen Diagrammen lässt durch einige einfache Rechnungen und Ablesen der Werte aus dem entsprechenden Diagramm (z. B. Abbildung 2.16) der Zusammenhang des Gefrierpunktes mit der Niederschlagsmenge sowie der Streumenge herstellen. Im Folgenden werden zwei Beispiele beschrieben und anschaulich in Abbildung 2.14 und 2.15 dargestellt, um die begrenzte Tauleistung einer Streufahrt zu zeigen. In beiden Beispielen wird die Streumenge auf die tatsächlich wirksame Taumittelmenge bezogen, was nur bei einer Trockensalzstreuung der Fall ist, allfällige Abminderungen der Salzmenge bei Feuchtsalzstreuung werden in Kapitel 2.3.5 erläutert. Die Streumengen wird von den Streugeräte bei  $40 \text{ g/m}^2$  begrenzt und hier als Ausgangspunkt für folgendes Szenario angenommen.

#### Bsp.1: Gefrierpunkt bei maximalen Streumengen und 1 mm Niederschlag

Bei einer beliebigen Temperatur fällt 1 mm Niederschlag, was einer Wassermenge von  $1000 \text{ g}$  Wasser pro  $\text{m}^2$  bzw. einer Schneefallmenge von etwa  $1 \text{ cm}$  entspricht. Um ein Gefrieren dieser Niederschlagsmenge zu verhindern bzw. den Schnee zu tauen, wird mit der maximal möglichen Streumenge von  $40 \text{ g/m}^2$  gearbeitet. Bei einer gleichmäßigen Durchmischung des Niederschlages mit dem Salz entsteht eine Sole mit der Salzkonzentration von  $4 \%$ , die - wie in den eutektischen Diagrammen (Abbildung 2.16) abzulesen ist - eine Gefrierpunktserniedrigung um  $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$  erreicht.

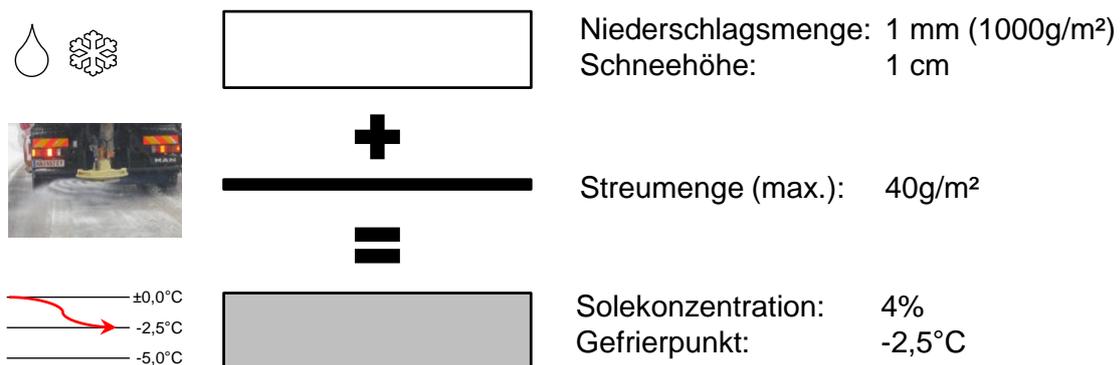


Abbildung 2.14: Gefrierpunktstemperatur bei maximaler Streumenge und 1 mm Niederschlag

Fällt die Fahrbahntemperatur also auf unter  $-2,5 \text{ }^\circ\text{C}$  oder fällt bei dieser Temperatur mehr Niederschlag, so beginnt der Wasserfilm zu frieren, und wenn keine weitere Streufahrt erfolgt, besteht in weiterer Folge Glättegefahr.

Dieses Beispiel zeigt, dass selbst bei Umlaufzeiten von 3 Stunden (Minimalwert für die ASFINAG) und Streumengen von  $40 \text{ g/m}^2$  (Maximalwert der Streugeräte) bereits sehr geringe Niederschlagsmengen zu einer Verdünnung der Sole führen, welche die Gefrierpunktsabsenkung durch den Streusalzeinsatz praktisch zunichte machen. Da ein Frieren nicht verhindert werden kann, braucht in weiterer Folge bei starken Schneefällen die Streumenge nur so groß sein, dass ein Anfrieren an die Fahrbahn verhindert wird. Dies nach praktischen Beobachtungen bereits mit Streumengen von  $5 \text{ g/m}^2$  bis  $10 \text{ g/m}^2$  möglich ist. Alles was darüber hinaus gestreut wird, ist nicht notwendig, da die gewünschte Wirkung nicht auftritt. Zusätzlich besteht noch die Gefahr, dass bei hohen Streumengen ein Teil des Niederschlages getaut wird, wenn er weiter verdünnt wird und danach wieder friert, da die Salzkonzentration absinkt und damit der Gefrierpunkt ansteigt. Dies erzeugt Eisplatten, die wesentlich rutschiger sind als Schneefahrbahnen, die ohne zusätzliche Streumengen entstehen.

## Bsp.2: Taubare Schneemenge mit 12 g/m<sup>2</sup> NaCl

Im zweiten Beispiel wird die maximal taubare Neuschneemenge bei einer durchschnittlichen Streuung und gegebener Temperatur berechnet. Um ein Frieren bei -5 °C zu verhindern, ist nach Abbildung 2.16 eine Solekonzentration von mindestens 8 % notwendig, wobei das Salz aus einer dem Durchschnitt entsprechenden Streuung mit 12 g/m<sup>2</sup> stammt. Auf diese 12 g Streusalz dürfen, damit die Konzentration 8 % nicht unterschreitet nur 150 g Niederschlag, also 0,15 mm Wasser bzw. 1,5 mm Schnee fallen, wenn ein Frieren bei -5 °C nicht auftreten soll.

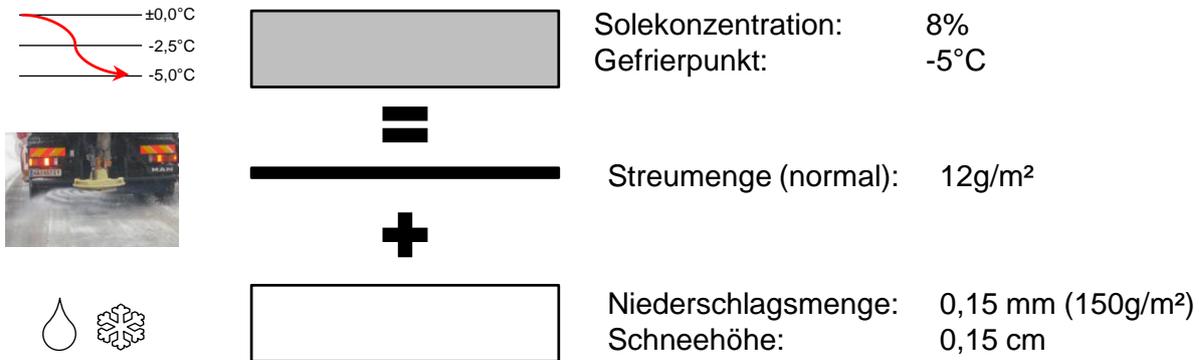


Abbildung 2.15: Niederschlagsmenge bei -5 °C und durchschnittlichen Streumengen

Dieses Beispiel zeigt auf, wie sensibel die Gefrierpunktstemperatur auf Niederschlag reagiert. Bei einer Streumenge von 12 g/m<sup>2</sup> die durchschnittlich an einem Winterdienstag ausgebracht werden, reicht bei Temperaturen von -5 °C, die in der Nacht oft erreicht werden, bereits die sehr geringe Niederschlagsmenge von 0,15 mm aus, die oft allein aus der Reifbildung entstehen kann.

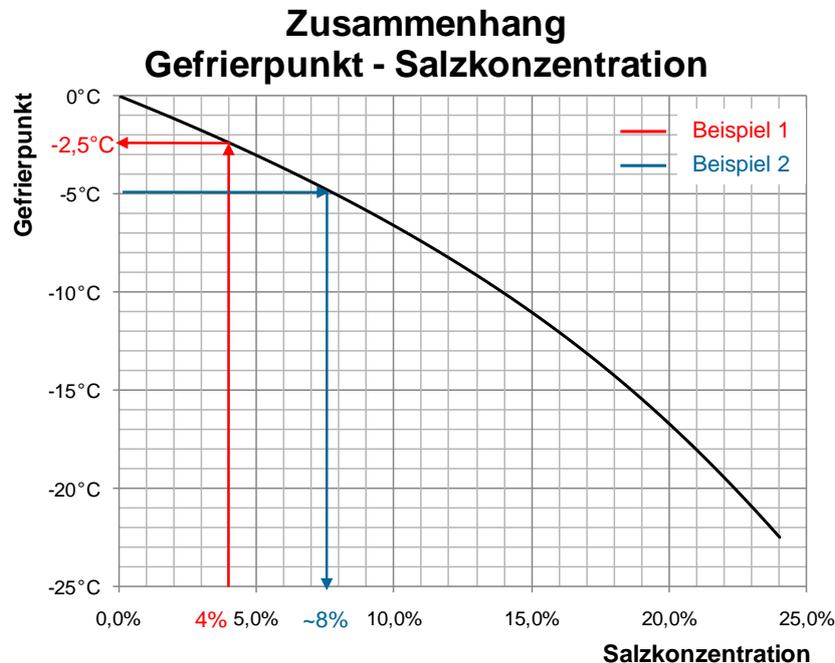


Abbildung 2.16: Eutektisches Diagramm für NaCl mit Ablesungen für Beispiele

Für beide Beispiele gilt, dass sie mit der effektiven Salzmenge gerechnet wurden, die unter der ausgebrachten Streugutmengung liegt und die beschriebenen Effekte daher noch stärker wirken.

### 2.3.4 Zusatzmittel

Zur Steigerung der Effizienz von Streugut werden verschiedene Zusätze eingesetzt. Man verspricht sich von diesen eine Verbesserung folgender Eigenschaften:

**Tauleistung** Hier wünschen sich die Straßenbetreiber bzw. die Winterdienstmannschaft ein „aggressiveres“ Verhalten des Streugutes, also eine möglichst unmittelbare und starke Tauwirkung nach der Streuung.

**Gefrierpunktsabsenkung** Viele der eingesetzten Stoffe haben einen deutlich niedrigeren eutektischen Punkt als Natriumchlorid. Durch die Beimengung wird sich eine deutliche Herabsetzung erwartet. Die Angaben zum Gefrierpunkt der Hersteller beziehen sich zumeist auf das Produkt in seiner reinen Form, nicht auf das endgültige Streugut, in dem das Produkt in der Regel einen sehr geringen Anteil ausmacht.

**Liegezeit** Tausalze werden durch mehrere Effekte, die genau in Abschnitt 5.2 beschrieben sind, von der Fahrbahn verdrängt. Mittels zumeist klebriger Eigenschaften der Zusatzmittel wird versucht, dieser Verdrängung entgegenzuwirken und so die notwendigen Streuintervalle verlängern zu können.

**Streubild** Dies betrifft die Verteilung des Streugutes durch das Streugerät während der Fahrt. Hier geht es vor allem um die Gleichmäßigkeit der Ausbringung und das Unterbinden der Verluste durch Verwehungen. Durch Forschung und Entwicklung von Seiten der Streugerätehersteller sind hier schon wesentliche Verbesserungen verwirklicht worden, die jedoch durch ein optimiertes Streugut noch weiteres Verbesserungspotential beinhalten.

#### Safecote

Safecote ist ein Nebenprodukt in der landwirtschaftlichen Industrie und wird seit etwa 15 Jahren in den USA als Enteisungsmittel verwendet. Die Firma Safecote Ltd vertreibt dieses Produkt in Europa, wobei die Verbreitung im deutschsprachigen Raum noch sehr gering ist. In Österreich wird Safecote derzeit von der ASFINAG testweise eingesetzt, es liegen jedoch noch keine zusammengefassten praktischen Erfahrungen vor. Einzelne Winterdienstfahrer haben jedoch im Allgemeinen gute Erfahrungen damit gemacht, wobei die Wirtschaftlichkeit nicht betrachtet und die Aussagen in Österreich noch nicht wissenschaftlich verifiziert wurden. Inhaltsstoffe von Safecote sind unter anderem Zucker, Stärke sowie weitere organische Stoffe. Physikalische und chemische Eigenschaften von Safecote sind Tabelle 2.6 zu entnehmen.

Physikalischer Zustand bei 25 °C	zähe Flüssigkeit
Farbe	dunkelbraun
Geruch	erdig, schwach karamellig, nicht stechend
Siedetemperatur	100 °C
Dichte bei 25 °C	1.330 kg/m <sup>3</sup>
pH-Wert	etwa 7

Tabelle 2.6: Eigenschaften von Safecote nach [Woodward, 2006]

Da noch keine Geräte zur Überprüfung des Gefrierpunktes im Labor vorhanden waren (siehe Abschnitt 2.3.2), werden Ergebnisse aus [Hagan, 2006] mit dem Verweis auf eigene Ergebnisse in nächster Zeit im Rahmen der weiterlaufenden Projekte am Institut herangezogen. Bei reinem

Safecote konnte kein eindeutiger Gefrierpunkt festgestellt werden, weil sich kein Halteplateau bis  $-72,5^{\circ}\text{C}$  gebildet hat. Die Flüssigkeit ist bei diesen tiefen Temperaturen jedoch schon sehr zäh, doch diese tiefen Temperaturen haben in der Praxis ohnehin kaum Bedeutung. Für Mischungen mit gesättigten Natriumchloridsolen (23 Gew.-%) liegen folgende Ergebnisse vor:

<b>Safecote:Sole</b>	<b>Gefrierpunkt Safecote</b>	<b>zusätzliche Gefrierpunkt-herabsetzung im Vgl. zu NaCl-Sole (<math>-21,3^{\circ}\text{C}</math>)</b>
10:90	$-27,1^{\circ}\text{C}$	5,8 K
20:80	$-30,8^{\circ}\text{C}$	9,5 K
30:70	$-32,3^{\circ}\text{C}$	11,0 K
40:60	$-37,1^{\circ}\text{C}$	15,8 K
50:50	$-40,4^{\circ}\text{C}$	19,1 K

Tabelle 2.7: Gefrierpunkte von Safecote-Sole Mischungen nach [Hagan, 2006]

In Österreich wird aufgrund des hohen Preises für Safecote nur 10:90 gemischt, wobei auch zu bedenken ist, dass der Effekt, so wie er in Tabelle 2.7 angegeben ist, nur für reine Sole-Safecote Streuungen gilt. Da bei FS30 der Anteil der Sole jedoch nur 30% ist und der Hauptanteil reines NaCl ist, wird der gewünschte Effekt nicht mehr erzielt. Ein weiterer vom Hersteller betonter Vorteil ist die rosthemmende Wirkung von Safecote. In Laborversuchen (siehe [Dicken, 2003]) wurde eine Reduktion der Korrosionsgeschwindigkeit um 80 % festgestellt, doch die praktische Bedeutung dieses Wertes ist fragwürdig, da die hohen Mischungsverhältnisse Safecote:Natriumchlorid der verwendeten Proben zumindest im deutschsprachigen Raum nicht verwendet werden.

Ein großer Kritikpunkt bei Safecote sind die organischen Bestandteile, die in die Umwelt gelangen, wovon besonders Flüsse betroffen sind. Hier wird befürchtet, dass der BSB5-Wert erhöht wird, also der Sauerstoffbedarf den Mikroorganismen zum Abbauen der Inhaltsstoffe von Safecote benötigen. Dabei wird allerdings so viel Sauerstoff von den Mikroorganismen verbraucht, dass für höhere Lebewesen wie Fische nicht mehr ausreichend Sauerstoff im Wasser vorhanden ist. Modellrechnungen in [Matthiessen, 2006] zeigen aber, dass keine oder nur sehr geringe Erhöhungen des BSB5 zu erwarten sind. Weiters wird darauf hingewiesen, dass Wasserorganismen kurze Schwankungen im Sauerstoffgehalt des Wassers ohne Schaden überstehen. Es gibt zu diesem Thema noch eine ganze Reihe anderer Untersuchungen, die aber ein zu großes Themenfeld umfasst, um näher darauf einzugehen.

Der Umfang an Untersuchungen im Gebiet der biologischen Verträglichkeit zeigt aber das Bewusstsein vor möglichen Schäden, wobei an dieser Stelle auch gesagt sei, dass Natriumchlorid ebenfalls nicht sonderlich umweltverträglich ist und zum Teil aus diesem Grund als Streumittel teilweise auch verboten ist. Trotzdem wird es nicht zuletzt aus Mangel an preiswerten Alternativen, häufig eingesetzt.

## Melasse

Durch den Einsatz von Safecote kam von Seiten der Straßenbetreiber die Idee auf, einfache Melasse, die als Nebenprodukt bei der Zuckerherstellung anfällt, in die Sole zu mischen. Die Ergebnisse bei versuchsweisen Einsätzen in der Praxis deuten Verbesserungen im Streubild an. Hier ist jedoch die Frage, ob die Verwendung von Melasse patentrechtlich zulässig ist, da die Firma Safecote Ltd in dieser Hinsicht einige Patente hält.

## Sonstige

Neben Safecote existieren noch andere Zusatzmittel, die ebenso meist als Abfall- bzw. Nebenprodukte in der chemischen oder landwirtschaftlichen Industrie anfallen. Da diese in Österreich jedoch nicht verwendet werden, wird nicht genauer darauf eingegangen. Einige Produkte sind:

- Methanol
- Ethylenglycol
- Ferrocyanide

### 2.3.5 Effektiver Taumittelanteil verschiedener Streugutzusammensetzungen

In den folgenden Überlegungen werden drei Begriffe eingeführt, die sich wie folgt definieren:

**Grundtaumittel** ist jenes Salz, das trocken und rieselfähig mitgeführt wird und dann mit der Sole vermischt wird. Bei FS30 macht es 70 % des gesamten Streuguts aus

**Solegrundmittel** ist jenes Salz, mit dem die Sole erzeugt wird. Bei FS30 macht die Sole einen Anteil von 30 % des Streugutes aus, hiervon sind wiederum 10 % bis 25 % Solegrundmittel (Salz)

**Zusatzmittel** sind jene Mittel, die der Sole beigemischt werden, um ein verbessertes Verhalten des Streugutes zu erreichen. Wie beim Solegrundmittel erfolgt die Mengenangabe in Prozent der Sole.

Als Grundstreumittel wird im allgemeinen Natriumchlorid (NaCl) verwendet, da es deutlich billiger ist und die Tauleistung den teureren Salzen im häufig vorkommenden Temperaturbereich von 0 °C bis 5 °C nicht sehr unterlegen ist. Kalziumchlorid wird bei der Feuchtsalzstreuung als Mittel zur Soleherstellung verwendet und stellt daher nur einen geringeren Teil als Natriumchlorid an der Gesamtmasse. Safecote wird nur als Zugabe bei der Soleherstellung verwendet und ist daher nur in sehr geringen Mengen im Streugut enthalten. Die Vorteile der teureren Salze bzw. Zusatzmittel sind in Abschnitt 6.6 zu finden.

In der folgenden Abbildung 2.17 sind vier Beispiele für Streugut aufgeführt, die häufig zur Anwendung kommen. Das ist die „normale“ Feuchtsalzstreuung, bei der ausschließlich Natriumchlorid verwendet wird, Streugut mit Safecote, wo die Sole wie bei der „normalen“ Feuchtsalzstreuung mit NaCl erzeugt wird, aber zusätzlich noch Safecote zugefügt wird, eine reine Solestreuung, bei dem kein trockenes Natriumchlorid mit der Sole vermischt wird, sowie eine Trockensalzstreuung, bei der keine Sole verwendet wird.

Wie zu erkennen ist, bleibt die Mischung bei Feuchtsalzstreuung (a) und Safecote (c) beinahe gleich, weil der Anteil an Safecote so gering ist. Aufgrund der hohen Kosten für Safecote (CaCl<sub>2</sub> liegt etwa im selben Bereich) sind aber die Kosten für das gesamte Streugut um etwa 12 % gestiegen. Was das für die Wirtschaftlichkeit und die Streuempfehlung bedeutet, wird in Abschnitt 6.6 erläutert. Trockensalzstreuungen (d) kommen dann in Frage, wenn die Fahrbahn ohnehin schon nass ist und das Salz sofort in Lösung geht. Reine Solestreuungen (b) sind nur für präventive Streuungen bei moderaten Temperaturen empfehlenswert, da der Anteil an Salz sehr gering ist.

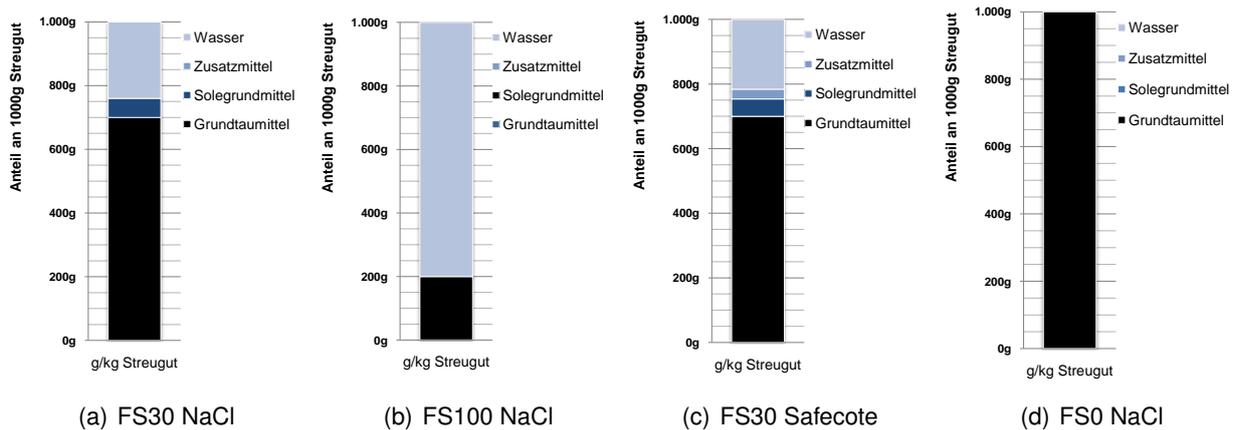


Abbildung 2.17: Anteil verschiedener Tausalze am gesamten Streugut

### 2.3.6 Streutechnologie

In den 1960er und 1970er Jahren wurde die Feuchtsalztechnologie eingeführt, mit der es möglich war den Salzverbrauch im Vergleich zur bis dahin üblichen Trockensalzstreuung deutlich zu reduzieren. Eine Umfrage publiziert in [Durth und Hanke, 2004, S. 143-147] ergab, dass ab etwa 1985 Feuchtsalzstreuung zur Standardmethode im kommunalen Winterdienst wurde, und auch auf höherrangigen Netzen hat sich Feuchtsalzstreuung durchgesetzt. Durch diese Reduktion wurde selbst im städtischen Bereich, wo vor allem Splitt gestreut wurde, auf Salz umgestellt. Da Natriumchlorid, das von der Fahrbahn abgewaschen wird und mit dem Niederschlag ins umgebende Erdreich gelangt für die dort wachsenden Pflanzen schädlich ist, wurde Natriumchlorid oft zum Teil als Taumittel verboten. Weil die Alternative dazu, die Splittstreuung, aber unter Umständen eine große Menge an gesundheitsschädlichem Feinstaub erzeugt, wird aktuell davon wieder abgesehen und zur Salzstreuung zurückgekehrt.

#### Streustoffverteiler

Im Laufe der Zeit hat sich die Technik der Feuchtsalzausbringung immer weiter verfeinert. In Abbildung 2.18 ist ein Streustoffverteiler mit Produktnamen OptiWet® der Firma Küpper-Weisser GmbH skizziert, der den aktuellen Stand der Technik darstellt. In der Skizze ist die Dosierschnecke zu erkennen, die das rieselfähige Trockensalz sowie die Beimengung der Sole durch eine Düse fördert, womit eine homogene Durchmischung von Salz und Sole gewährleistet werden kann.

Durch den Knick wenig oberhalb des Streutellers wird ein gleichmäßigeres Auftreffen des Feuchtsalzes auf den Streuteller und damit auch eine gleichmäßigere Ausbringung auf die Straße ermöglicht. Der ganze Streustoffverteiler ist durch mehrere hydraulische Komponenten flexibel und erlaubt eine exakte Ausrichtung des Streutellers in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Streufahrzeuges. Zusammen mit der gleichmäßigen Verteilung wird auch die Streubreite geregelt, um das Salz auf der gesamten Fahrbahn, doch nicht darüber hinaus zu verteilen. Die Ansteuerung erfolgt komplett elektronisch und

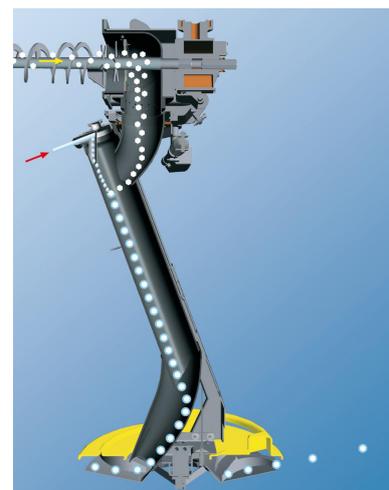


Abbildung 2.18: Streustoffverteiler  
Quelle: Küpper-Weisser GmbH

ist soweit wie möglich automatisiert, was für den Winterdienstfahrer eine große Erleichterung darstellt und eine optimale Nutzung der Technologie garantiert.

## Taumittelsprühanlagen

In eine ganz andere Richtung geht die Entwicklung fix verbauter Taumittelsprühanlagen wie sie in Abbildung 2.19 dargestellt ist. Diese sind wie Bewässerungsanlagen aufgebaut und können durch eine Zentrale gesteuert werden. In Kombination mit einem System aus Sensoren wird theoretisch eine optimale Ausbringung von Taumittel möglich, da keine Einschränkungen durch Umlaufzeiten oder ähnliches gegeben sind. Praktisch ist jedoch der Einbau solcher Anlagen mit hohen Kosten verbunden und wird daher nur an glättegefährdeten Stellen wie Brücken oder verkehrsrelevanten Stellen wie Steigungen durchgeführt. Diese Sprühanlagen sind an eine Reihe von Sensoren gekoppelt, über die die Notwendigkeit und die Stärke der Sprüfung ermittelt werden, wobei noch eine Fahrzeugerkennung notwendig ist, da die Sprühanlage nicht die Fahrzeuge besprühen soll. Genaue Untersuchungen zur Funktionsweise und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen wurden in [Wirtz u. a., 2006] veröffentlicht. Günstigere Randbedingungen für den Einsatz dieser Technologie bieten Flughäfen, da bei der Anwendung der Taumittelsprühanlagen keine Fahrzeuge mehr die Start- bzw. Landebahnen durch ihren Winterdienstinsatz blockieren.



Abbildung 2.19: Taumittelsprühanlage  
Quelle: Boschung

## Wetterstationen und Datenerfassung

In den letzten beiden Jahrzehnten sind neben den gewöhnlichen Wetterstationen eine ganze Reihe neuer Sensoren entwickelt worden, die es ermöglichen die Wasserfilmdicke, den Gefrierpunkt des Wasserfilms, den Zustand des Filmes auf der Fahrbahn (Wasser, Schnee oder Eis) sowie andere Parameter automatisch zu erfassen. Viele Geräte sind mittlerweile so klein und unempfindlich, dass sie an Fahrzeugen montiert werden können und so nicht nur punktuelle Messungen sondern durchgängige, über das gesamte Straßennetz gehende Messreihen erlauben. In diesem Bereich wird derzeit an vielen unterschiedlichen Projekten geforscht und es ist zu erwarten, dass in naher Zukunft eine gesicherte Datenbank entstehen wird, die nach Auswertung und Modellrechnungen weitere Optimierungen des Winterdienstes erlaubt.



Abbildung 2.20: Wetterstation  
Quelle: Vaisala

Da die Streufahrten nur durch einen Fahrer ohne Beifahrer durchgeführt werden, muss die Bedienung des Streugerätes sehr intuitiv und in kurzer Zeit geschehen können, da der Fahrer sich eigentlich auf das Geschehen auf der Straße konzentrieren muss. Vor allem wenn mit einem Pflug geräumt wird, bleibt keine Zeit sich lange mit dem Streusystem auseinanderzusetzen. Hier wird ebenfalls von der Firma Küpper-Weisser GmbH ein Bedienelement vertrieben, das auf diese Anforderungen eingeht. Dieses Element erlaubt auch eine Kommunikation mit einer Basisstation

und damit eine weitgehende Automatisierung der Streuung, wobei der Fahrer diese oft manuell korrigieren kann bzw. muss. Diese Überbrückung ist vor allem bei Stellen der Fall, die besonders gefährdet sind, von den Sensoren aber nicht erfasst werden können bzw. nicht in der Systemdatenbank gespeichert sind, dem Fahrer aber durch langjährige Erfahrung bekannt sind. Solche Stellen sind z. B. Brücken, Tunnelportale, das Ende von Lärmschutzwänden, topografisch exponierte Lagen etc.

Der steigende Einsatz von Computerprogrammen, automatischer Datenerfassung und sich weiterentwickelnder Vernetzung führte konsequenterweise zum Versuch, die Streumenge über direkt vom Fahrzeug erfassten Daten zu steuern. Nach derzeitigem Stand der Recherche ist aber noch keines dieser Systeme ausgereift. Die Verwendung von GPS-Sensoren mit der vom Streugerät erfassten Streumenge und der vom Fahrzeug gefahrenen Geschwindigkeit erlaubt eine sehr genaue Dokumentation der ausgebrachten Salzmenge, die sehr weit über die bisher üblichen Protokolle hinaus geht. Aus den so gewonnenen Daten können für den Einkauf des Salzes sowie die Einsatzplanung der Straßenmeistereien wertvolle Daten gewonnen werden. Ein weiterer, vor allem für Straßen mit Bemaßung wichtiger Punkt ist die genaue Dokumentation des Streudienstes im Fall eines Rechtsstreits nach einem Unfall, da im Unfallprotokoll der Polizei meist „nicht gestreut“ vermerkt ist, wenn kein Splitt auf der Straße liegt, da Salz auf feuchten Straßen mit bloßem Auge nicht erkennbar ist.

## 2.4 Skizze Winterdienstmodell

Mit Kenntnis der grundlegenden Wirkungsmechanismen der Griffigkeit, Streumittelwirkung und eingesetzten Streutechnologie war es möglich, eine Winterdienstmodelle zu skizzieren. Als wesentliche Eingangsparameter in das Modell kristallisierten sich folgende Faktoren heraus:

- Verkehrsmenge
- Niederschlagsmenge
- Streugut
- Witterungssituation (Temperaturen)

Daraus soll in einem modular aufgebauten Modell eine Verbindung zu dem Abfall der Griffigkeit auf Schnee- bzw. Eisfahrbahn hergestellt werden. Der vorgesehene modulare Aufbau wie in Abbildung 2.21 ist aus Gründen der leichten Erweiterungsmöglichkeit von Beginn an eine wichtige Randbedingung in der Modellentwicklung gewesen.

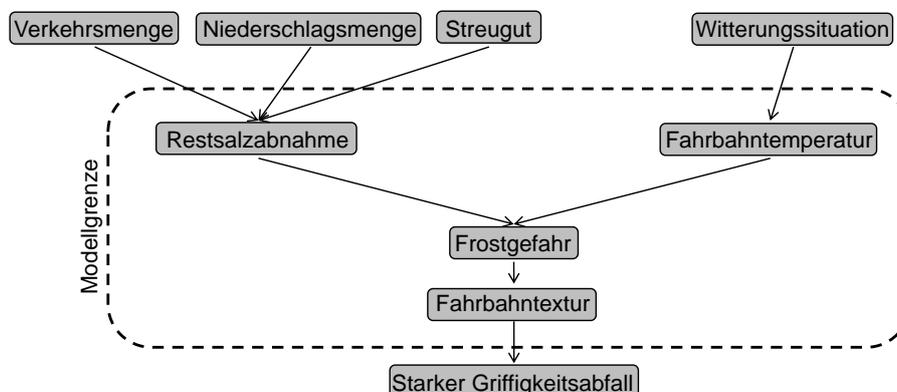


Abbildung 2.21: Schema des Winterdienstmodelles

# Kapitel 3

## Feldmessungen

Die ersten Modellüberlegungen machten schnell klar, dass für eine Erfassung der physikalischen und chemischen Mechanismen des Winterdienstes eine Reihe von Feldmessungen notwendig sein würden. Die Messungen begannen im Jänner 2010 und gingen bis zu den letzten Wintertagen im März 2010, wobei das Messequipment in dieser Messperiode laufend erweitert wurde. Die Erfahrungen mit den verschiedenen Messsystemen wird für weitere Feldmessungen im Rahmen der weiterlaufenden Winterdienstprojekte im Winter 2010/11 von großem Nutzen sein, da ab den ersten Wintertagen gestartet werden kann.

Einen Überblick über das Messprogramm geben die Tabellen 3.1 und 3.2.

Messgröße	Messsystem	Abstand der Messung
Griffigkeit	Griptester	1 m
Lufttemperatur	Vaisala DST 111	60 m bis 120 m
Luftfeuchtigkeit	Vaisala DST 111	60 m bis 120 m
Fahrbahntemperatur	Vaisala DST 111	60 m bis 120 m
Filmdicke Wasser	Vaisala DSC 111	60 m bis 120 m
Filmdicke Schnee	Vaisala DSC 111	60 m bis 120 m
Filmdicke Eis	Vaisala DSC 111	60 m bis 120 m
Position (GPS)	Vaisala DSC 111	60 m bis 120 m
Restsalzmenge	Boschung SOBO 20	Punktmessungen
Temperaturverteilung	Testo Wärmebildkamera	Punktmessungen

Tabelle 3.1: Gemessene Parameter

Datum	Messstrecke	Anzahl der Messfahrten	Wettersituation
12.01.2010	A10 Tauernautobahn	4	Schneeregen
13.01.2010	Parkplatz & A 10	3 & 14	leichter Schneefall (0,2 cm/h)
18.01.2010	A10 Tauernautobahn	12	Reifbildung
19.01.2010	Parkplatz	8	Schneefahrbahn
20.01.2010	Parkplatz	8	Schneefahrbahn
10.02.2010	A10 Tauernautobahn	8	Schneeregen
11.02.2010	A10 Tauernautobahn	4	leichter Schneefall (0,2 cm/h)
04.03.2010	A10 Tauernautobahn	10	mäßiger Schneefall (0,5 cm/h)
05.03.2010	A10 Tauernautobahn	14	mäßiger Schneefall 0,5 cm/h)

Tabelle 3.2: Messtage

## 3.1 Messgeräte

Für die Feldmessungen im Winter 2010 wurden einige schon am Institut vorhandene Messgeräte verwendet sowie einige weitere, die für den Messzeitraum geliehen wurden. Für den Griptester liegen schon viele Messreihen und damit auch ein ausreichender Erfahrungshintergrund vor, weshalb praktisch keine Einarbeitungszeit notwendig war. Bei neuem Equipment wie etwa den Kameras der Firma Vaisala lag noch keine praktische Erfahrung am Institut vor, da diese in dem verwendeten Messaufbau noch nicht eingesetzt wurden.

### 3.1.1 Griptester

Die Griffigkeit der Fahrbahn wurde mit dem Griptester MKII der Firma Findley Irvine gemessen. Das Gerät lässt sich prinzipiell im Schubbetrieb (von Hand) oder im Zugbetrieb (als Anhänger hinter einem PKW) betreiben. Für die Messungen auf der Tauernautobahn kam nur das Zugprinzip zum Einsatz, wobei als Zugfahrzeug ein VW-Transporter diente. Dieser war mit einem Tempomaten ausgestattet, was es ermöglicht hat, die Messgeschwindigkeit von 60 km/h sehr genau zu halten und nicht in die Gefahr zu kommen, die 3 km/h Toleranzgrenze, die für wiederholte Messfahrten gilt, zu überschreiten. Das Gerät hat drei Reifen, wovon zwei die an einer Achse sitzenden Laufräder sind, die über eine Kette das dritte Rad (Messreifen) antreiben. Die Übersetzung des Kettenantriebes ist so gewählt, dass der Messreifen einen konstanten Schlupf von 15 % hat. Die Messung der Griffigkeit erfolgt über Dehnmessstreifen in der Achse des Messrades, die eine durch die Reibung Reifen - Fahrbahn entstehende Verzerrung der Achse messen, welche in einen Griffigkeitswert umgerechnet wird.



Abbildung 3.1: Griptester MKII

Die Messungen wurden kontinuierlich durchgeführt und die gesamte Strecke, also auch die Tunnel, die nur eine Abgrenzung zwischen den einzelnen Abschnitten darstellen, gemessen. Eine Trennung der Abschnitte erfolgte erst im Zuge der Auswertung. Der Griptester liefert die Werte *Messlänge*, *Messgeschwindigkeit* und *Griffigkeit* für jeden Meter der gesamten Messstrecke. Im Normalfall wird bei Messungen mit dem Griptester ein definierter Wasserfilm aufgebracht, um den kritischeren Bereich der nassen Fahrbahn zu testen und den Messreifen zu schonen. Dies geschieht über einen Stutzen direkt vor dem Messrad, wie in Abbildung 3.1 zu erkennen ist. Das benötigte Wasser wird in einem Tank im Messfahrzeug mitgeführt und mittels einer Pumpe und eines per Software regelbaren Ventils ausgebracht. Messungen im Temperaturbereich von Minusgraden sind mit Wasser nicht möglich, da die Gefahr besteht, dass sich Eis bildet, das dem Gerät schaden kann oder, wenn es auf der Fahrbahn gefriert, zu einer Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit führen kann. Deshalb ist bei den im Winter durchgeführten Messungen auf Wasser verzichtet worden, da die Fahrbahn in den meisten Fällen ohnehin feucht war.

Eine Unbekannte für die Griffigkeitsmessungen stellen die Zwischenmedien Schnee, Eis bzw. Schneematsch dar, für die mit dem Griptester noch keine ausreichenden Erfahrungen vorlagen. In Skandinavischen Ländern wurden Griffigkeitsmessungen auf Schnee durchgeführt allerdings mit anderen Messsystemen bzw. (profilierten) Messreifen. Zwischenmedium bezeichnet jenen Stoff, der sich zwischen dem Messreifen des Griptesters und der Fahrbahn befindet. In den standardisierten Messfahrten wird wie erwähnt Wasser als Zwischenmedium verwendet, wofür eine

genormte Auswertung möglich ist. Das Hauptproblem mit dem Zwischenmedium stellt die Form des Reifenprofils dar, das beim Messreifen des Griptesters im Gegensatz zum Messreifen des RoadSTAR bzw. KFZ-Reifen keine Profilierung aufweist. Durch den glatten Reifen kann das Zwischenmedium nicht bzw. nur in geringerem Ausmaß verdrängt werden, wodurch es vorkommen kann, dass der Messreifen die Haftung mit der Fahrbahn verliert. Hierdurch kann es vorkommen, dass die gemessene Griffigkeit unter jener für KFZ-Reifen liegt. Somit liegt die gemessene Griffigkeit an der Untergrenze und damit auf der sicheren Seite. Eine Umrechnung der Griffigkeitswerte vom Messsystem Griptester auf RoadSTAR findet sich in [Spitzer, 2010] und basiert auf einer linearen Regression auf Grundlage umfangreicher Messreihen.

$$\mu_{RS} = \mu_{GT, MK2,60} + 0,21 \quad (3.1)$$

Es bedeuten:

$\mu_{RS}$  - Griffigkeitsbeiwert RoadSTAR [-]

$\mu_{GT,60}$  - Griffigkeitsbeiwert Griptester MarkII [-]

### 3.1.2 Vaisala Kameras

Auf dem Dach des VW-Transporters waren zwei Kameras der Firma Vaisala installiert, wovon eine die Witterung und die zweite die Filmdicke auf der Fahrbahn gemessen hat. Die kleinere Kamera (Nr. 1 in Abbildung 3.2), die die Witterung misst, gibt folgende Werte aus: *Lufttemperatur*, *Luftfeuchtigkeit*, *Fahrbahntemperatur* sowie die *Taupunkttemperatur*. Die zweite Kamera (Nr. 2) misst mittels eines optischen Verfahrens die Filmdicke und den Zustand des Flüssigkeitsfilms auf der Fahrbahn. Die ausgegebenen Werte sind *Wasserfilmdicke*, *Eisfilmdicke* und *Schneefilmdicke*, wobei sich der Flüssigkeitsfilm auch aus einer Kombination der drei ergeben kann, sowie eine aus diesen Parametern berechnete *Griffigkeit*. Beide Kameras sind so justiert, dass sie direkt hinter dem Messfahrzeug messen. Dabei ist die Kamera, die die Filmdicke misst, auf die rechten Rollspur, in der auch der Griptester misst, ausgerichtet. Beim Ausrüsten der Kameras mit neuer Software und geänderter Datenausgabe ist durch den Wegfall der Verzögerung in der Anzeige der Messwerte ein systematischer Messfehler entdeckt worden, der die Fahrbahntemperatur betrifft. Um die Temperatur mit allen anderen Messwerten verknüpfen zu können, wurde diese ebenso in der rechten Rollspur des Messfahrzeuges gemessen. Genau dort verläuft allerdings auch die Auspuffanlage, die durch ihre Wärmeabstrahlung die gemessenen Werte verfälscht. Der Messfehler der mit der Vaisala-Kamera während der Fahrt gemessenen Temperaturwerte konnte durch Vergleichsmessungen mit ca.  $+2^{\circ}\text{C}$  bestimmt werden. Dies gilt für alle in dieser Arbeit angegebenen Fahrbahntemperaturwerte, die mit dem Vaisala-Kameras ermittelt wurden. Für weitere Messungen ist die Position der Kamera entsprechend abgeändert worden, um diesen Effekt auszuschließen.



Abbildung 3.2: Vaisala Kameras

Zusätzlich war das System mit einem GPS-Sensor ausgestattet, der es ermöglicht, die gewonnenen Daten geographisch zuzuordnen. Die gesamten Daten konnten jedoch nur über die Homepage der Firma Vaisala bezogen werden, was den Nachteil hat, dass nur ein Wert alle 3-6 Sekunden ausgegeben wird, was bei einer Messgeschwindigkeit von 60 km/h etwa 50 m bis 100 m

entspricht. Die gemessenen Daten werden noch während der Messfahrt über ein GSM-Netz an einen Server gesendet, der diese dann online verfügbar macht.

Durch die Erfassung der Daten im Intervall einiger Sekunden entsteht bei der Kombination der Griptester- und Vaisaladaten folgendes Problem: Bei einer Messlänge von etwa 8 km kommen also auf 8000  $\mu$ -Werte des Griptesters nur etwa 180 Temperatur- und Fahrbahnzustandswerte. Bei den Temperaturdaten ist dies nicht ausschlaggebend, da hier innerhalb von 80 m nicht mit großen Differenzen zu rechnen ist. Bei den Werten für die Filmdicke ist dies allerdings ein Problem, da feuchte oder gar eisige Stellen, die zu einem lokal begrenzten Absinken der Griffigkeit führen, nicht erfasst werden.

In Tabelle 3.3 ist ein Auszug aus den Daten der Vaisala-Kameras dargestellt, die über die Homepage des Unternehmens bezogen wurden. Die ausgegebenen Werte sind Zeit, Lufttemperatur und -feuchtigkeit, Taupunkt- und Oberflächentemperatur, Griffigkeit berechnet aus Temperatur und Filmdicken, Oberflächenzustand der hier Zahlenkodiert dargestellt ist, Wasser-, Eis- und Schneefilmdicke in Millimeter und GPS Koordinaten. DST und DSC steht für die Funktionstüchtigkeit der jeweiligen Kamera.

Time	Air T [°C]	H.R [rel. %]	Dew [°C]	Surf T [°C]	DST	Friction [-]	Surface State	Water [mm]	Ice [mm]	Snow [mm]	DSC	Lat. [° (GPS)]	Long. [° (GPS)]
00:21:08	-1,1	87	-3	1	1	0,81	1	0	0	0	1	47,48065	13,19563
00:21:12	0,7	74	-4,7	1	1	0,81	2	0,01	0	0	1	47,48123	13,19534
00:21:17	0,7	74	-4,7	1	1	0,81	2	0,01	0	0	0	47,48194	13,19495
00:21:19	0,7	74	-4,7	1	1	0,78	3	0,12	0	0	1	47,48223	13,19479

Tabelle 3.3: Beispiel für gewonnen Daten der Vaisala-Kameras

### 3.1.3 Infrarotkamera

Die Temperaturmessung der Fahrbahn mithilfe der Vaisala-Kameras erfolgt zwar kontinuierlich, aber immer in einer Messspur, die innerhalb der rechten Rollspur des ersten Fahrstreifens liegt. Um die Verteilung der Temperatur quer zur Fahrbahnachse festzustellen, wird eine Wärmebildkamera eingesetzt. Die Sensoren in der Kamera nehmen die elektromagnetische Strahlung im Bereich des Infrarotspektrums (Wellenlänge 760 nm bis 1 mm) auf, die von einem Körper ausgeht.

Da es sich um ein berührungsloses Verfahren handelt, kann nur die Oberflächentemperatur bestimmt werden und das Trägermedium der Strahlung (Luft) hat einen Einfluss auf die Messungen. Weitere Einflussgrößen sind Materialzusammensetzung, Oxidschicht auf der Oberfläche, Rautiefe der Oberfläche. Die Messgenauigkeit mit der verwendeten Thermokamera ist noch nicht ganz geklärt, der Hersteller gibt diese mit  $\pm 2^\circ\text{C}$  bzw.  $\pm 2\%$  des Messwertes an. Diese liefert ein Infrarotbild der Fahrbahnoberfläche, das per mitgelieferter Software eine Auswertung anhand einer vom Benutzer festgelegten geraden Linie zulässt. In Abbildung 3.4 ist eine thermografische Aufnahme einer Landesstraße von Februar 2010 dargestellt. Diese vierspurige Stadtstraße mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 30 km/h zeigt in der Auswertung schon deutliche Unterschiede zwischen Rollspur und den daran angrenzenden Flächen. Der rechts dargestellte Temperaturverlauf wird durch die Software erstellt, die entlang der vom Benutzer festgelegten Linie *P* die Temperaturen auswertet. So aufbereitete Daten



Abbildung 3.3: Wärmebildkamera

lassen sehr gute Schlüsse auf den Temperatureintrag durch den Fließverkehr zu, wobei die Datenaufbereitung durch die Software sehr rasch geht und schnell brauchbare Ergebnisse liefert.

Aufgrund der Auswertung verschiedener thermografischer Messaufnahmen kann geschlossen werden, dass je nach Verkehrsstärke und Temperaturverhältnissen die Fahrbahntemperatur in der Rollspur um etwa  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  höher ist als auf nicht befahrenen Stellen. Diese Differenz kann durch den Wärmeeintrag des abrollenden KFZ-Reifens erklärt werden, bei denen durch Verformung des Gummis Wärme entsteht und diese dann auf die Fahrbahn übertragen wird. Im Modell wird diese Differenz nicht berücksichtigt und als Reserve gesehen, da eine kurze Unterbrechung des Verkehrs zu einem raschen Ausgleich führt und diese Unterbrechungen plötzlich und unerwartet auftreten können. Da durch die Infrarottechnik nur die Oberflächentemperatur erfasst wird, können keine Aussagen über Temperaturen auch nur knapp unter der Oberfläche gemacht werden. Etwaige Gefrierprozesse geschehen aber an der Fahrbahnoberfläche somit ist diese gemessene Temperatur auch die ausschlaggebende.

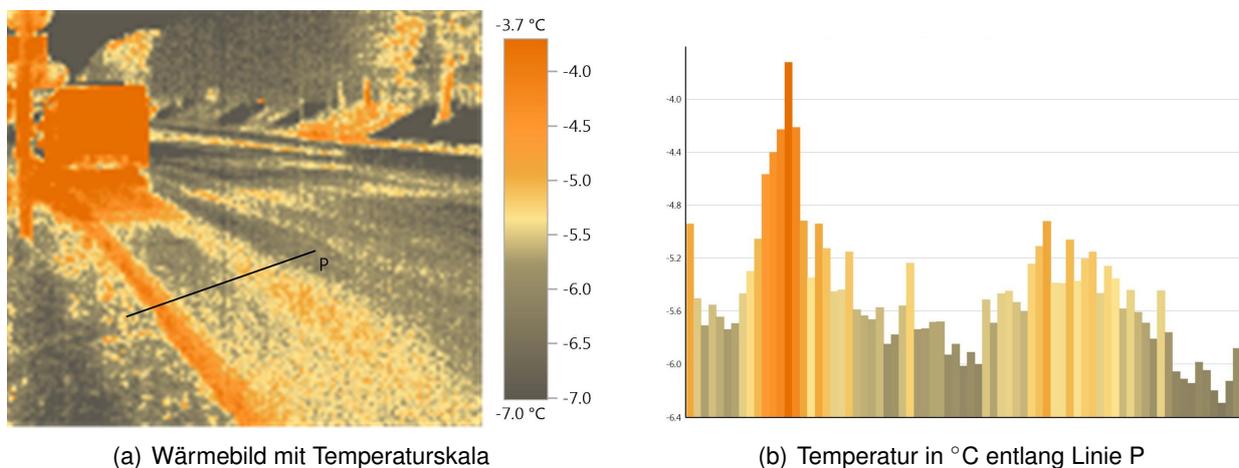


Abbildung 3.4: Wärmebildaufnahme und Auswertung, Klagenfurt Völkermarkter Straße

### 3.1.4 Restsalzmessgerät

Zur Bestimmung der Abnahmegeschwindigkeit des Restsalzes auf der Fahrbahn ist es nötig, Kenntnis über den zeitlichen Verlauf der Restsalzmenge zu haben. Das Gerät *SOBO 20* der Firma Boschung erlaubt eine punktweise Messung, durch die auf den zeitlichen Verlauf derselben geschlossen werden kann.

Das Messprinzip beruht auf der elektrischen Leitfähigkeit einer Salzlösung, die mit Zunahme des gelösten Salzes ebenfalls zunimmt. Reines  $\text{H}_2\text{O}$  oder reines  $\text{NaCl}$  leiten keinen elektrischen Strom, eine Salzlösung wegen der frei beweglichen  $\text{Na}^+$ -Ionen hingegen schon. Für die Messung des elektrischen Widerstandes ist also eine gewisse Flüssigkeitsmenge nötig, wenn auch kristallines Salz gemessen werden soll. Diese wird durch das Gerät selbst aufgebracht, dessen Zylinder hohl ist und dort eine definierte Messflüssigkeit beinhaltet, die aus 85 % destilliertem Wasser und 15 % technischem Aceton besteht, um ein Gefrieren bei Temperaturen unterhalb des Nullpunktes (was bei Restsalzmessungen meist der Fall ist) zu verhindern. Das Messgerät ist auf  $\text{NaCl}$  und  $\text{CaCl}_2$  kalibriert, was ein direktes Ablesen der Restsalzmenge in  $\text{g}/\text{m}^2$  erlaubt, wenn diese Taumittel verwendet werden. Beim Einsatz des Zusatzmittels Safecote ist zu beachten, dass dieser die Leitfähigkeit stark erhöht und so überhöhte Werte abgelesen werden, die nicht der Restsalzmenge entsprechen. Eine Umrechnungsformel für Werte, die bei Verwendung von Safecote abgelesen werden, wird bei Labormessungen ab Herbst 2010 bestimmt.

Die Handhabung des Gerätes ist relativ einfach und damit auch in kurzen Einschulungen zu erklären. Es muss der Zylinder mit der Messflüssigkeit befüllt werden und beim Zudrehen der Kappe darauf geachtet werden, dass das Ventil sauber ist. Zur Messung ist das Gerät einzuschalten und danach einfach mit dem Griff auf den Boden zu pressen. Dadurch wird die Messflüssigkeit in die Messkammer geleitet, an der seitlich die Elektroden zur Widerstandsmessung sitzen. Nach dem Hinunterdrücken kann an der Digitalanzeige der Wert der Restsalzmenge in  $\text{g/m}^2$  abgelesen werden.

Der Wert pendelt sich innerhalb von 1 - 2 Sekunden ein und kann dann notiert werden. Direkt nach dem Hinunterpressen ist der Wert oft noch geringer, da es kurze Zeit dauert, bis eventuell kristallisiertes Salz mit der Messflüssigkeit in Lösung geht. Um gesicherte Ergebnisse zu erhalten, müssen für einen Messwert mehrere Messungen (3 bis 5) durchgeführt und aus diesen der Mittelwert gebildet werden.

Wird das Gerät nach längeren Pausen wieder verwendet, muss erst einige Male hinabgedrückt werden, bis die Messflüssigkeit in ausreichender Menge in die Messkammer gelangt und Messungen möglich sind.



Abbildung 3.5: SOBO 20 Restsalzmessgerät

## 3.2 Messstrecke

### 3.2.1 Versuche auf der Autobahn

Für die Wahl einer geeigneten Messstrecke mussten folgende Dinge beachtet werden.

**Verkehrszählstelle** In unmittelbarer Nähe der Probestrecke sollte sich (auf demselben Straßenzug) eine Anlage zur automatischen Erfassung der Verkehrsstärke befinden, um den Einfluss des Verkehrs berücksichtigen zu können. Ideal ist es, wenn zusätzlich kein KFZ auf die Messstrecke zufahren bzw. diese verlassen kann (z. B. zwischen zwei Autobahnauffahrten).

**Abschnitte** Sollen Messungen verschiedener Taumittel zur gleichen Zeit, also unter gleichen Wetter- und Verkehrsbedingungen, ermöglichen. Die Abschnitte sollten so lang sein, dass aussagekräftige Messungen möglich sind, aber keine zu großen Entfernungen überwunden werden müssen.

**Wetterdaten** Um den Witterungseinfluss, insbesondere den Niederschlag, festzustellen, ist eine automatische Wetterstation in der Nähe der Messstrecke notwendig. Die Wetterdaten werden von Meteorologen gewonnen und in eine, für die Zuordnung der vorherrschenden Wetterszenarien, brauchbare Form ge-

bracht. Die gefallenen Niederschlagsmengen werden für die Zeiträume zwischen den Messfahrten ebenfalls von Meteorologen errechnet.

## Wetter

Schließlich sollte die Messstrecke auch so gelegen sein, dass mit mehreren Schneefalltagen in einem Winter zu rechnen ist. Dabei sind für klimatologisch verschiedene Regionen auch verschiedene Messstrecken notwendig, die jeweils ein für die Region typisches Klima aufweisen.

All diese Kriterien werden von dem ausgewählten Streckenstück auf der A10 Tauernautobahn (km 33 bis km 42, siehe Abb. 3.7) erfüllt. Die Trennung der Abschnitte erfolgt durch etwa 500 m lange Tunnel, die eine Verschleppung des Taumittels eines Abschnittes in einen anderen verhindern, da in den Tunnel nicht gestreut wird. Die Messlänge der einzelnen Abschnitte beträgt zwischen 1,2 km und 2,5 km und ist damit ausreichend lang. Durch diese Trennung und Abschnittslänge können zur gleichen Zeit verschiedene Streumittel eingebracht werden und untereinander verglichen werden um die Einflüsse von Verkehr sowie von Wetter möglichst gleich gehalten werden, womit ein direkter Vergleich der Streugüter möglich ist. Unterschiede im Mikroklima (Ende von Lärmschutzwänden, wo der Wind seitlich Schnee einträgt, Kunstbauten und ähnliches) können jedoch nicht ganz ausgeschlossen werden. Die Verkehrsmenge wurde über die automatische Zählstelle Golling der ASFINAG ermittelt.

In Abbildung 3.7 ist die Lage der Messstrecke in Österreich gekennzeichnet.

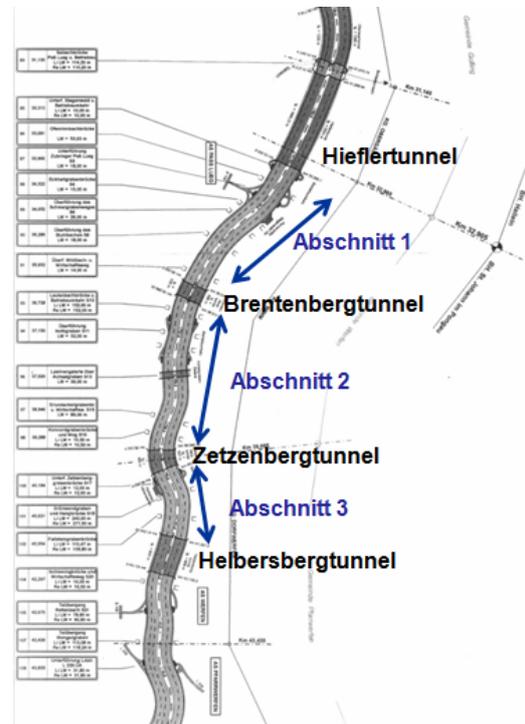


Abbildung 3.6: Abschnitte der Teststrecke auf der A10



Abbildung 3.7: Lage der Messstrecke in Österreich

### 3.2.2 Versuche auf einem abgesperrten Parkplatz

Um Messungen ungefährdet vom Verkehr und unabhängig vom durchzuführenden Winterdienst auf der befahrenen Strecke ausführen zu können, wurde ein Parkplatz in der Nähe der Autobahnmeisterei Golling zur Verfügung gestellt. Der Parkplatz wurde vor Beginn der Versuche weder geräumt noch gestreut, womit eine frei einteilbare Fläche mit gleichmäßiger Schneedecke zu Verfügung stand. Die Verwendung eines für den Verkehr gesperrten Parkplatzes erlaubt es auch, den Gefriervorgang stattfinden zu lassen, was auf öffentlichen Straßen aus Sicherheitsgründen nicht möglich ist.

Durch reguläre Winterdienstfahrzeuge wurden drei Streifen mit etwa 3,5 m Breite und 40 m Länge geräumt und mit verschiedenen Streusalzen gestreut. Die Lage des Parkplatzes sowie Einteilung und Lage der Versuchsstrecken sind in Abbildung 3.8 dargestellt.

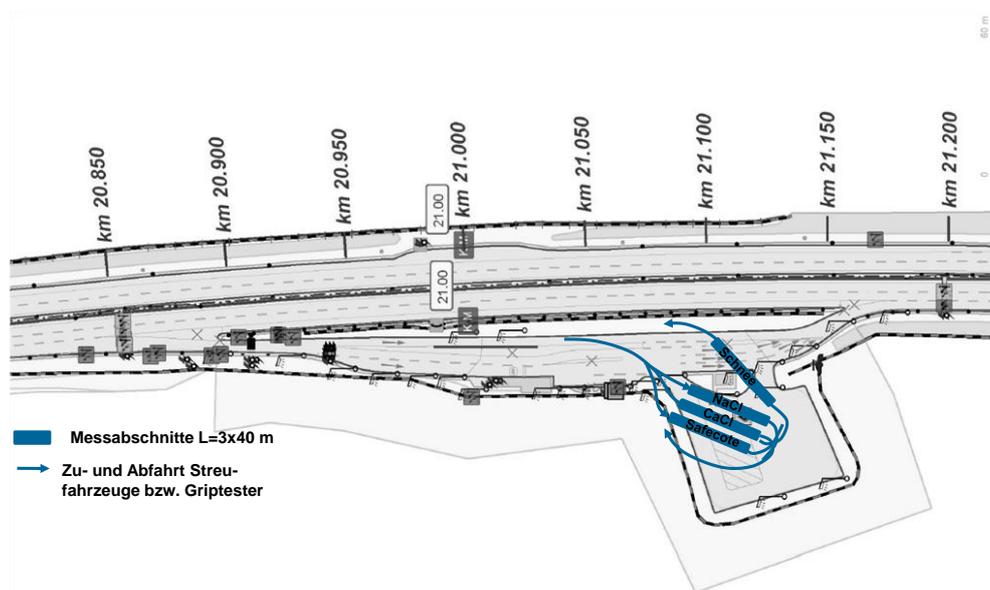


Abbildung 3.8: Plan des Parkplatzes mit Darstellung der Versuchsanordnung

Nach den Messfahrten auf den geräumten Strecken wurde noch eine weitere auf einer unbehandelten Schneedecke von etwa 10 cm Dicke durchgeführt, um einen Vergleich der Griffigkeit bzw. Messwerte einer ungeräumten Schneefahrbahn zu haben.

### 3.3 Mitwirkende Autobahnmeisterei

Die ausgewählte Versuchsstrecke liegt im Aufgabenbereich der Autobahnmeisterei (ABM) Golling, die für den Abschnitt zwischen Hallein und Bischofshofen der Tauernautobahn sowie den Zubringer in Bischofshofen zuständig ist. In diesem Abschnitt sind 244 Fahrstreifenkilometer zu betreuen, wofür dem Winterdienst sieben Fahrzeuge zur Verfügung stehen.

Um für die Praxis aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen, wurden die Messfahrten an den Winterdienst so weit wie möglich angepasst und keine zusätzlichen Streuungen oder ähnliches durchgeführt. Einzig die Verwendung mehrerer Streugüter zur gleichen Zeit erforderte den nicht üblichen Einsatz mehrerer Fahrzeuge während eines Streudurchganges, wobei der Zeitpunkt der Streufahrten jedoch nicht verändert wurde. Die Streuzeitpunkte waren generell einige Stunden im Voraus bekannt, dass es möglich war, die Messfahrten unmittelbar vor bzw. nach der Streuung durchzuführen, um die Veränderung durch das aufgebrachte Streugut zu erfassen.

Die Strecke wird in zwei Teilstrecken unterteilt, wovon eine der Autobahnabschnitt nördlich der ABM ist (Richtung Salzburg), die andere der südliche (Richtung Villach), beide werden jeweils von einem Team betreut. Dieses Team an Streufahrern kann von einem Mann, bei keinen erwarteten Niederschlägen, bis zu drei Mann, bei starkem Schneefall, bestehen. Die Dauer eines Streuumlafes (ABM - Streuen der gesamten Teilstrecke - ABM) muss laut Gesetz unter drei Stunden liegen. In der ABM Golling beträgt diese zwischen 90 Minuten (reine Streufahrt mit etwa 60 km/h) und 160 Minuten bei Räumfahrten mit größeren Schneemengen, wo die Geschwindigkeit bei etwa 30 km/h bis 40 km/h liegt.



Abbildung 3.9: Winterdienstfahrzeuge im Hof der ABM Golling

Die in der ABM Golling übliche Streupraxis lässt sich in folgenden zwei Punkten kurz darstellen:

- Präventive Streuungen zur Verhinderung von Reifglätte um 04:00 Uhr sowie um 16:00 Uhr
- Räumfahrten und mäßige Streumengen bei Schneefall

Die Zeiten der Präventivstreuung liegen in verkehrsschwächeren Zeiten, wo eine Behinderung durch die Streufahrzeuge auftritt, sowie etwa drei Stunden (also eine maximale Umlaufzeit) vor dem Schichtwechsel, was ein pünktliches Schichtende für die Mannschaft garantiert. Generell wird in zwei 12-h-Schichten von 07:00 Uhr bis 19:00 Uhr täglich in der Wintersaison gearbeitet (zumindest Bereitschaft).

# Kapitel 4

## Messergebnisse

Die Griffigkeitswerte des Griptesters werden laufend jeden Meter abgefragt und können durch ein im Rahmen der Diplomarbeit entstandenes Tool für MS Excel in Meterwerten, 5-Meter-Mittelwerten oder 50-Meter-Mittelwerten ausgegeben und dargestellt werden. Die folgenden Darstellungen sind gemittelte 50-Meter-Werte, wodurch kurze Sprünge, die durch Unebenheiten wie etwa Dehnungsfugen bei Brücken entstehen, geglättet werden. Diese Sprünge an Dehnungsfugen sind bei der Auswertung deshalb interessant, weil sie es erlauben, die verschiedenen Messungen so übereinander zu legen, dass der Sprung immer an der gleichen Stelle auftritt. Dies ist deshalb wichtig, weil es bei einer Messgeschwindigkeit von 60 km/h nahezu unmöglich ist, den Beginn einer Messfahrt (der ein Tunnelportal bzw. ein anderer markanter Punkt ist) jedes Mal exakt zu finden. Da diese Abweichungen jedoch im Vergleich zur Messlänge relativ gering sind, kann ihnen ein genauer Punkt, etwa ein Brückenanfang, zugeordnet werden.

### 4.1 Parkplatzversuche

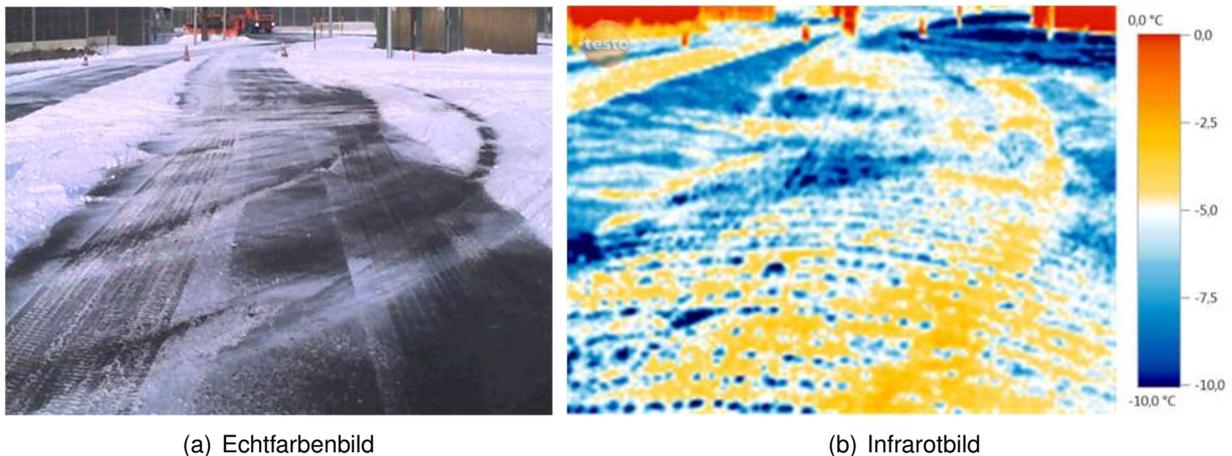


Abbildung 4.1: Aufnahmen der Versuchsstrecke 1 (NaCl) bei den Parkplatzversuchen

In Abbildung 4.1 sind Bilder der Thermokamera dargestellt, auf denen sich sehr gut die geschwungenen Linien des Streumittels erkennen lassen (im Infrarotbild als blau gepunktete Linie zu erkennen), die durch die Ausbringung entstehen. Durch die Drehbewegung des Streutellers entstehen Sprühfahnen, die - wie ersichtlich ist - eine streifenförmige Verteilung des Streusalzes auf der Fahrbahn erzeugen.

Die weitere Verteilung des Streusalzes erfolgt durch den Verkehrseinfluss. Da auf dem gesperrten Parkplatz kein Verkehr war, fand diese Verteilung nicht statt, was dazu führte, dass die Fahrbahn nur an exakt den Linien, auf denen das Streusalz lag, taute, die übrige Parkfläche allerdings weiterhin schneeglatt war. Das führte bei den Messungen dazu, dass trotz langer Wirkzeit des Tausalzes keine völlig vom Schnee befreite Fahrbahn entstand. Aufgrund dieses, anfangs unterschätzten, Einflusses des Verkehrs auf die Wirkung des Taumittels sind keine weiteren Parkplatzmessungen durchgeführt.

Feststellbar war weiters eine minimale Abnahme der Griffigkeit nach der Streuung, da der Bereich, in dem das Salz lag, eine schmierige Konsistenz bekam und sich dies negativ auf die Griffigkeit auswirkte. Für profilierte Winterreifen mit zusätzlichen Lamellen im Profil kann aufgrund des anders aufgebauten (glatten) Messreifens beim Griptester jedoch keine zuverlässige Aussage über die Griffigkeit bei Schneematsch getroffen werden.

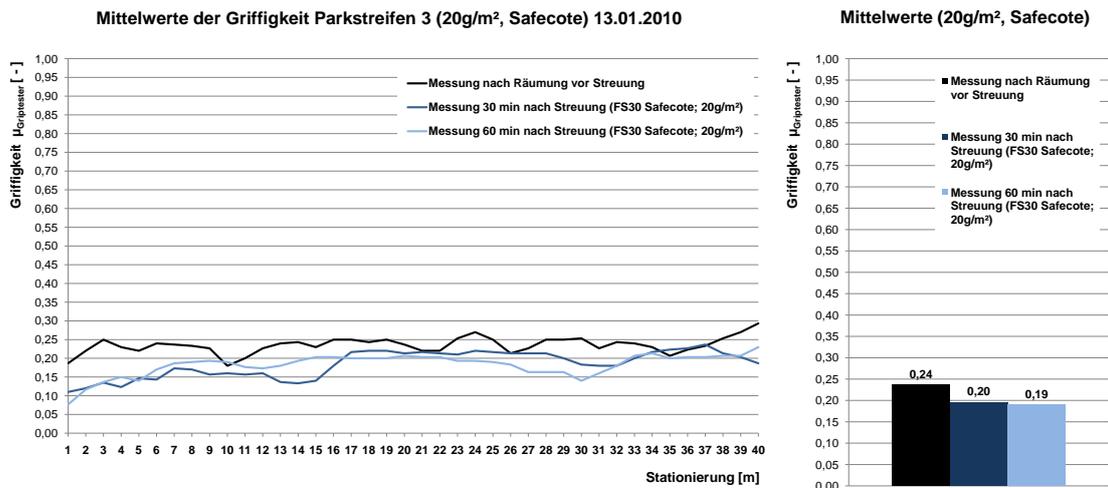


Abbildung 4.2: Griffigkeit auf geräumter Versuchsstrecke

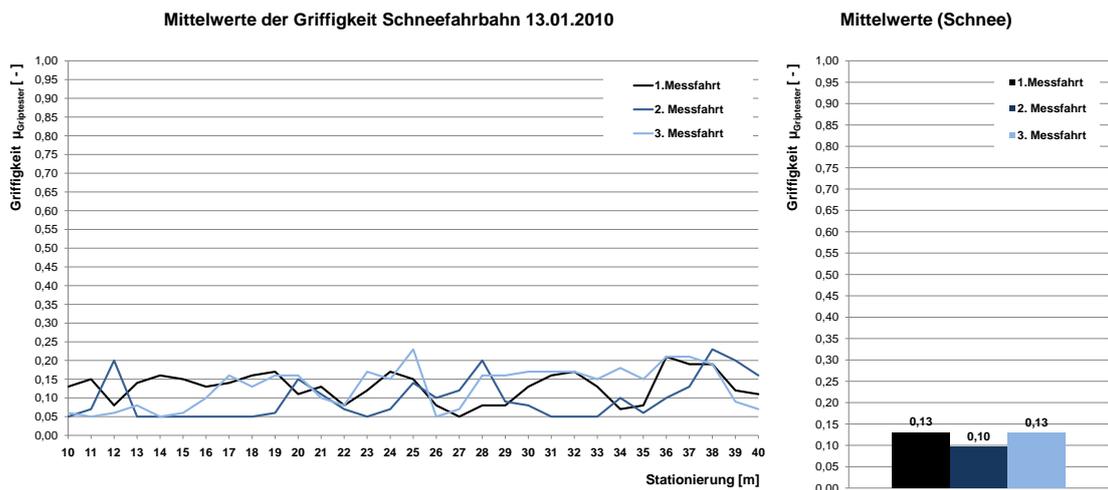


Abbildung 4.3: Griffigkeit auf ungeräumter Versuchsstrecke

Trotz der nicht vollständig gegebenen Wirkung des Taumittels kann es allein durch das Entfernen des Schnees zu einer beinahe Verdoppelung der Griffigkeit, wie ein Vergleich mit der Messreihe auf reiner Schneefahrbahn (siehe Abbildung 4.3) zeigt. Diese Verbesserung ist auf den Kontakt des Reifens mit den freigelegten Spitzen der Fahrbahnoberfläche zurückzuführen. Bei Referenzmessungen mit feuchter Fahrbahn lag die Griffigkeit des Parkplatzes bei etwa  $\mu = 0,8$ .

## 4.2 Auswirkungen des Niederschlages auf die Griffigkeit

Die hier angeführten Messfahrten wurden alle in Abschnitt 1 in Fahrtrichtung Norden durchgeführt. Der Abschnitt reicht (in Fahrtrichtung) von Kilometer 36,016 (Nordportal Brentenbergtunnel) bis Kilometer 33,260 (Südportal Hieflertunnel) und hat damit eine Länge von 2.756 m, wobei an den Enden jeweils etwa 150 m unberücksichtigt blieben, da durch Fugen im Bereich der Tunnelportale starke Sprünge in den Griffigkeitsmessungen entstanden. Die effektive Messlänge ist in der Auswertung daher auf 2.400 m beschränkt.

Dieser Abschnitt wurde deshalb zur genaueren Betrachtung ausgewählt, weil die Fahrbahndecke auf den letzten paar hundert Metern (etwa ab Ofenrinnbachbrücke bis Südportal Hieflertunnel) eine alte Betondecke ist. Der Rest der Teststrecke ist, bis auf die Teilstücke in den Tunnels, vor etwa fünf Jahren mit einer neuen SMA-Decke saniert worden. Durch diesen Unterschied in den Fahrbahnbelägen können Einflüsse der Fahrbahntextur erkannt werden. Eine weitergehende Untersuchung dieser Zusammenhänge ist aber nicht Teil der vorliegenden Arbeit.

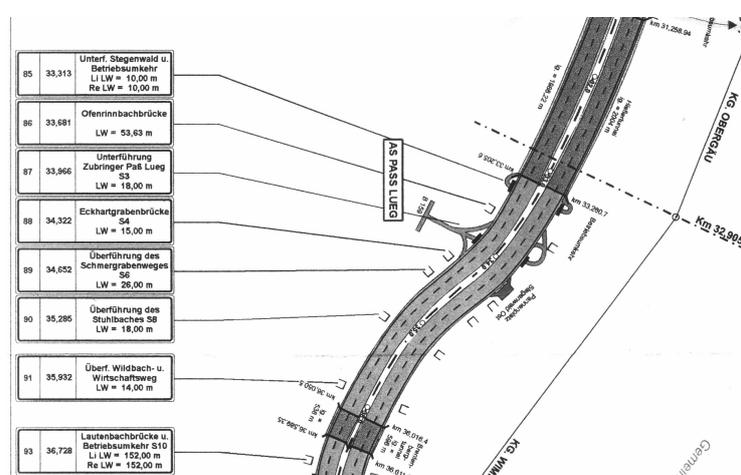


Abbildung 4.4: Karte des Abschnittes 1

In Abbildung 4.4 sind alle Kunstbauten auf dem Abschnitt mit genauer Kilometrierung angegeben, damit Gefahrenstellen wie Brücken den Griffigkeitsverläufen zugeordnet werden können. Andere Gefahrenstellen hinsichtlich Glättebildung wie etwa das Ende von Lärmschutzwänden oder besondere topografische Verhältnisse können daraus nicht eruiert werden, sind jedoch bei den Messfahrten auch nicht aufgefallen. Lediglich an den Tunnelportalen war oft mehr Schnee an den Fahrbahnrandern zu erkennen, diese sind jedoch bei der Auswertung unberücksichtigt geblieben. Verwehungen von Schnee auf der Fahrbahn kamen vor, doch unregelmäßig und an unterschiedlichsten Stellen.

Auf den folgenden Seiten werden die drei wichtigsten, im Winter 2009/10 gemessenen Wetterzenarien in Hinsicht auf Niederschlagsmenge und Griffigkeit analysiert. In den Darstellungen ist die Skalierung zum Vergleich verschiedener Messtage bis auf die Wasserfilmdicke immer dieselbe, da bei dieser aufgrund der extremen Unterschiede ein Erkennen geringerer Filmdicken dann unmöglich wäre.

Während der Verlauf der Griffigkeit in 50-Meter-Mittelwerten dargestellt ist, sind die anderen Messdaten Mittelwerte über die gesamte Abschnittslänge. Die Werte für Fahrbahntemperatur, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Filmdicke stammen aus Mittelwerten der Vaisala-Messinstrumente, die am Messfahrzeug montiert waren. Die Niederschlagswerte sind von dem technischen Büro BlueSky Wetteranalysen aus Aufzeichnungen nahegelegener Wetterstationen ermittelt worden.

#### 4.2.1 Szenario: Salznasse Fahrbahn (13.01.2010)

Die Messfahrten am 13.01.2010 wurden in den frühen Morgenstunden zu sehr verkehrsschwacher Zeit durchgeführt. In diesem Zeitraum ist jedoch gewöhnlich auch mit der stärksten Reifbildung zu rechnen. Zudem war in dieser Nacht die Luftfeuchtigkeit mit etwa 90 % hoch genug, um ausreichend Feuchtigkeit zu liefern. Die Fahrbahn war, wie in Abbildung 4.5 zu erkennen ist, demnach auch immer etwas feucht vom anfallenden Reif, es fiel jedoch kein weiterer Niederschlag.

Lediglich bei der Messfahrt 360 Minuten nach der Streuung kam es zu einer lokalen Eisbildung, die als Zacken im Griffigkeitsverlauf zu erkennen sind (Abb. 4.6). An der Stelle dieser Zacken sind keine Brücken oder Überführungen, die eine potentielle Gefahrenstelle bei Eisbildung sind.

Die erste Messfahrt war eine Nullmessung vor der Streuung, bei der hier nicht ausgeschlossen werden konnte, dass noch Tausalz der Streuung am Abend des Vortages auf der Fahrbahn lag. Die Messungen danach folgten in steigenden Zeitintervallen, um der aus den Modellüberlegungen, stammenden Abnahmekurve der Restsalzmenge gerecht zu werden.

Eine Abnahme der Griffigkeit mit der Abnahme der Restsalzmenge (die bei dieser Messfahrt jedoch nicht gemessen wurde) ist nicht aufgetreten. Während der gesamten Morgenstunden blieb die Griffigkeit auf dem durchwegs hohen Niveau von etwa  $\mu = 0,8$ , wobei der einzige Ausreißer auf lokale Eisbildung zurückzuführen ist und mit einem stellenweisen Minimum von  $\mu = 0,5$  immer noch der Griffigkeitsklasse „Gut“ entspricht (nach Umrechnung gemäß Formel 3.1  $\mu = 0,67$ ).

Daraus folgt, dass keine Probleme mit der Griffigkeit auftreten, solange das Wasser auf der Fahrbahn nicht gefriert. Um das Frieren zu verhindern, muss die Salzkonzentration in dem Wasserfilm so hoch sein, dass die erreichte Gefrierpunktabenkung ausreicht, um den Wasserfilm flüssig zu halten. Diese Bestätigung anfänglicher Vermutungen war ein wichtiger Schritt in Richtung eines Modells, das genau diesen Vorgang abbildet.

Der Einfluss der Hohlräume in der Textur ist bei diesen Messfahrten nicht bestimmbar, obwohl die glattere Betonoberfläche eine deutlich geringere Griffigkeit hat. Dies liegt zunächst daran, dass die Textur nicht genau untersucht wurde, sondern nur augenscheinlich beurteilt wurde und der Zustand des Filmes auf der Fahrbahn durch die Kameras der Firma Vaisala als Wasser erkannt wurde.

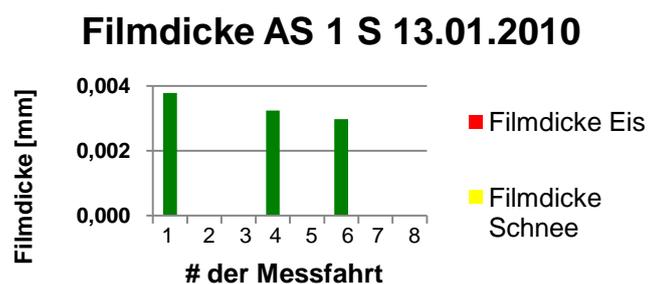


Abbildung 4.5: Über die Abschnittslänge gemittelte Filmdicke

### Griffigkeit AS 1 Richtung S am 13.01.2010

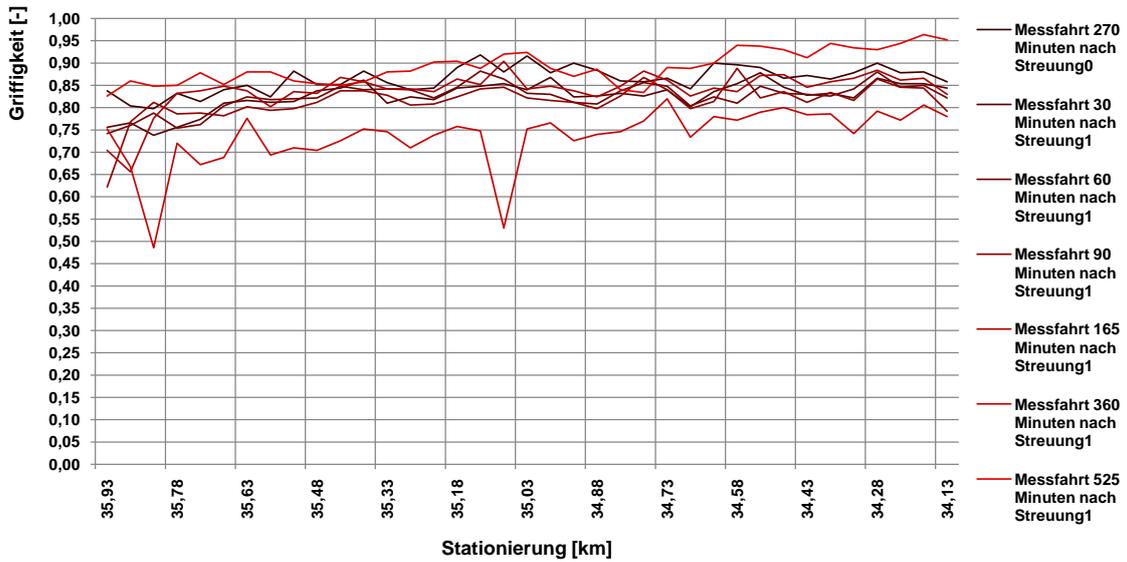
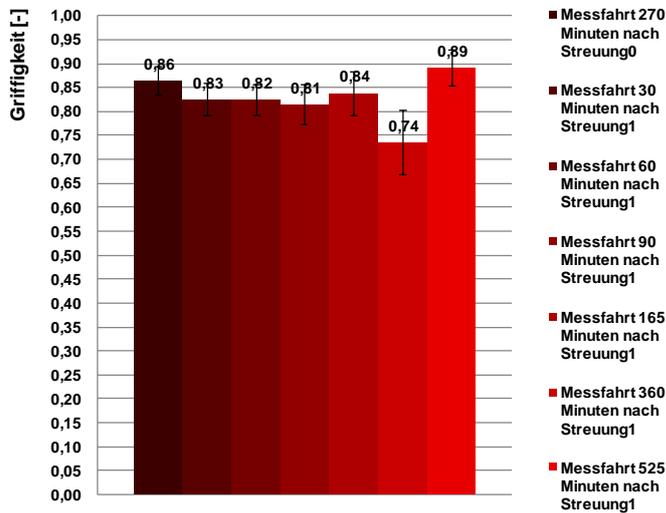


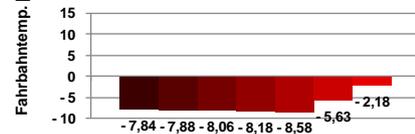
Abbildung 4.6: Griffigkeit auf salznasser Fahrbahn

### Mittelwerte Griffigkeit AS 1 Richtung S am 13.01.2010

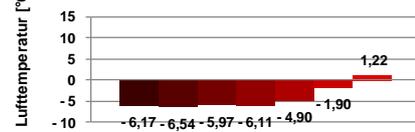


Streuung	Uhrzeit	Streumittel	Streumenge [g/m <sup>2</sup> ]						
		04:35	NaCl	10					
Messfahrten									
	04:32	05:06	05:35	06:10	07:33	10:44	13:33		

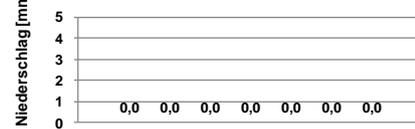
### Fahrbahntemp. AS 1 S



### Lufttemperatur AS 1 S



### Niederschlag AS 1 S



### Luftfeuchtigkeit AS 1 S

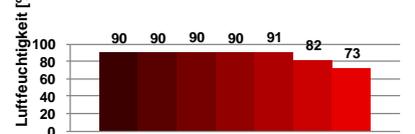


Abbildung 4.7: Griffigkeit auf salznasser Fahrbahn

## 4.2.2 Übergangszone Schneeregen, beginnender Griffigkeitsrückgang

Eine weitere Messreihe fand am 18.01.2010 bei Lufttemperaturen etwas über dem Gefrierpunkt statt, als Schneefall möglich war. Bei den ersten beiden Messfahrten war noch leichter Schneefall bzw. Schneeregen vorherrschend, der im Laufe der Zeit abklang. Dieser Niederschlag führte zu einer Verdünnung der auf der Straße befindlichen Sole sowie einer bedeutend stärkeren Filmdicke, als im Falle der Reifbildung vorherrschend war (Skalierung der Filmdickendiagramme in Abb. 4.11 beachten!).

Die verschiedenen Messfahrten weisen sehr starke Schwankungen auf, die auf die unterschiedlichen Witterungseinflüsse bei den jeweiligen Messfahrten zurückzuführen sind. Besonders das letzte Drittel der Messstrecke ist davon betroffen, wo der Einfluss der Schneeverwehung aufgrund eines kleinen Seitentales der Grund dafür sein kann. Besonders die erste Messfahrt um die Mittagszeit weist ein niedrigeres Griffigkeitsniveau als die anderen auf, was auf die größere Niederschlagsmenge in diesem Zeitraum zurückzuführen ist. Mit der schwächer werdenden Niederschlagsintensität steigt auch die Griffigkeit wieder an, da die Fahrbahn durch den Verkehr rasch auf trocknet.

Der Temperaturbereich lag im sehr interessanten Bereich um den Gefrierpunkt, der es für die Winterdienstfahrer besonders schwer macht, die richtige Streumenge zu wählen, weshalb diese aus Vorsicht etwas mehr streuen. So wurden bei dieser Runde der Streufahrzeuge etwa in Richtung Villach  $10 \text{ g/m}^2$  gestreut und bei der Rückfahrt etwa eine halbe Stunde später in der Gegenrichtung aber schon  $20 \text{ g/m}^2$ .

Interessant ist bei dieser Messreihe der deutlich sichtbare Einbruch der Griffigkeit bei 6 von 8 Fahrten etwa bei Kilometer 34,0. An dieser Stelle befindet sich die Unterführung Zubringer Paß Lueg mit einer lichten Weite von 18 m. Hier hat sich offenbar durch die exponierte Lage der Fahrbahn und die fehlende Wärmekapazität des Untergrundes eine Stelle gebildet, in der die gestreute Tausalzmenge nicht ausreichend ist bzw. sich nicht lange genug auf der Fahrbahn hält. Diese Stellen sind allerdings nach einem neuen Entwurf der Einweisungsunterlagen für den Winterdienst [Winterdienst, 2010] mit der maximalen Streumenge, die das Gerät bewältigt (etwa  $40 \text{ g/m}^2$ ), zu streuen.

Hier zeigt sich das große Problem der relativ langen Messintervalle der Vaisala-Kameras. Da nur punktuell alle 80 m bis 120 m gemessen wird, ist es reiner Zufall, ob der Eisfilm im Brückenbereich, der bloß 18 m lang ist, getroffen wird oder nicht. Für weitere Messreihen in der Wintersaison 2010/2011 ist dieses Problem durch neue Software der Kameras sowie eine direkte Datenabfrage über einen Laptop behoben worden.

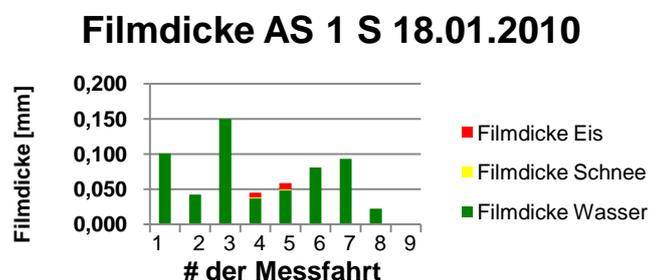


Abbildung 4.8: Über die Abschnittslänge gemittelte Filmdicke

### Griffigkeit AS 1 Richtung S am 18.01.2010

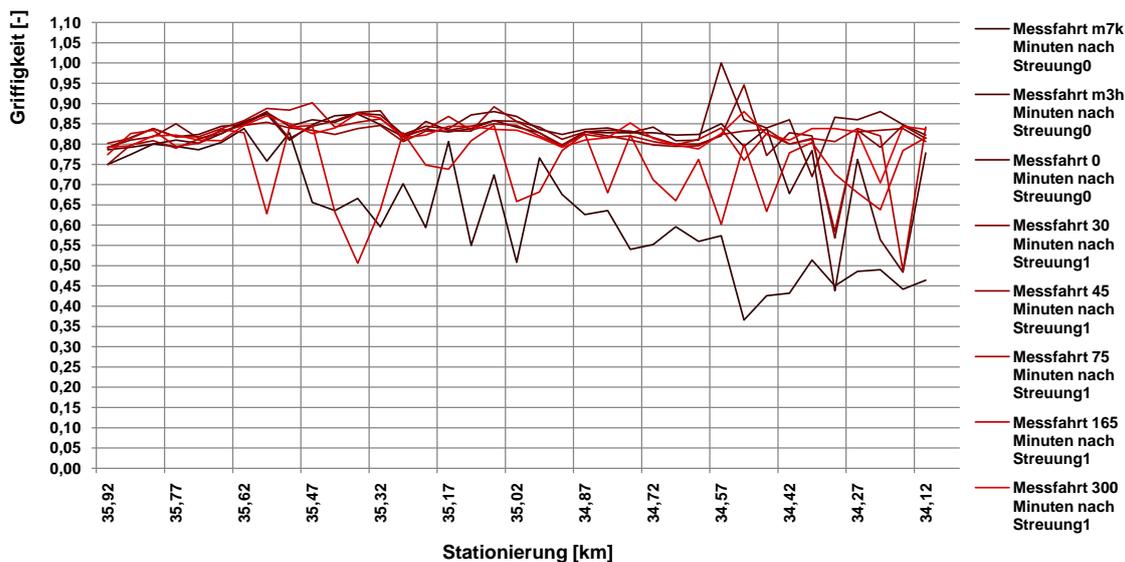
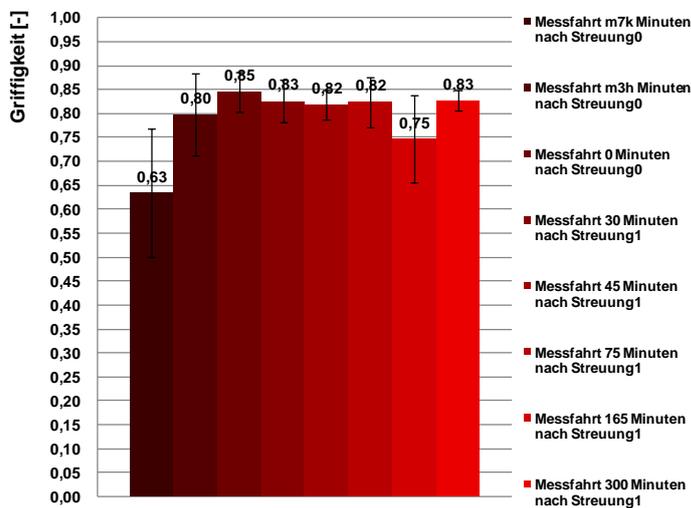
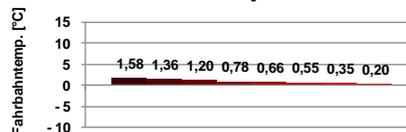


Abbildung 4.9: Griffigkeit auf salznasser Fahrbahn

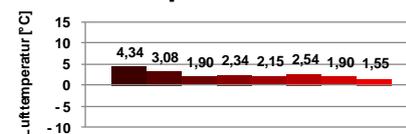
### Mittelwerte Griffigkeit AS 1 Richtung S am 18.01.2010



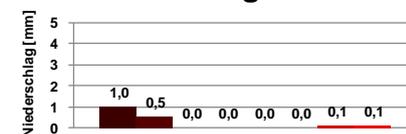
### Fahrbahntemp. AS 1 S



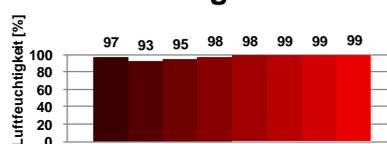
### Lufttemperatur AS 1 S



### Niederschlag AS 1 S



### Luftfeuchtigkeit AS 1 S



Streuung	Uhrzeit	Streumittel	Streumenge [g/m <sup>2</sup> ]							
		19:25	NaCl	20						
Messfahrten										
	13:14	16:30	19:20	19:55	20:22	20:52	22:23	01:21		

Abbildung 4.10: Griffigkeit auf salznasser Fahrbahn

### 4.2.3 Gefahrenzone länger anhaltender Schneefall, glatte Fahrbahn

Eine andere Messreihe fand in der Nacht von 04.03.2010 auf 05.03.2010 statt, die interessante Ergebnisse zum Szenario „starker Schneefall“ liefert. Hier dargestellt sind die Messfahrten am 05.03.2010 im Zeitraum von 03:00 Uhr bis 04:30 Uhr, nachdem Niederschlag als Schnee gegen 23:00 Uhr des Vortages mit einer Intensität von 0,5 mm/h, (entspricht einer Schneefallmenge von 5 mm/h), einsetzte.

Die erste Messfahrt fand unmittelbar vor der Räumung und Streuung statt, bei der auf der Fahrbahn eine geschlossene Schneedecke von - aus Fahrersicht beurteilt - 1 cm bis 2 cm vorzufinden war. Die Filmdicke der Vaisalakamera zeigt wesentlich geringere Werte wobei ab einer gewissen Schichtdicke (etwa 1 cm) diese laut Hersteller nicht mehr zuverlässig gemessen werden kann (Abb. 4.11).

Diese Schneefahrbahn führt zu sehr niedrigen Werten der Griffigkeit von  $\mu = 0,11$ , wobei in den Werten auch Strecken von bis zu 15 m mit einem Wert von  $\mu = 0,05$  gemessen worden. In diesem Fall liegt kein Kontakt mit der Fahrbahn vor. Hier sei noch einmal der Hinweis gebracht, dass die Griffigkeitswerte des Griptesters, welcher einen profillosen Messreifen besitzt, unter jenen normaler profilierter KFZ-Reifen liegen.

Kurz nach der Räumung und dem Streuen von  $10 \text{ g/m}^2$  Natriumchlorid verdoppelte sich die Griffigkeit auf  $\mu = 0,22$ , was durch die rein mechanische Räumung der Fahrbahn geschah (Abb. 4.12). Das ausgebrachte Streusalz taut im weiteren Verlauf noch geringe Mengen Schnee sowie die ohnehin schon geringe Eisschicht. Aus theoretischen Überlegungen (siehe Abschnitt 2.3.3) ist es unmöglich so viel Taumittel auszubringen, um anhaltenden Niederschlag  $> 0,5 \text{ mm/h}$  sicher zu schmelzen. Geringe Mengen im Bereich von  $5 \text{ g/m}^2$  bis  $10 \text{ g/m}^2$  sind jedoch notwendig, um ein „Ankleben“ der Schnee- oder Eisschicht an die Fahrbahn zu verhindern. Erfolgt dies nicht präventiv, so ist ein weiteres Aufbringen der Taumittel praktisch unwirksam ist und diese Schichten müssten mechanisch entfernt werden.

Diese Streumenge ist allerdings nur eine ungefähre Richtgröße und gilt nur bei Niederschlagsereignissen, die länger andauern. So zeigten die Beobachtungen in der Nacht von 04.03.2010 auf 05.03.2010, dass der Schnee, der durch die niedrigen Temperaturen sehr „hart“ war, einige Stunden durch den Verkehr einfach verweht wurde und nicht auf der Fahrbahn zum Liegen kam. Erst als der Verkehr nachließ und der Niederschlag weiter andauerte, bildete sich dann relativ rasch eine Schneedecke, welche auch nach einer Räumfahrt trotz des Taumittels schnell wieder entstand.

Diese Messreihe zeigte auch die Grenze des sinnvollen Einsatzes von Taumitteln (bis  $40 \text{ g/m}^2$ ) die von herkömmlichen Streufahrzeugen, die bei einer Niederschlagsintensität von etwas weniger als  $0,5 \text{ mm/h}$  liegt. Liegt die Intensität darüber, kann eine schneefreie Fahrbahn auch bei minimalen Umlaufzeiten und maximalen Streumengen nicht mehr gesichert werden. Dies ist dem Straßennutzer in geeigneter Form zu kommunizieren.

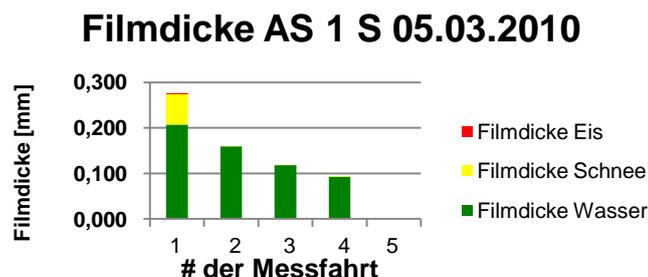


Abbildung 4.11: Über die Abschnittslänge gemittelte Filmdicke

### Griffigkeit AS 1 Richtung S am 05.03.2010

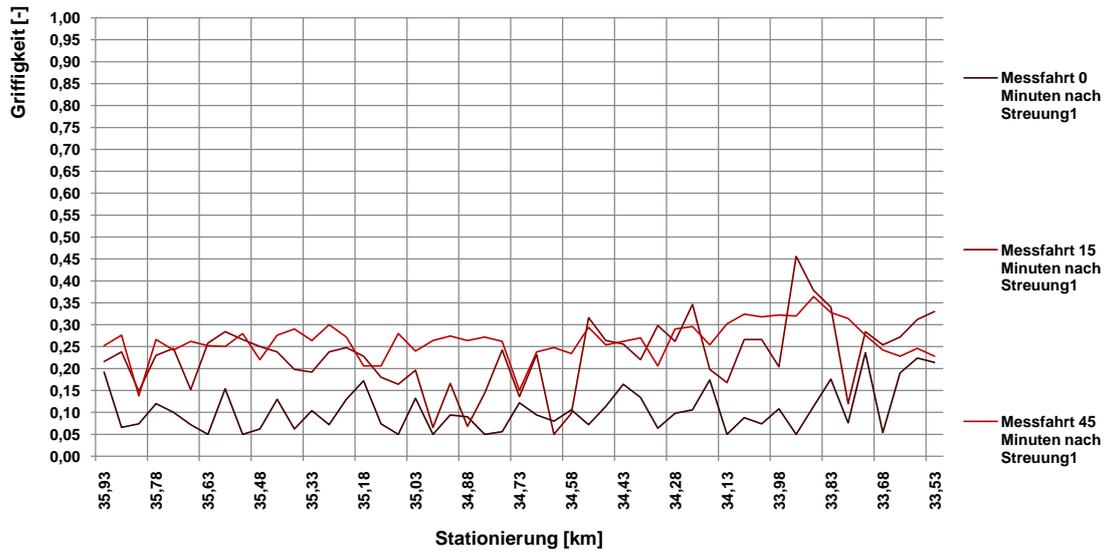
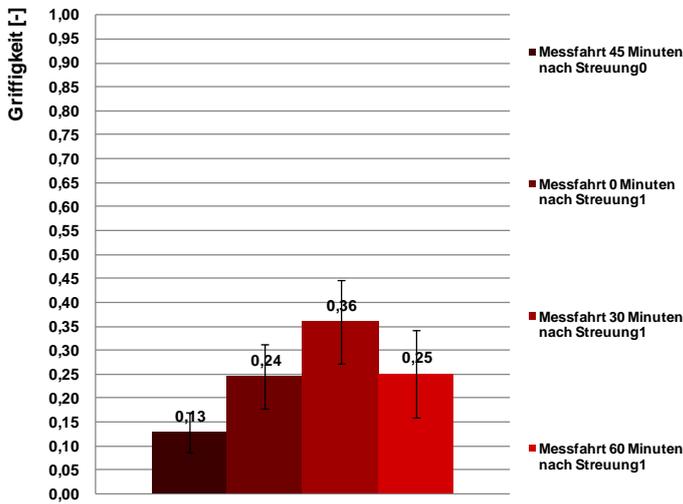
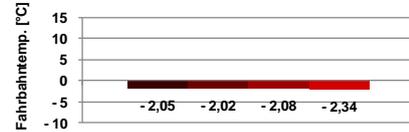


Abbildung 4.12: Griffigkeit auf schneeglatte Fahrbahn

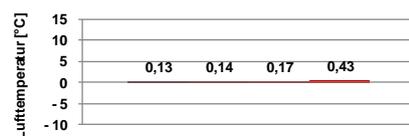
### Mittelwerte Griffigkeit AS 1 Richtung S am 05.03.2010



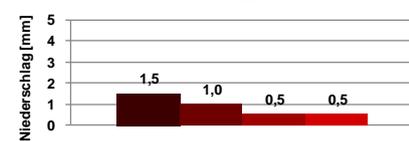
### Fahrbahntemp. AS 1 S



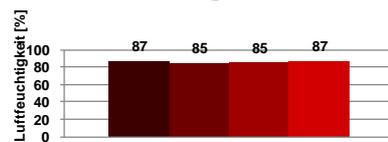
### Lufttemperatur AS 1 S



### Niederschlag AS 1 S



### Luftfeuchtigkeit AS 1 S



Streuung	Uhrzeit	Streumittel	Streumenge [g/m <sup>2</sup> ]
	01:32	NaCl	2*10
Messfahrten			
00:56	01:41	02:04	02:33

Abbildung 4.13: Griffigkeit auf schneeglatte Fahrbahn

### 4.3 Zusammenhang Griffigkeit - Streumittel

Bei den Messfahrten am 13.01.2010 wurden in den drei Abschnitten der Messstrecke jeweils andere Taumittel gestreut. Es wurde jeweils Feuchtsalz FS30 gestreut, wobei die 70 % Trockensalz in allen Fällen NaCl war und die anderen Stoffe nur in der Sole enthalten waren. Die Messungen fanden über einen Zeitraum von etwa neun Stunden statt, so dass auch eine eventuell früher nachlassende Wirkung eines Streumittels beurteilt werden kann. Die Fahrbahntemperatur lag an diesem Tag bei etwa -10 °C, die Lufttemperatur bei etwa -4 °C, es fiel kein Niederschlag jedoch bildete sich Reif auf der Fahrbahn. Die Messfahrten fanden in den frühen Morgenstunden und am Vormittag statt.

Die rechts dargestellten Mittelwerte der Griffigkeit über die gesamte Abschnittslänge zeigen keinen wesentlichen Einfluss des Taumittels auf die Griffigkeit an. In allen Fällen ist die Griffigkeit auf sehr hohem Niveau, lediglich die vorletzte Messfahrt lieferte bei der CaCl<sub>2</sub>-Streuung ein etwas besseres Bild. Ein Trend ist allerdings nicht feststellbar, was auch die angestellten Überlegungen zur Gefrierpunktsabsenkung in dem ausgebrachten Streugut (siehe Abschnitt 2.3.2) bestätigen (Abb. 4.14 bis Abb. 4.16).

Der Nutzen, den ein Streumittelzusatz bringen kann, kann daher nur durch eine längere Liegezeit und damit in höheren möglichen Streuintervallen liegen, die hier im zeitlichen Verlauf der Griffigkeit nicht nachweisbar sind. Dies ist jedoch von der Geschwindigkeit der Restsalzabnahme abhängig, die mit anderen Messmethoden untersucht wird und in Abschnitt 4.5 behandelt ist.

Da die Ausbringung drei verschiedener Streumittel auch drei vorbereitete Streufahrzeuge und drei Fahrer benötigt, können diese Untersuchungen nur bei Wetterverhältnissen stattfinden, in denen Material und Personal verfügbar ist. Bei den Messungen am 04.01.2010 und 05.03.2010, als Schneefall herrschte, wurde zwischen Trockensalz- und Feuchtsalzzstreueung mit Safecotezusatz unterschieden, wobei der Einfluss des Streumittels durch die gefallene Niederschlagsmenge mit starken regionalen Unterschieden nicht nachweisbar war.

Mittelwerte Griffigkeit relativ AS 1 Richtung S am 13.01.2010

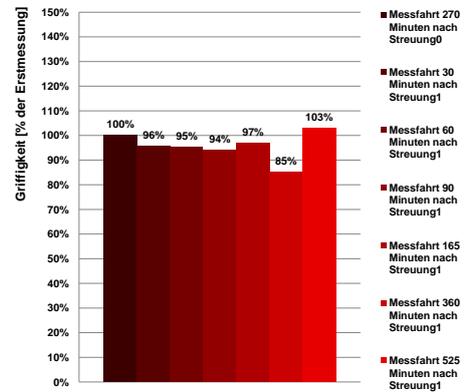


Abbildung 4.14: Griffigkeit in Abschnitt 1 (NaCl)

Mittelwerte Griffigkeit relativ AS 2 Richtung S am 13.01.2010

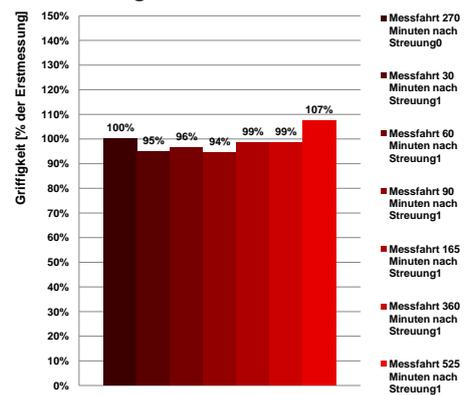


Abbildung 4.15: Griffigkeit in Abschnitt 2 (CaCl)

Mittelwerte Griffigkeit relativ AS 3 Richtung S am 13.01.2010

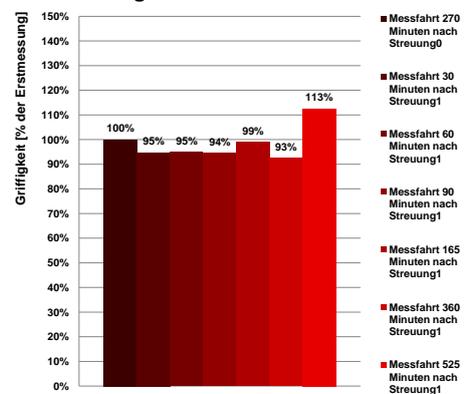


Abbildung 4.16: Griffigkeit in Abschnitt 3 (Safecote)

## 4.4 Vergleich der Griffigkeiten Griptester - Vaisala

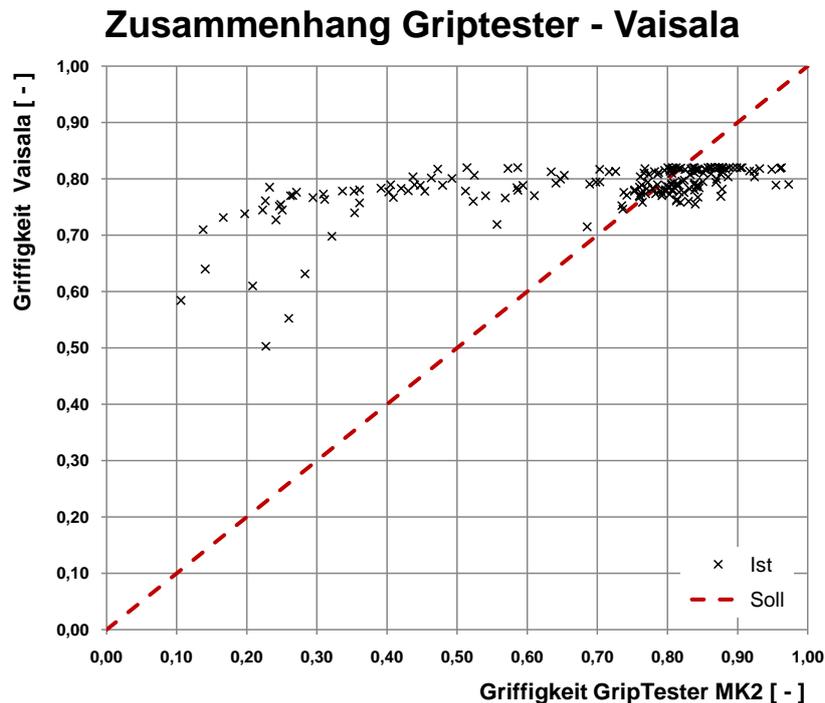


Abbildung 4.17: Griffigkeitswerte der Messsysteme Griptester und Vaisala-Kameras

In Abbildung 4.17 sind die Mittelwerte der Griffigkeit, der mit den Messsystemem Griptester und Vaisala-Kameras aller 192 ausgewerteten Messfahrten dargestellt. Hierzu ist zu sagen, dass die Griffigkeitswerte der Vaisala-Kameras anhand der gemessenen Filmdicken und Temperaturen mittels vorgegebenen Formeln berechnet werden und keine direkte Messung der Griffigkeit stattfindet, während der Griptester nur die Griffigkeit direkt misst, die Filmdicke allerdings aus den Kameradaten entnommen wurde. Hier sind zwei Dinge zu erkennen:

- Bei Griffigkeitswerten des Griptesters von etwa  $\mu = 0,75$  bis  $\mu = 0,82$  ist die Übereinstimmung der Messergebnisse relativ gut, wobei die vom System Vaisala angezeigte Griffigkeit bei 0,82 begrenzt wird. Dies ist auch jener Wert, der nach Erfahrungen von Seiten der ASFINAG, die diese Kameras zur Verfügung stellte, nicht überschritten wird. Diese hohen Griffigkeitswerte ist aus Sicht der Verkehrssicherheit allerdings wenig relevant, weshalb die Beschränkung für die praktische Nutzung keine Bedeutung hat.
- Wenn die Griffigkeitswerte des Griptesters unter  $\mu = 0,7$  sinken, ist die Übereinstimmung mit den von den Vaisala-Kameras berechneten Werten nicht mehr gegeben. Da aber gerade die niedrigen Griffigkeitsniveaus im Winterdienst relevant sind, ist die Verwendung dieser Vaisala-Kameras zur mobilen Griffigkeitsbestimmung derzeit nicht ratsam.

Der Fehler in der Messlogik der Kameras liegt unter anderem in den vom Hersteller fix eingegebenen Texturwerten für die Fahrbahnoberfläche, die in der Realität ständig wechseln. Daher ist die mobile Messung der Griffigkeit mit dem Messsystem Vaisala-Kameras nicht aussagekräftig. Bei stationärer Montage und einer für jeden Standort durchgeführten Kalibrierung mithilfe einer Messung der tatsächlich vorherrschenden Griffigkeit bei verschiedenen Szenarien ist eine ständige, berührunglose Überwachung der Griffigkeit aber vorstellbar.

## 4.5 Bestimmung der Restsalzabnahme auf der Fahrbahn

Messungen zur Bestimmung des Restsalzgehaltes wurden mit Verwendung des Gerätes SO-BO 20 möglich, das jedoch leider erst ab Ende Februar zur Verfügung stand. Bei Übergabe des Gerätes wurden gemeinsam mit dem Techniker der Firma Boschung einige Tests am Gelände der ABM Golling durchgeführt, die zwei wichtige Punkte entdeckt:

- Bei Verwendung von Safecote als Zusatzmittel zur Sole erhöht sich die Leitfähigkeit so drastisch, dass die angezeigten Werte deutlich zu hoch sind.
- Die Schwankungen einzelner Messwerte nur einen Meter voneinander entfernt waren so groß, dass die Anzahl der Einzelmessungen, aus denen anschließend der Mittelwert gebildet wurde, von drei auf fünf angehoben wurde. Dies erhöht auch den Zeitaufwand einer Messreihe nicht unerheblich, da zusätzlich zu den weiteren Messungen auch die Messflüssigkeit für eine durchgehende Messung aller Abschnitte nicht mehr ausreichend war und unterwegs nachgefüllt werden musste.

Die Messungen wurden trotz des Messfehlers bei Safecote auch für dieses Streumittel angewandt, da eine relative Abnahme dennoch bestimmt werden kann. Durch die Schwankungen auf mögliche Schwächen des SOBO20 Gerätes hingewiesen wird ein Vergleich mit präziseren Bestimmungsmethoden des Restsalzes wie das Sprüh-Sauggerät der BAST im Rahmen eines Informationsaustausches angestrebt.

Die Restsalzmessungen wurden in der Rollspur des ersten Fahrstreifens und in der Mitte des ersten Fahrstreifens durchgeführt. Die genaue Lage der Messpunkte kann der nebenstehenden Abbildung 4.18 entnommen werden. Die Messungen in der Fahrstreifenmitte wurden nach kurzer Zeit aufgegeben, da die Schwankungen durch die Verspritzung enorm war und für den Verkehr auch vorrangig die Restsalzmenge in der Rollspur wesentlich ist. Die Orte der Messpunkte wurden so gewählt, dass die Steigung der Straße so gering wie möglich war, um das Abfließen des Wassers und des darin gelösten Salzes in Richtung der Straßenachse und dadurch von wesentlichen Messfehlern ausschließen zu können.

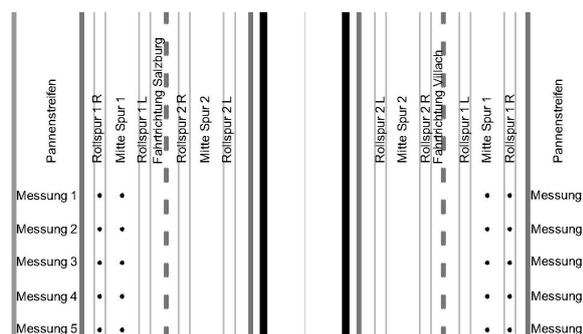


Abbildung 4.18: Skizze der Lage der Messpunkte

Eine sehr große Erschwernis stellt die Absicherung des Messteams auf der freien Strecke dar. Da auf einer befahrenen Autobahn der erste Fahrstreifen betreten werden muss, ist eine Absicherung mit mindestens zwei Fahrzeugen notwendig, wobei ein Fahrzeug direkt vor der Messstelle auf dem ersten Fahrstreifen und ein weiteres etwa 500 m vor der Messstelle am Pannestreifen mit einer Warnung für die Verkehrsteilnehmer steht. Dies bedeutet einen hohen Aufwand an Personal, da ein Messteam mindestens aus drei Personen besteht und zwei Fahrzeuge bereitgestellt werden müssen.

Aus diesem Grund sind für eine aussagekräftige statistische Analyse noch zu wenig brauchbare Daten verfügbar. Im weiteren Verlauf des Projektes werden weitere Versuche auf weniger befahrenen Bundesstraßen dieses Problem verringern.

## 4.6 Messreihen zur Bestimmung der Fahrbahntemperatur auf der Fahrbahn

Die Kenntnis der Fahrbahntemperatur in Abhängigkeit von der Lufttemperatur ist einer der Eingangsparameter für das entwickelte Winterdienstmodell (siehe Abschnitt 5). Die aus den Messfahrten gewonnenen Daten über die Fahrbahntemperatur sind nur bedingt aussagekräftig, da nur an einzelnen Tagen gemessen wurde. Für eine langfristige Betrachtung standen aber Messdaten einer fest installierten Wetterstation in Golling zur Verfügung, die statistisch analysiert wurden.

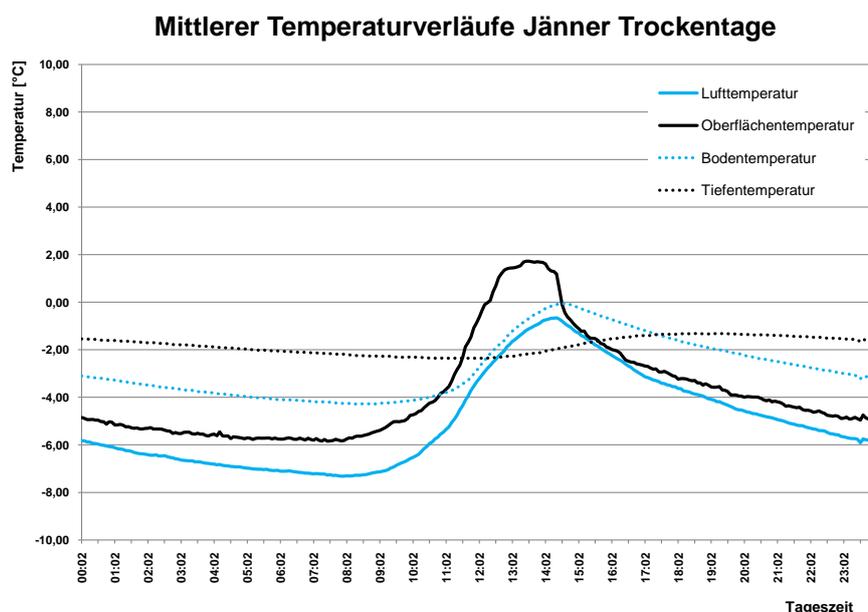


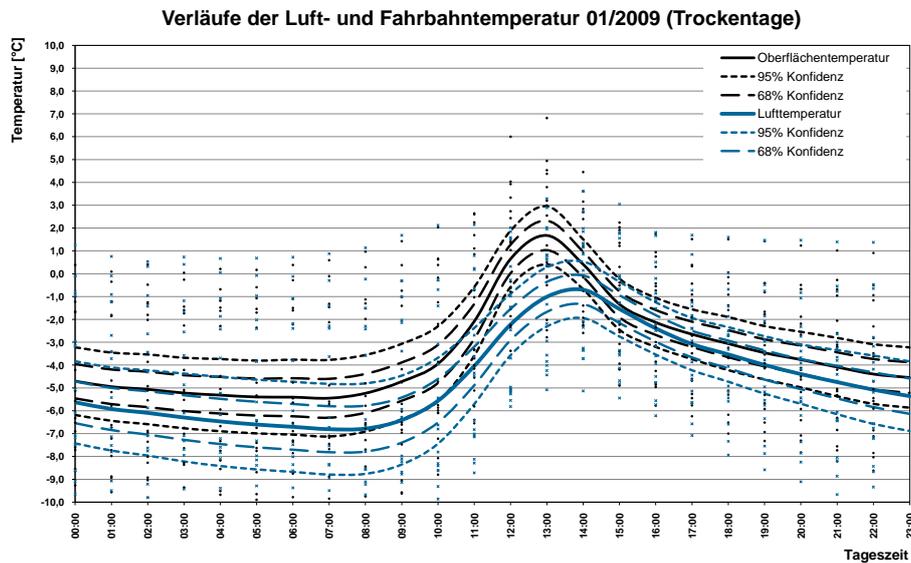
Abbildung 4.19: Verschiedene Temperaturverläufe an trockenen Jännertagen 2009

Die Wetterstation lieferte unter anderem die Daten für Lufttemperatur, Oberflächentemperatur, Bodentemperatur sowie Tiefentemperatur, die in Abbildung 4.19 für trockene Tage im Jänner 2009 dargestellt sind. Bodentemperatur und Tiefentemperatur sind nur der Vollständigkeit wegen eingezeichnet und werden in den weiteren Betrachtungen nicht benötigt.

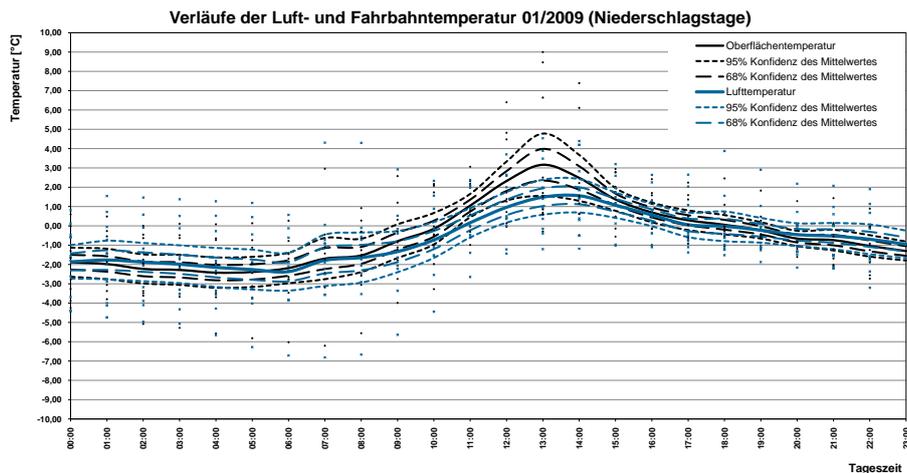
Die Schwankungen der Temperaturen im Tagesverlauf nehmen von der Oberfläche, auf die auch alle temperaturrelevanten Einflüsse wirken, nach unten hin ab. Die Fahrbahntemperatur weist aufgrund des direkten Einflusses der Sonnenstrahlen die größten Schwankungen auf. In die weitere Analyse sind jedoch nur die Lufttemperatur (Prognosewert) und die Oberflächentemperatur (zur Modellrechnung) einbezogen worden. Aus den Messdaten, die für das gesamte Kalenderjahr 2009 zur Verfügung standen, sind die Wintermonate Jänner, Februar, März, November und Dezember ausgewertet worden. Die Eingangsdaten lagen im Messintervall von fünf Minuten vor, die mit Rücksicht auf die Übersichtlichkeit zu Stundenwerten gemittelt wurden. Hier werden nur die Daten für den Monat Jänner 2009 dargestellt und erläutert. Die Zusammenhänge sind in den anderen Monaten jedoch dieselben, lediglich das Temperaturniveau ändert sich. Alle weiteren Auswertungen sind in Anhang A zu finden. Es erfolgte zudem eine Trennung der Niederschlags-tage von den Tagen ohne Niederschlag um zwei wichtige Einflussgrößen zu trennen:

- Die Wärmeenergie, die der Niederschlag gleichmäßig während seiner Dauer der Fahrbahn entzieht bzw. zuführt, bewirkt eine, zumindest teilweise Angleichung der Fahrbahntemperatur an die Temperatur des Niederschlages.
- Da bei Niederschlag der Himmel bedeckt ist, kann auch der Einfluss der Strahlungsenergie der Sonne, die die Fahrbahn erwärmt, ausgeschlossen werden. Eine Trennung von

heiteren Tagen und Tagen mit Bewölkung ohne Niederschlag war aufgrund fehlender meteorologischer Messdaten nicht möglich. Das stellt allerdings kein Problem dar, weil nur Niederschlagstage für den Winterdienst von Bedeutung sind.



(a) Tage ohne Niederschlag

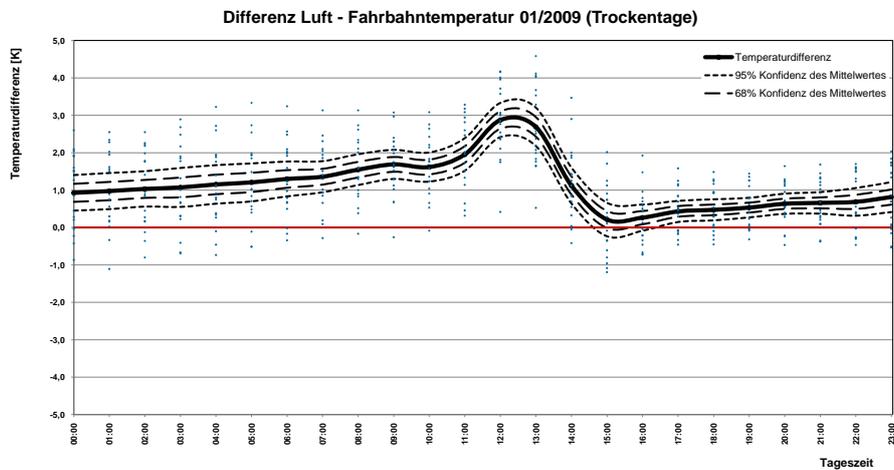


(b) Niederschlagstage

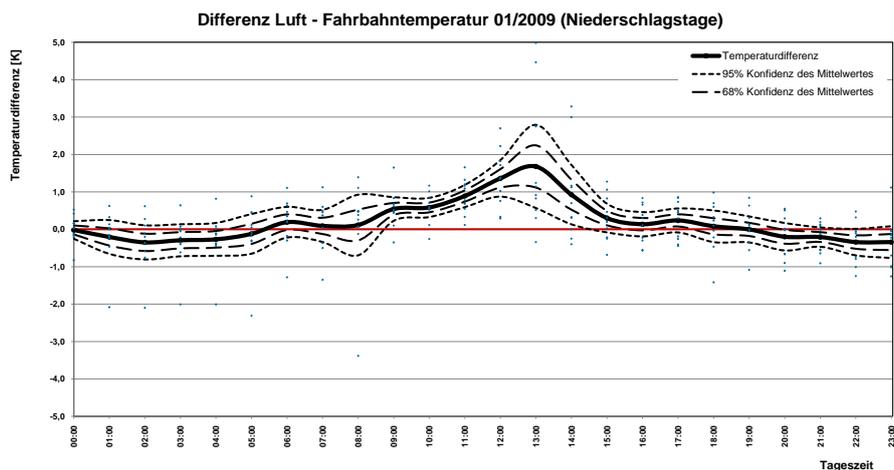
Abbildung 4.20: Gemittelte Temperaturverläufe mit Konfidenzintervallen im Jänner 2009

In Abbildung 4.20 sind die Mittelwerte der stündlichen Temperaturen als dicke durchgezogene Linien dargestellt und das 95%-Konfidenzintervall dünn punktiert. Dieses Konfidenzintervall gibt die Bandbreite an, in der 95 % der prognostizierten Werte erwartet werden können. Die einzelnen Temperaturwerte sind als Punkte dargestellt und erlauben es Ausreißer zu erkennen. Das äußere Konfidenzintervall ist wichtig, da bei Prognosen, die nicht auf dem Mittelwert, sondern auf dem unteren 95%-Konfidenzintervall basieren, die Wahrscheinlichkeit einer Unterschreitung der Fahrbahntemperatur lediglich 2,5 % beträgt. Die Verwendung dieses Wertes im Winterdienstmodell gleicht dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept, das mit dem Eurocode bereits in vielen Ingenieurwissenschaften eingeführt wurde. Es ist deutlich zu erkennen, wie an trockenen Tagen (Abb. 4.20 a) die Fahrbahntemperatur in der Zeit der intensivsten Sonneneinstrahlung um die Mittagszeit stark ansteigt. Auch die Lufttemperatur steigt, im Vergleich zu Niederschlagstagen, wesentlich mehr an, da die Luft ebenso von den Sonnenstrahlen direkt und indirekt erwärmt wird.

Ziel dieser Untersuchung ist es, den Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Fahrbahn-temperatur zu ermitteln, um so eine Prognose der Fahrbahntemperatur auf Basis einer Lufttemperaturprognose zu ermöglichen. Dieser Zusammenhang ist besser zu erkennen, wenn man die Differenz der beiden Temperaturen bildet und diese grafisch darstellt, wie das in Abbildung 4.21 geschehen ist.



(a) Tage ohne Niederschlag



(b) Niederschlagstage

Abbildung 4.21: Temperaturdifferenz mit Konfidenzintervallen im Jänner 2009

Bei heiterem Wetter ist die Fahrbahntemperatur zu Mittag um knapp 3 K höher als die Lufttemperatur, sinkt dann jedoch rapide durch Verschattung der Fahrbahn bzw. generell durch den Sonnenuntergang ab. Nach diesem Absinken, das in Golling wegen der gebirgigen Topografie und der damit schon um etwa 13:00 Uhr einsetzenden Verschattung beginnt, ist die Differenz beinahe 0 K während sonst die Fahrbahntemperatur immer über der Lufttemperatur liegt.

Bei Niederschlag bleibt die Differenz der beiden Temperaturen die meiste Zeit des Tages in einem engen Bereich um die 0 K. Der Anstieg zu Mittag ist auf Ausreißer zurückzuführen, die entstehen, wenn etwa die Wolkendecke einige Zeit aufreißt. Doch selbst mit diesen Ausreißern bleibt die Temperaturdifferenz bei etwa 1,5 K und damit zirka der Hälfte der Differenz im Vergleich zu trockenen Tagen.

# Kapitel 5

## Modellbildung

### 5.1 Modellaufbau

Die Verkehrssicherheit wird im Winter zum Großteil von der Möglichkeit der Glättebildung und dem damit verbundenen Abfall der Griffigkeit bestimmt. Damit es zu einer Glättebildung kommen kann, müssen prinzipiell zwei Bedingungen erfüllt sein.

- Es muss sich Flüssigkeit auf der Fahrbahn befinden.
- Die Fahrbahntemperatur muss unter dem Gefrierpunkt dieser Flüssigkeit liegen.

Die erste Bedingung scheint auf den ersten Blick trivial, jedoch ist es in Fällen wie Reifbildung schwer zu sagen, wann sich Flüssigkeit auf der Fahrbahn sammelt und wie viel. Die zweite Bedingung hängt, davon ausgehend, dass es sich bei der Flüssigkeit bei Solestreue um eine Sole (Wasser mit darin gelöstem Salz) handelt, wiederum von folgenden Parametern ab:

- Zum einen von der *Restsalzmenge* in  $\text{g/m}^2$  und der *Wasserfilmdicke* in mm, aus denen sich eine Solekonzentration und damit der Gefrierpunkt der Sole berechnen lässt.
- Andererseits muss die Fahrbahntemperatur prognostiziert werden, damit entweder der Zeitpunkt der Glättegefahr und/oder die benötigte Streumenge zur Vermeidung derselben aus dem Modell gewonnen werden können.
- Da eine Straße keine absolut glatte Oberfläche hat, können sich geringe Mengen Wasser oder Schnee bzw. Eis in den Rautiefen der Fahrbahn sammeln und so kaum Einfluss auf die Griffigkeit ausüben, da die Auflagefläche des Reifens auf dem Gestein nicht vermindert wird.

Das vorgeschlagene Modell ist modular aufgebaut, um die einzelnen Modellparameter möglichst unabhängig voneinander zu berechnen und eventuelle Erweiterungen leichter zu gestalten. Die Module oder Berechnungsschritte sind:

- Restsalzmengenprognose
- Wasserfilmdicke berechnen
- Fahrbahntemperaturprognose
- Fahrbahntextureinfluss

In Abbildung 5.1 wird das gesamte Modell grafisch dargestellt, um eine bessere Übersicht der Zusammenhänge geben zu können. In Rot sind Eingangswerte gekennzeichnet die entweder aus Prognosen (Wetter etc.) oder aus historischen Daten (Verkehr) gewonnen werden können und vom Straßenbetreiber nicht beeinflussbar sind. Ebenfalls rot markiert sind jene Eingabegrößen, die unmittelbar mit der bevorstehenden Streuung zu tun haben, die jedoch durch den Winterdienst beeinflussbar sind. In den grauen Kästen sind einzelne Modellparameter zusammengefasst, wobei die zur Berechnung notwendigen Formeln in Abbildung 5.1 angegeben sind. Die Formeln stehen an der Position im Modell an der sie gebraucht werden und am Rand der Skizze werden die einzelnen Parameter beschrieben. Nach Berechnung der Temperaturdifferenz verzweigt sich das Modell aufgrund des unterschiedlichen Textureinflusses in drei unterschiedliche Fälle der Frostgefahr, die allerdings noch nicht weiter ausgeführt wurden, da dazu noch Messungen fehlen.

Die historisch gewonnenen Daten müssen im Regelfall nur in seltenen Fällen (Straßenneubau, der zu einer Verkehrszunahme führt, etc.) angepasst werden. Die Prognosedaten sind vom meteorologischen Dienst zu beziehen und in das Modell einzubinden. Diese beeinflussen die Fahrsituation stark und sind die wichtigsten Eingangsparameter für im Modell, allerdings hat der Straßenbetreiber keinen Einfluss darauf und muss seine Winterdienststrategie an das Wetter anpassen. Worauf er hingegen Einfluss hat, sind die Eingangsgrößen *Streuzeitpunkt* und *Streugut* als entsprechende Reaktion auf das aktuell herrschende Wetter. Hier kann mit Hilfe der Modellrechnung durch Simulation verschiedener Varianten eine optimale Streustrategie gefunden werden.

Die Programmierung des Modelles erfolgte in MS Excel, um möglichst flexibel zu bleiben und eine Eingabe von Messdaten an praktisch jedem Windows-PC zu ermöglichen. Gerade in der Entwicklungsphase ist dieses Vorgehen sinnvoll gewesen, da Änderungen sehr schnell und ohne großen Programmieraufwand vorgenommen werden konnten. Die statistische Auswertung erfolgte über die in MS Excel eingebaute multiple Regression die eine gute Näherung bietet. Das Bestimmen einer Funktion, die das Verhalten der Restsalzabnahme exakt beschreibt, wird einer der Schritte sein, der im Rahmen des am Institut durchgeführten Winterdienstprojektes erst nach Fertigstellung dieser Diplomarbeit implementiert werden kann.

Bei der Interpretation der Modellberechnungsergebnissen ist zudem zu bedenken, dass das Gefrieren des Wasserfilms nicht sofort zu einem Unfall führt.

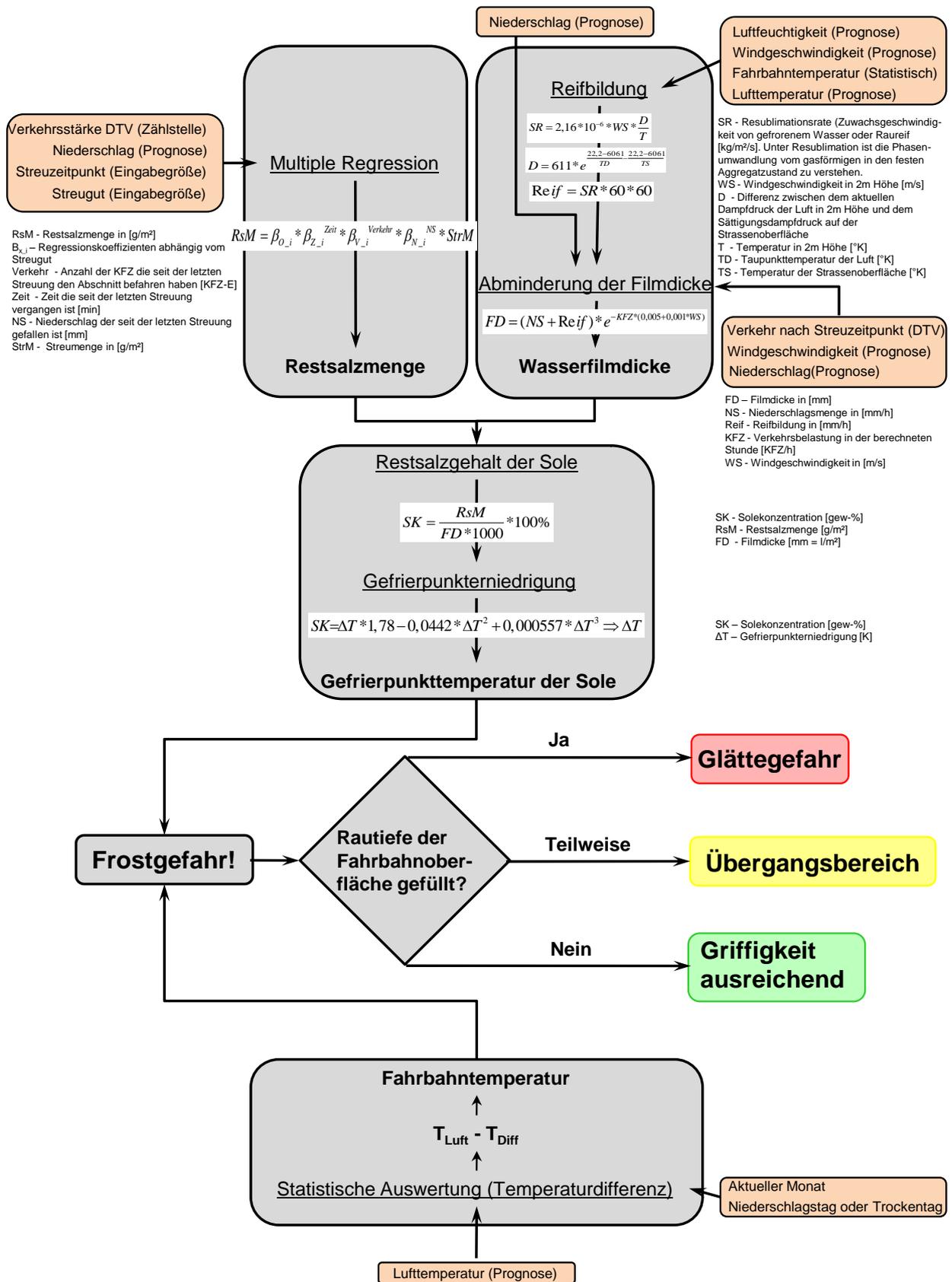


Abbildung 5.1: Grafische Darstellung des Modells

## 5.2 Einflussgrößen

### 5.2.1 Niederschlagsmenge

Die wichtigste Einflussgröße auf die Wasserfilmdicke stellt die Niederschlagsmenge dar, da durch den Niederschlag im Vergleich zu anderen Einflüssen die größte Menge an Wasser auf die Fahrbahn gelangt. Zu den Niederschlagsmengen und -häufigkeiten gibt es genaue und lange zurückreichende Aufzeichnungen, die eine statistische Analyse zulassen, die sich auch in der Erstellung von Karten mit durchschnittlichen Niederschlagsmengen für das gesamte Bundesgebiet widerspiegelt. Aus diese Karten lassen sich Bandbreiten und Durchschnittswerte für Niederschläge und damit auch Winterdiensteinsätze für unterschiedliche Regionen ablesen.

Zur Vorhersage von Niederschlagsmengen existiert eine Vielzahl an Prognosediensten, die auf unterschiedliche Modelle zurückgreifen können. Generell gilt jedoch, dass je kleiner das Vorhersagegebiet wird, umso ungenauer werden die Prognosen, da starke lokale Schwankungen auftreten können. So kann beispielsweise ein hoher Baumbestand nahe einer Straße Niederschlag, der durch starken Wind vertragen wird, teilweise zurückhalten, was im Vergleich mit normal exponierten Teilen der Straße zu Abschnitten mit weniger Wasser auf der Fahrbahn führt. Dieser Effekt wird stärker, wenn der Niederschlag in Form von Schnee fällt, der dann durch den Wind transportiert werden kann, wenn er schon gefallen ist (Schneeverwehungen).

Der Niederschlag hat, außer dass dadurch überhaupt erst Wasser auf die Fahrbahn gelangt, gleich mehrere Wirkungsweisen, wie er zum Gefrieren des Wasserfilms beiträgt. Erstens wird durch das Wasser des Niederschlags die Salzmenge, die auf der Fahrbahn liegt, verdünnt und somit der Gefrierpunkt der Lösung erhöht. Zweitens wird durch den Niederschlag, der über die Fahrbahn in die Entwässerung abläuft, auch gelöstes Salz von der Fahrbahn befördert. Eine genau Beschreibung der Verdrängungsmechanismen erfolgt in Abschnitt 5.3.3.

### 5.2.2 Wind

Der Wind bzw. die Windgeschwindigkeit hat zwei gegenläufige Auswirkungen

- Zum einen wird die Reifbildung durch eine höhere Windgeschwindigkeit begünstigt. Da die Feuchtigkeit, die sich auf der Straße sammelt, bei der Reifbildung aus der Luft stammt und diese nur eine begrenzte Menge davon enthält, bewirkt der Austausch der Luft über der Fahrbahn durch den Wind eine verstärkte Reifbildung. Weht der Wind zusätzlich aus einer Richtung, in der vor der Straße noch ein Gewässer liegt, nimmt die Luft dort oft zusätzliche Feuchtigkeit auf, was zu verstärkter Reifbildung beitragen kann.
- Andererseits wird das Wasser, das sich auf der Fahrbahn befindet, zum Teil durch Verdunstung wieder in der Luft aufgenommen und abtransportiert. Wie bei der Reifbildung ist hier ein stärkerer Strom an neuer, diesmal aber trockenerer Luft ein beschleunigender Faktor für die Auftrocknung der Fahrbahn.

### 5.2.3 Verkehr

Das durch Niederschlag und Reif auf der Fahrbahn befindliche Wasser bildet einen Wasserfilm, der durch den Verkehr in Quer- und Längsrichtung der Fahrbahn verspritzt wird. Durch ein Verdrängen des Wassers quer zur Fahrtrichtung wird die Rollspur schneller trocken als jene Bereiche, die nicht ständig überrollt werden. In Fahrtrichtung wird das Wasser und damit auch das darin gelöste Salz gleichmäßiger verteilt, als dies ohne Verkehrseinfluss geschehen würde (vgl.

Kap. 4.1). Dadurch entsteht eine größere Verdunstungsfläche und damit eine Begünstigung der aufrocknenden Wirkung. Da das Wasser auf die gesamte Straßenlänge verteilt wird, kann es lokal auch zur Anfeuchtung trockener Abschnitte kommen.

Im Gegensatz zu den Einflussgrößen Niederschlag und Wind ist der Verkehr relativ konstant und kann daher zumindest mittelfristig wesentlich besser prognostiziert werden als Wetterphänomene. Abbildung 5.2 zeigt eine gemittelte normalisierte Verkehrsganglinie der Teststrecke die etwas atypisch ist, weil an den Wochenenden mehr Verkehr fährt als an Wochentagen. Die Erklärung hierfür liegt an der zur Auswertung gewählten Zählstelle, die an der A10 Tauernautobahn bei Golling liegt wo der Urlauberverkehr sehr ausgeprägt ist. Dennoch kann der wochentägliche Verlauf als typisch angesehen werden und nach einer Normalisierung der Werte steht so eine einfache Prognosemöglichkeit zur Verfügung, die lediglich eine Eingabe des DTV erfordert, um für jede beliebige Straße den seit einer Streufahrt gefahrenen Verkehr zu berechnen. Sind abweichende Verläufe zu erwarten, sind genauere Betrachtungen der Verkehrsmenge und des Tagesganges notwendig.

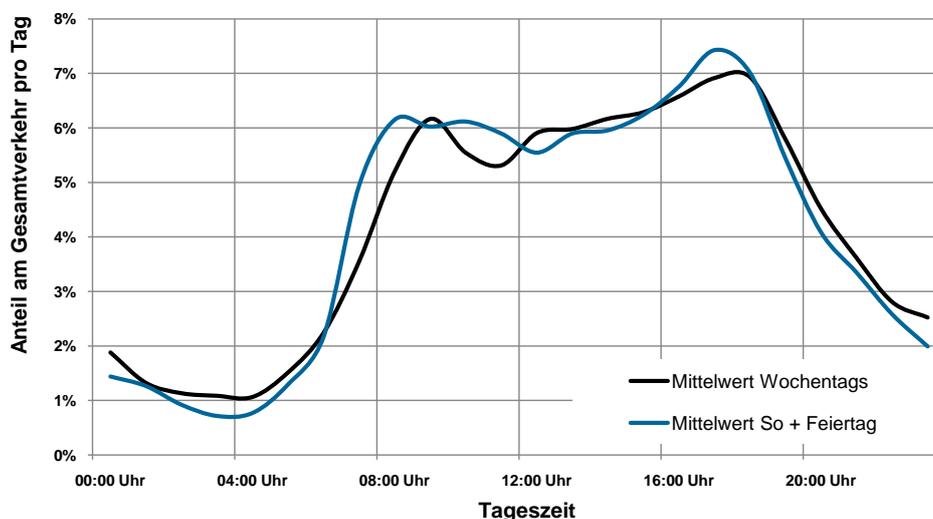


Abbildung 5.2: Normalisierte Verkehrsganglinie A10 bei Golling

## 5.2.4 Zeit

Für die Abnahme der Restsalzemengen ist die Zeit hauptsächlich deshalb von Bedeutung, da, je größer eine Zeitspanne ist, umso mehr KFZ durch einen Abschnitt gefahren sind. Als Einzelgröße ist sie theoretisch also nur von geringer Bedeutung, da das Salz, wenn kein Niederschlag fällt und keine KFZ es verdrängt, auf der Fahrbahn liegen bleibt. Um etwaige andere, noch unbekannte Einflussgrößen jedoch abzudecken, wurde die Zeit, die seit dem letzten Streuvorgang vergangen ist, als unabhängige Variable in die multiple Regression aufgenommen.

## 5.2.5 Luft- und Fahrbahntemperatur

Die Lufttemperatur hat einen direkten Einfluss auf die Reifbildung und damit die Filmdicke auf der Fahrbahn. Einen indirekten Einfluss hat die Lufttemperatur auch auf die im Modell verwendete Fahrbahntemperatur, die für ein Frieren des Wasserfilms auf der Fahrbahn verantwortlich ist. Theoretisch ist nicht die Fahrbahntemperatur, sondern die Temperatur des Wasserfilmes für ein

Frieren desselben ausschlaggebend. Da die Temperatur des Wasserfilms aber mit den vorhandenen Messgeräten nicht während der Messfahrt gemessen werden kann und der Unterschied zwischen den beiden sehr gering ausfällt, wird für die Berechnungen auf die Fahrbahntemperatur zurückgegriffen.

## 5.3 Modellparameter Wasserfilmdicke

### 5.3.1 Niederschlagsmenge

Die Niederschlagsmenge hat einen offensichtlichen Einfluss auf die Wasserfilmdicke und wird über die Wetterprognosen in das Modell integriert. Das Modell rechnet mit Niederschlagsmengen in mm/h, wie sie etwa in dem von der ASFINAG angewendeten Straßenwetterinformationdienst WebSWIS angegeben werden.

### 5.3.2 Reifbildung

#### Einflussfaktoren auf Reifbildung

Die Reifbildung wird im Winterdienstmodell mit gängigen Formeln, die eine gute Näherung bringen, berechnet. Die grundsätzlichen Einflussgrößen für die folgenden Formeln 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 [Hausmann, 2009] wie folgt:

$$SR = 2,16 * 10^{-6} * WS * \frac{D}{T} \quad (5.1)$$

mit

$$D = 611 * e^{\left(\frac{22,2-6061}{TD} - \frac{22,2-6061}{TS}\right)} \quad (5.2)$$

Es bedeuten:

- SR - Resublimationsrate (Zuwachsgeschwindigkeit von gefrorenem Wasser oder Raureif [kg/m<sup>2</sup>/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]

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

$$TD = \frac{272,186 * (\ln(E_i) - \ln(6,11153))}{22,4433 - (\ln(E_i) - \ln(6,11153))} \quad (5.3)$$

Es bedeuten:

- E<sub>i</sub> - Sättigungsdampfdruck für Eisbildung bei gegebener Lufttemperatur
- TD - Taupunkttemperatur in [°C]

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

$$E_i = E_o * e^{\frac{22,4433 * T}{272,186 + T}} \quad (5.4)$$

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 die in mm/h anfällt zu erhalten wird die Resublimationsrate mit Formel 5.5 umgerechnet

$$Reif = SR * 60 * 60 \quad (5.5)$$

Es bedeuten:

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

Für die Berechnung der Reifmenge mithilfe der Formeln 5.1 bis 5.4 ist es nötig die Lufttemperatur und die Fahrbahntemperatur zu kennen. Die Lufttemperatur wird ausgehend von der gemessenen Temperatur mithilfe von mittleren Tagesganglinien prognostiziert, diese Prognose soll später durch jene eines professionellen Wetterdienstes wie etwa webSWIS der AustroControl ersetzt werden.

Die Werte der Fahrbahntemperatur werden über eine statistische Auswertung historischer Daten gewonnen, wobei Trockentage und Niederschlagstage sowie der Monat berücksichtigt werden. Es wird die Differenz zwischen Fahrbahntemperatur und Lufttemperatur betrachtet und aufgrund der Lufttemperatur auf die zu erwartende Fahrbahntemperatur geschlossen. Diese vorläufige Lösung lässt erste Modellrechnungen zu, für konkrete Einsatzzwecke ist sie jedoch zu ungenau, da eine genaue Prognose der Fahrbahntemperatur mit dieser Methode nicht möglich ist.

Abbildung 5.3 zeigt eine solche Auswertung der Temperaturdifferenzen aus der sich zu einer prognostizierten Lufttemperatur durch Addition der Differenz zur jeweiligen Tageszeit die Fahrbahntemperatur vorhersagen lässt.

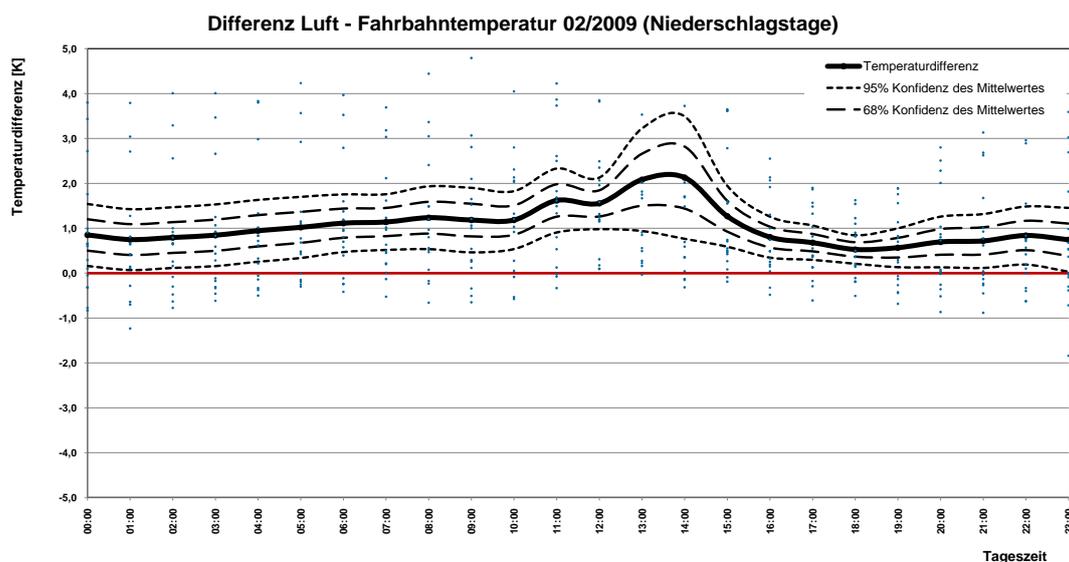


Abbildung 5.3: Temperaturdifferenz an Niederschlagstagen im Februar

### 5.3.3 Abminderung durch Verkehr und Verdunstung

Aus ersten Versuchen mit Streuungen auf Parkflächen ist gleich zu Beginn aufgefallen, dass der Verkehr auf die gleichmäßige Verteilung von Niederschlag und Restsalzmengen sehr starken Einfluss hat. Die Mechanismen der Verteilung des Wassers auf der Fahrbahn durch den Verkehr und der Querneigung sind in Abbildung 5.4 mit Nummern markiert und werden kurz erläutert.



Abbildung 5.4: Skizze der Einflussgrößen

- 1** In Österreich ist in der Straßenprojektierung eine Mindestquerneigung von 2,5 % vorgesehen, um ein Abfließen des Niederschlagswasser von der Fahrbahn zu gewährleisten. Wenn, wie hier im Bild, der Niederschlag in Form von Schnee fällt, ist dieser Effekt nicht vorhanden und der gesamte Niederschlag muss mechanisch durch Räumfahrt von der Fahrbahn befördert werden.
- 2** 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 gekennzeichnet, während die Verspritzungen 2b und 2c das Wasser zwar aus der Rollspur, aber nicht von der Fahrbahn verdrängen.
- 3** 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 auch für eine gleichmäßige Verteilung von Wasser und damit auch Taumittel in der Rollspur gesorgt, die von den Streugeräten so nicht erreicht wird.

Das zeitliche Abfließen des Wassers in Folge der Querneigung wird dadurch berücksichtigt, dass nur die Niederschlagsmenge der aktuellen Stunde mit 50 % der vorhergehenden Stunde addiert wird. Die Verdrängung durch den Verkehr und die Verdunstung wird mithilfe der Formel 5.6 aus [Hausmann, 2009] berücksichtigt. Die Werte für die Filmdicke werden für jede Stunde berechnet.

$$FD = (NS + Reif) * e^{-KFZ*(0,005+0,001*WS)} \quad (5.6)$$

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]

## 5.4 Modellparameter Restsalzmenge

Um die Abnahme der Restsalzmenge auf der Fahrbahn modellhaft abzubilden, wurden mit dem Restsalzmessgerät *SOBO 20* mehrere Messreihen durchgeführt und diese statistisch ausgewertet. Es wurde eine multiple Regression, die als Zielparameter die Restsalzmenge hat, mit folgenden als wesentlich geltenden Einflussfaktoren durchgeführt, die schon in Abschnitt 5.2 genauer beschrieben wurden:

- Verkehr
- Zeit
- Niederschlag
- Streumittel
- Streumenge

Mit den ersten drei Parametern als Regressoren, kann die Restsalzmenge zu jeder beliebigen Zeit abhängig von Verkehr und Niederschlag - die frei gewählt werden können - mit folgender Formel berechnet werden. Für die Streugüter Trockensalz, Feuchtsalz (NaCl), Feuchtsalz (Safe-cote) und Feuchtsalz (CaCl<sub>2</sub>) sind jeweils eigene  $\beta$ -Werte berechnet worden um die verschiedenen Einflüsse der Streugüter zu berücksichtigen. Die ursprüngliche Streumenge *StrM* wird durch die  $\beta$ -Werte abgemindert.

$$RsM = \beta_{0\_i} * \beta_{V\_i}^{KFZ} * \beta_{Z\_i}^{Zeit} * \beta_{NS\_i}^{NS} * StrM \quad (5.7)$$

Es bedeuten:

- RsM - Restsalzmenge in [g/m<sup>2</sup>]
- $\beta_{x\_i}$  - Regressionskoeffizienten abhängig vom verwendeten Streumittel
- KFZ - Anzahl der KFZ, die seit der letzten Streuung den Abschnitt befahren haben [KFZ-E]
- Zeit - Zeit, die seit der letzten Streuung vergangen ist [min]
- NS<sub>S</sub> - Niederschlagssumme, der seit der letzten Streuung gefallen ist [mm]
- StrM - Streumenge in [g/m<sup>2</sup>]

Die  $\beta_i$ -Werte werden durch die statistische Auswertung berechnet wobei mit zunehmender Stichprobenanzahl auch die Genauigkeit der Prognose zunimmt.

## 5.5 Gefrierpunktberechnung

Der Gefrierpunkt einer Sole hängt in erster Linie von der Salzkonzentration ab, die durch folgende einfache Formel ausgedrückt wird

$$SK = \frac{RsM}{FD * 1000} \quad (5.8)$$

Es bedeuten:

- SK - Solekonzentration [%]

RsM - Restsalzmenge [g/m<sup>2</sup>]  
FD - Filmdicke [mm  $\hat{=}$  l/m<sup>2</sup>]

Ein Millimeter Niederschlag (meteorologische Angaben) entspricht einem Liter pro m<sup>2</sup>, das heißt 1000 Gramm pro m<sup>2</sup> (Einheit zur Modellberechnung). Die Menge an gelöstem Salz steht in direktem Zusammenhang mit dem Gefrierpunkt der Lösung, wobei die molare Masse des Salzes zählt, die z. B. bei NaCl verdoppelt wird, weil sich diese in Na und Cl teilen. Die Abschätzung mit der dieser Zusammenhang berechnet wird, lautet (aus dieser Formel wird  $\Delta T$  berechnet, welches sich aber als Zielgröße in einer Formel nicht anschaulich darstellen lässt):

$$SK = \Delta T * 1,78 - \Delta T^2 * 0,0442 + \Delta T^3 * 0,0005577 \quad (5.9)$$

Es bedeuten:

SK - Solekonzentration in [gew-%]

$\Delta T$  - Temperaturdifferenz zum Gefrierpunkt ohne Salz  $\hat{=}$  Temperatur\*(-1) [°C]

Da eigene Formeln, die auch andere Taumittel und Mischungen berücksichtigen, erst nach Laborversuchen mit dem Temperaturschrank aufgestellt werden können, ist diese auf Internetrecherche beruhende Formel 5.9 erstweilen Platzhalter und gilt ausschließlich für reines NaCl. Der Verlauf dieses Zusammenhangs ist im Rahmen der Einleitung zu den eutektischen Diagrammen in Abbildung 2.12 auf Seite 36 zu finden.

Nun kann mit dem Modell ein Gefrierpunkt errechnet und dieser dann mit der prognostizierten Fahrbahntemperatur verglichen werden, woraus sich eine Temperaturdifferenz ergibt. Sollte diese Differenz kleiner als 0 °C sein, also die Fahrbahntemperatur unterhalb der Gefrierpunktttemperatur liegen besteht die Gefahr von Glätte, die durch Ausbringung weiteren Taumittels verhindert Glättebildung werden soll!

## 5.6 Einfluss der Fahrbahntextur

Der Vorgang des Gefrierens eines Wasserfilms auf der Fahrbahn wird durch das Modell relativ gut abgebildet. Jedoch geht man hier von einer glatten Fahrbahn aus, auf der auch eine sehr dünne Eisschicht sofort zu Glätte führt. Dies ist in der Realität nicht so, da bei geringen Wassermengen nur die Poren der Deckschicht gefüllt sind und noch genügend Profilspitzen über der Eisschicht frei stehen, um dem Reifen genügend Kraftschluss zu geben. Erst wenn diese Poren gefüllt sind bzw. so weit gefüllt, dass die Spitzen mit Eis bedeckt sind, tritt Eisglätte auf der Fahrbahn auf. In Abbildung 5.5 ist der Zusammenhang der Filmdicke mit der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn schematisch dargestellt.

Während moderne KFZ-Reifen durch ihre Profilierung Wasser verdrängen können und so eine in etwa gleichbleibende Kontaktfläche herstellen können (mit Ausnahme Aquaplaning) ist die Verdrängung von Schnee schwer und die von Eis praktisch unmöglich. Die Skizze bezieht sich also auf die für den Winterdienst ausschlaggebenden Zwischenmedien Schnee bzw. Eis. Winterreifen haben zusätzlich zur Profilierung noch Lamellen, die sich in den Schnee verhaken sollen und damit eine bessere Kraftübertragung ermöglichen, die sich deutlich im Vergleich der Bremswege von Sommer- und Winterreifen auf Schneefahrbahn zeigt. Auf einer glatten Eisfläche sind jedoch auch die Lamellen wirkungslos und das Fahrzeug ist kaum beherrschbar. Je geringer die Rautiefe der Fahrbahn durch steigende Filmdicke gefüllt werden, umso weniger Kontaktfläche besteht zwischen Reifen und Fahrbahn.

Ein weiterer positiver Effekt der Rautiefe in der Fahrbahn ist die Ablagerung von rekristallisiertem Salz, das in den Vertiefungen der Fahrbahn liegen bleiben kann, während es an der Oberfläche durch den Reifenkontakt abgetragen wird. In Abbildung 5.6 ist die Makroaufnahme einer Fahrbahnoberfläche zu sehen, in der sich Restsalz gesammelt hat. Zur besseren Erkennbar-

keit wurde das rechte Bild am Computer nachbearbeitet. Eine solche Nachbearbeitung würde theoretisch auch eine Möglichkeit zur Abschätzung der verbleibenden Restsalzmenge bieten.

Da während der Feldmessungen allerdings noch kein Gerät zur Texturmessung zum Projekt zugezogen war, kann in der Modellrechnung kein Einfluss berechnet werden. Nachdem dieser Punkt allerdings sehr wichtig erscheint, sei hiermit noch einmal darauf hingewiesen, dass dieser Einfluss zwischen Fahrbahntextur und Griffigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit in der hier beschriebenen Form besteht und in der Folge auch im Modell berücksichtigt werden muss.

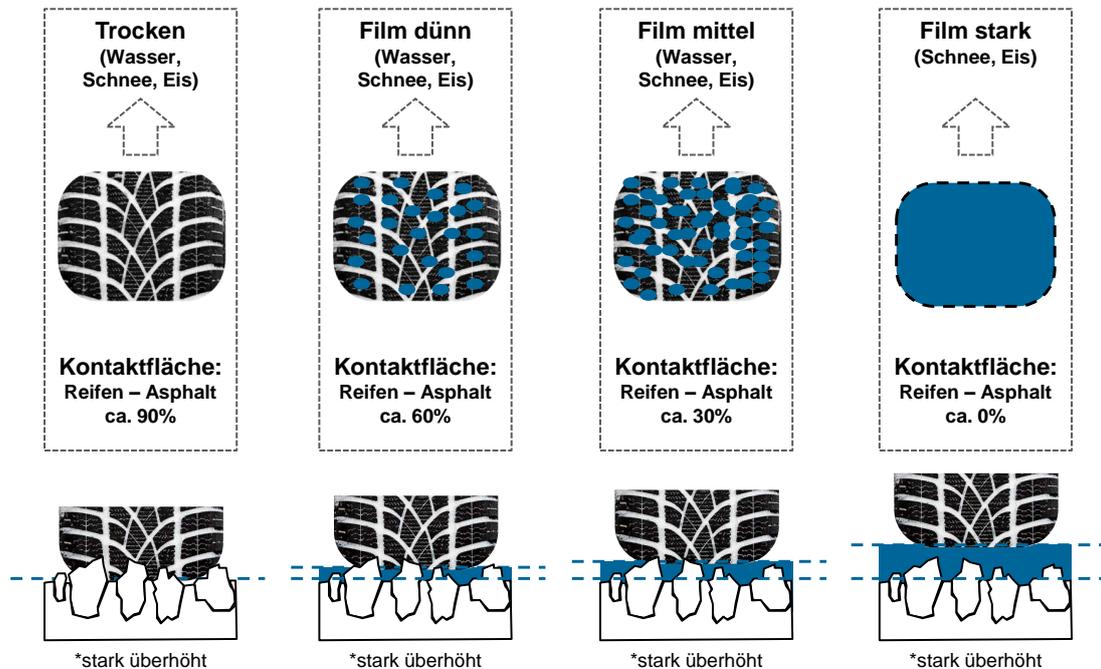
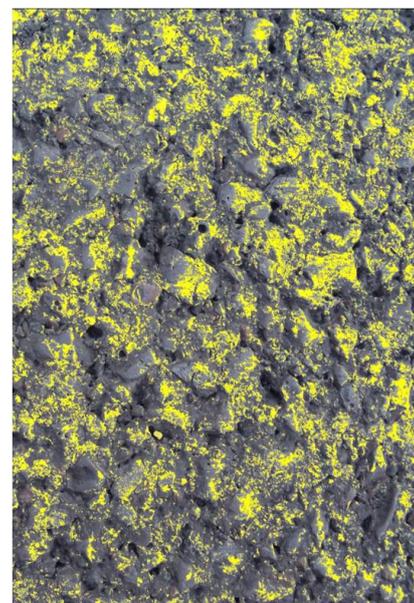


Abbildung 5.5: Zusammenhang Filmdicke - Fahrbahntextur



(a) Bild in Originalfarben



(b) Salz zur besseren Erkennbarkeit eingefärbt

Abbildung 5.6: Makroaufnahme der Fahrbahntextur

## Kapitel 6

# Ergebnisse der Szenarienrechnungen mit dem Modell

Eigene, sowie in [Hausmann, 2010] angegebene Messergebnisse der Restsalzabnahme zeigen üblicherweise einen Abfall auf etwa 5 % bis 30 % des Anfangswertes innerhalb einer halben Stunde nach dem Streuvorgang. Dies hohen „Anfangsverlust“ erfordern zum einen die Durchführung von Streufahrten möglichst knapp vor einem Niederschlagsereignis, und relativieren gleichzeitig die Bedeutung der präventiven Streuung. Weiters erfolgt bereits bei geringen Niederschlagsmengen nach der Streuung eine weitere Verdünnung, die bei den noch vorhandenen Restsalzmengen dazu führt, dass die angestrebte Gefrierpunktsabsenkung mit den üblichen Streumengen kaum noch erreichbar ist. Auf der anderen Seite wird bei Trockenheit bzw. solange die Niederschlagsmenge am Gefrieren gehindert werden kann durchgängig eine ausreichend hohes Griffigkeitsniveau erreicht. Bei Reifbildung reichen ebenfalls sehr geringe Salzmengen zur Beherrschung dieses Wetterszenarios aus.

Der Verkehr verteilt nicht nur den Niederschlag, sondern auch das darin gelöste Salz in quer- und längsrichtung aus der Rollspur. Daher ist nicht nur die durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge (DTV) sondern die Tagesverkehrsganglinie und ihre Modellierung für die Restsalzabnahme wesentlich. Entscheidend ist dabei immer die Summe der Radübergänge seit dem letzten Streueignis in Zusammenhang mit der Niederschlagsmenge bzw. Filmdicke. In Abhängigkeit der Makrotextur hat sich jedoch auch gezeigt, dass eine geringe Restsalzmenge von  $2 \text{ g/m}^2$  bis  $5 \text{ g/m}^2$  noch vergleichsweise lange in den Tiefpunkten der Fahrbahntextur verweilt. In den Modellrechnungen scheint der Gefrierpunkt der Sole oft konstant mit  $-23,5^\circ\text{C}$  auf. Dies bedeutet allerdings nicht, dass die Sole gesättigt ist, sondern dass kein Wasser zur Solebildung auf der Fahrbahn vorhanden ist und damit auch keine Gefahr der Frostbildung besteht. Die Spitzen bzw. der starke Anstieg des Gefrierpunktes in den Modellrechnungen entstehen, wenn die verbleibende Restsalzmenge durch hinzutretenden Niederschlag (Regen, Schnee, Reif) gelöst wird und die Solekonzentration rasch auf Konzentration unter 20 % sinkt.

### 6.1 Wetterszenarien

Die in einer Winterperiode vorkommenden Witterungsverhältnisse lassen sich soweit kategorisieren, dass sich die Häufigkeiten und damit die Bedeutung verschiedener Wetterszenarien in Erfahrung bringen lässt und damit entweder Vergleiche einzelner Straßenmeistereien oder Salzverbrauchs- und Kostenhochrechnungen für das gesamte Bundesgebiet durchführbar sind. Die Einteilung erfolgte in acht Kategorien, die sich unterschiedlich auf die Fahrbahnsituation auswirken und damit unterschiedliche Streustrategien erfordern.

**Kat. 0** Trockener Tag ohne Minusgrade bzw. ohne Glättegefahr

**Kat. 1** Neuschnee mit leichtem bis mäßigem Schneefall < 5 cm/d bzw. < 0,5 cm/3 h & > -5 °C

**Kat. 2** Neuschnee mit starkem Schneefall > 5 cm/d bzw. > 0,5 cm/3 h

**Kat. 3** Neuschnee mit leichtem bis mäßigem Schneefall < 5 cm/d bzw. < 0,5 cm/3 h & < -5 °C + Schneegestöber mit Verwehungen

**Kat. 4** Glättegefahr durch Reifbildung ohne Niederschlag (großes Temperaturgefälle Tag/Nacht + 90 %-100 % Luftfeuchtigkeit)

**Kat. 5** Plusgrade am Tag und Minustemperaturen in der Nacht mit Glättegefahr durch gefrierendes Schmelzwasser (Schneereste auf der Fahrbahn)

**Kat. 6** Glatteis durch gefrierenden Regen/Niesel: schwach/mäßig (RR < 5 mm/d, RR < 0,5 mm/3 h), stark (RR > 5 mm/d, RR > 0,5 mm/3 h)

**Kat. 7** Situation 1 bis 6: jedoch mit Temperaturen unter -10 °C

Der Anteil der Winterdiensttage mit entsprechendem Wetter und die dafür eingesetzten Mittel werden mittels eines Fragebogens erhoben, der in Abbildung 6.1 beispielhaft abgebildet ist und derzeit von den Autobahnmeistereien in Österreich ausgefüllt wird. Durch diese Befragung kann die Bandbreite an möglichen Winterdienststrategien erhoben werden und eine Annäherung an eine „best practice“ gefunden werden. Über die durchschnittliche Häufigkeit der jeweiligen Wetter szenarien ist es über das angegebene für jede ABM bekannte Einsparpotential möglich, das gesamte Einsparpotential für den Straßenbetreiber zu bestimmen.

Nr.	Beschreibung der typischen für den Winterdienst relevanten Wettersituationen und Winterdienstpraxis beim Projektpartner gesamt (Beschreibung der derzeit üblichen Praxis im Schnitt)	Ø Anteil an Streutagen im Ø Winter geschätzt		Ø Streumenge je Streutag [g/m <sup>2</sup> ]		Ø Anzahl der Räum/Streufahrten je Streutag [F/d]		Ø Einsparpotential* geschätzt bei opt. Streuung [%]	
0	<b>Wettersituation:</b> Trockener Tag ohne Minusgrade bzw. ohne Glättegefahr <b>Winterdienst:</b> Lediglich Kontrollfahrten 7x27h	min.	40%	min.	0	nur räumen	0	min.	0%
		max.	70%	max.	0	streuen & räumen	0	max.	25%
		mittel	55%	mittel	0,0	nur streuen	1	mittel	13%
1	<b>Wettersituation:</b> Neuschnee mit leichtem bis mäßigem Schneefall < 5 cm/d bzw. < 0,5 cm/3h & >-5°C <b>Winterdienst:</b> 4 LKW im Streueinsatz	min.	10%	min.	5	nur räumen	0	min.	0%
		max.	20%	max.	10	streuen & räumen	0	max.	50%
		mittel	15%	mittel	7,5	nur streuen	7	mittel	25%
2	<b>Wettersituation:</b> Neuschnee mit starkem Schneefall >5cm/d bzw. >0,5 cm/3h <b>Winterdienst:</b> 8 LKW im Räum-&Streueinsatz	min.	0%	min.	10	nur räumen	0	min.	0%
		max.	10%	max.	25	streuen & räumen	6	max.	15%
		mittel	5%	mittel	18	nur streuen	0	mittel	8%
3	<b>Wettersituation:</b> Neuschnee mit leichtem bis mäßigem Schneefall < 5 cm/d bzw. < 0,5 cm/3h & <-5°C + Schneegestöber mit Verwehungen <b>Winterdienst:</b> 4-8 LKW im Streu- bzw. wenn notwendig im Räumeeinsatz	min.	0%	min.	10	nur räumen	0	min.	0%
		max.	5%	max.	25	streuen & räumen	3	max.	10%
		mittel	3%	mittel	18	nur streuen	5	mittel	5%
4	<b>Wettersituation:</b> Glättegefahr durch Reifbildung ohne Niederschlag (großes Temperaturgefälle Tag/Nacht + 90-100% Luftfeuchtigkeit) <b>Winterdienst:</b> laufende Kontrollfahrten mit 2-4 LKW	min.	5%	min.	5	nur räumen	0	min.	0%
		max.	15%	max.	5	streuen & räumen	0	max.	40%
		mittel	10%	mittel	5	nur streuen	5	mittel	20%
5	<b>Wettersituation:</b> Plusgrade am Tag und Minustemperaturen in der Nacht mit Glättegefahr durch gefrierendes Schmelzwasser (Schneereste FB) <b>Winterdienst:</b> Kontrollfahrten und punktuelle Streuungen	min.	0%	min.	5	nur räumen	0	min.	0%
		max.	10%	max.	15	streuen & räumen	0	max.	10%
		mittel	5%	mittel	10	nur streuen	2	mittel	5%
6	<b>Wettersituation:</b> Glatteis durch gefrierenden Regen/Niesel: schwach/mäßig (RR<5mm/d, RR<0,5mm/3h), stark (RR>5mm/d, RR>0,5mm/3h) <b>Winterdienst:</b> 8 LKW im Streueinsatz	min.	0%	min.	15	nur räumen	0	min.	10%
		max.	5%	max.	40	streuen & räumen	0	max.	30%
		mittel	3%	mittel	28	nur streuen	8	mittel	20%
7	<b>Wettersituation:</b> Situation 1 bis 6: jedoch mit Temperaturen unter -10°C <b>Winterdienst:</b> Streu- bzw. Räumeeinsatz ausschließlich mit FS30 (CaCl2)	min.	0%	min.	3	nur räumen	0,0	min.	0%
		max.	10%	max.	6	streuen & räumen	0,4	max.	14%
		mittel	5%	mittel	4	nur streuen	0,2	mittel	7%
Σ	<b>Gesamtsumme der Winterdienstszenerien</b>	Winterdienst-tage mittel	100%	Winterdienst-tage g.mittel	3,2	nur räumen streuen & räumen nur streuen	0,0 0,4 2,5	g.min. g.max. g.mittel	0% 28% 14%

Abbildung 6.1: Anteil der Wetterszenarien an einem durchschnittlichen Winter und Streupraxis einer ABM im städtischem Bereich

## 6.2 Fahrbahnsituationen

Wichtiger für die Winterdienstmannschaft ist allerdings eine Kategorisierung der Straßenverhältnisse, um das notwendige Streuintervall und die auszubringende Streumenge festzulegen. Ein Rechenmodell wäre theoretisch in der Lage, bei einer genauen Wetterprognose und Kenntnis der aktuellen Fahrbahntemperatur, die verbleibende Restsalzmenge zu errechnen und Zeitpunkt und Streumenge für die nächste Streufahrt zu ermitteln. Dies erfordert jedoch ein Einarbeiten in komplexe Modelle und die ständige Datenerfassung und Verfügbarkeit eines Computers, was von einem Winterdienstfahrer, der letztendlich die Streumenge bestimmt, nicht während der Streufahrt durchgeführt werden kann. Deshalb werden die möglichen Streustrategien fünf auf einen Blick klar erkennbare Fahrbahnsituationen zugeordnet. Die Beschreibung der optimalen Streustrategie sowie eine verbale Fahrbahnbeschreibung lässt sich auf einem Blatt Papier unterbringen, das auch während der Streufahrt eine rasche Hilfestellung gewährt.

Die sich letztendlich aus den Wetterszenarien ergebenden Fahrbahnsituationen werden in den folgenden Punkten beschrieben und die dazugehörige, aus derzeitiger Sicht optimale Streustrategie erläutert. Diese Strategien sind für festgelegte Einflussgrößen Verkehr und Niederschlag entwickelt worden und stellen daher noch nicht die Bandbreite die durch den Verkehrseinfluss entsteht dar, die eine dieser Fahrbahnsituationen hat.

Die fünf gewählten Fahrbahnsituationen sind rechts mit einem Beispielfoto dargestellt und auf Basis der Erfahrung der Messfahrten mit dem Griptester festgelegt worden. Die Situation „Schnee neben Rollspur“ bildet den Übergangsbereich von ausreichender zu mangelnder Griffigkeit und füllt beinahe die gesamte Bandbreite der Griffigkeitsniveaus aus. Für die Fahrbahnsituationen „Trockene Fahrbahn“, „Nasse Fahrbahn“ und „Schnee in der Rollspur“ sind Modellberechnungen mit üblichen Streustrategien durchgeführt worden und auf den Seiten 83 bis 86 beschrieben.



Abbildung 6.2: Trockene Fahrbahn



Abbildung 6.3: Nasse Fahrbahn



Abbildung 6.4: Schnee neben Rollspur



Abbildung 6.5: Schnee in der Rollspur

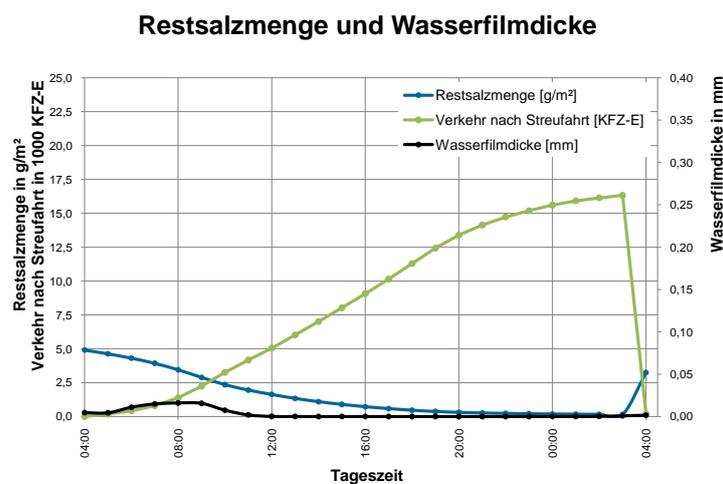


Abbildung 6.6: Eis in der Rollspur

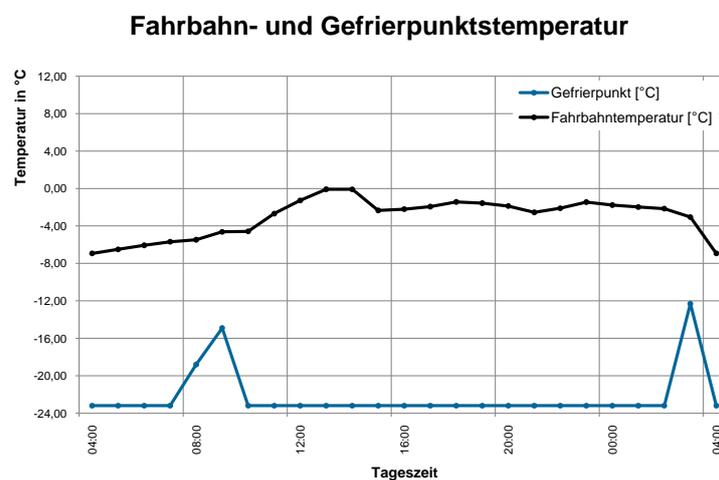
## 6.2.1 Trockene Fahrbahn

Bei trockener Fahrbahn besteht auch bei tiefen Minusgraden mangels Wasser auf der Fahrbahn keine Gefahr von Frost und einem damit verbundenen Griffigkeitsabfall. Besteht die Möglichkeit, dass sich in der Nacht Reif bildet, so ist eine Streufahrt in den frühen Morgenstunden mit einer Streumenge von  $5 \text{ g/m}^2$  bis  $10 \text{ g/m}^2$  ausreichend, um ein Frieren bzw. Reifglätte zu verhindern.

Eine trockene Fahrbahn mit leichter Reifbildung in den Morgenstunden ist am besten mit einer Streuung einmal täglich, zeitlich knapp vor Einsetzen der Reifbildung eisfrei zu halten. In der in Abbildung 6.7 dargestellten Modellrechnung reicht etwa eine Streuung von  $8 \text{ g/m}^2$  um 04:00 Uhr aus, um die Reifbildung zu verhindern. Über den Tag ist wegen des fehlenden Niederschlags kein Wasser vorhanden, das Gefrieren kann. Deswegen ist auch eine sehr geringe Restsalzmenge ausreichend.



(a) Restsalzmenge und Filmdicke



(b) Gefrierpunkts- und Fahrbahntemperaturverlauf

Abbildung 6.7: Ergebnisse aus Berechnungen für Szenario „Trocken mit Reifbildung“

Eine zweite Streuung wie vielfach üblich um 16:00 Uhr ist nach diesen Berechnungen nicht notwendig, da die Reifbildung erst gegen 03:00 Uhr einsetzt. Hier ist allerdings sehr genau auf die Wetterprognose zu achten, da es bei ungünstigen Temperatur und Luftfeuchtigkeitsverhältnissen bereits früher zu Reifbildung kommen kann.

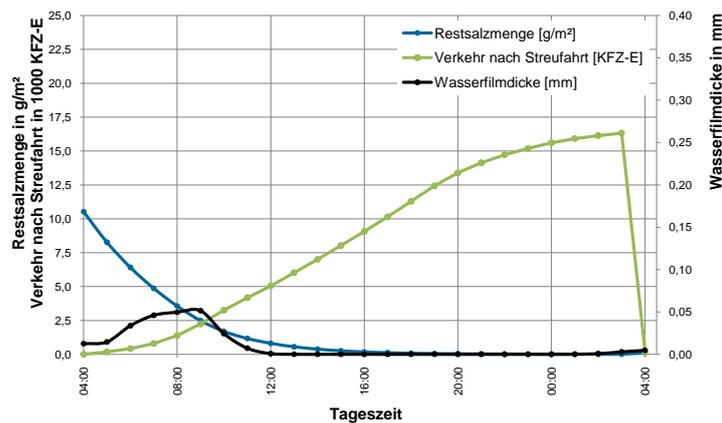
## 6.2.2 Nasse Fahrbahn

Bei nasser Fahrbahn sinkt die Griffigkeit im Vergleich zur trockenen um etwa 0,2 ab, bleibt aber weiterhin in einem hohen Bereich. Die von RoadSTAR und Griptester gemessenen Griffigkeiten werden mit einem definierten Wasserfilm zwischen Fahrbahn und Messreifen ermittelt und sind daher mit einer durch Niederschlag nassen Fahrbahn zu vergleichen. Sind die zu erwartenden Fahrbahntemperaturen über 0 °C, braucht keine Streuung zu erfolgen.

Sinkt die Fahrbahntemperatur jedoch unter die Gefrierpunkttemperatur des Wasserfilmes, so entsteht Glatteis, was einen plötzlichen Abfall der Griffigkeit bedeutet. Hier ist präventives Streuen notwendig, damit kein Anfrieren des Wassers an der Fahrbahn stattfindet.

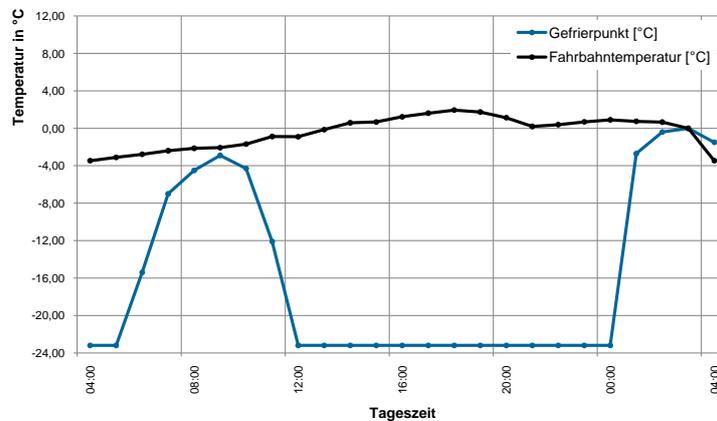
Bei Temperaturen im Bereich von 0 °C bis -4 °C und einem konstanten leichten Niederschlag von 0,2 mm/h kann ein Anfrieren des Niederschlages mit einer täglichen Streuung von 20 g/m<sup>2</sup> jeweils um 04:00 Uhr früh knapp verhindert werden, wie Abbildung 6.8 zeigt. Der Anstieg der Wasserfilmdicke in der Nacht hängt nicht mit der Reifbildung, sondern mit der Abtrocknung durch den Verkehr zusammen. Da in der Nacht weniger Verkehr fährt, bleibt auch das Wasser länger auf der Straße, während der sehr leichte Niederschlag von 0,2 mm/h im Tagesverlauf die Filmdicke praktisch nicht beeinflusst.

**Restsalzmenge und Wasserfilmdicke**



(a) Restsalzmenge und Filmdicke

**Fahrbahn- und Gefrierpunkttemperatur**



(b) Gefrierpunkts- und Fahrbahntemperaturverlauf

Abbildung 6.8: Ergebnisse der Berechnungen für Szenario „leichter Niederschlag“

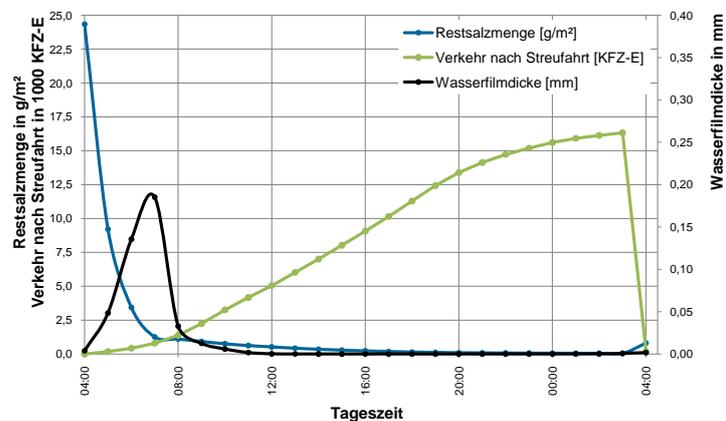
## 6.2.3 Schnee in der Rollspur

In diesem Szenario ist zusätzlich zu dem Fall „Schnee neben der Rollspur“ auch noch über die gesamte Länge eines Straßenabschnittes Schnee in der Rollspur vorhanden. Dies kann der Fall sein, wenn entweder

- der Schneefall so stark ist, dass die Schneedecke auf der Fahrbahn komplett „zuwächst“
- die Verkehrsstärke geringer ist und so bei gleicher Niederschlagsmenge die Straße schneller gänzlich mit Schnee bedeckt ist

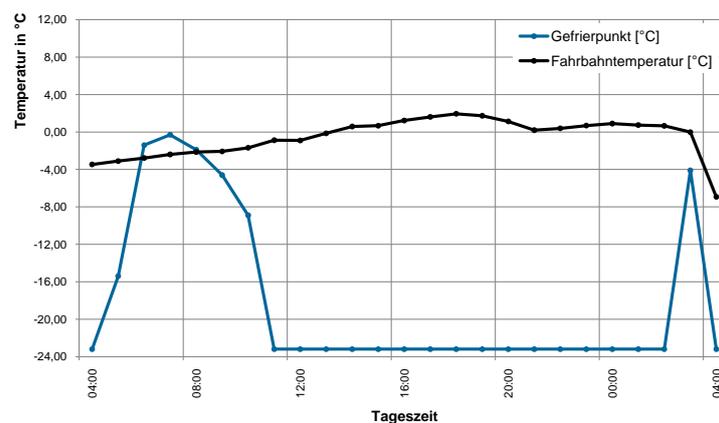
Besonders bei Niederschlägen mit hoher Intensität, die aber in der Regel kürzer sind, kommt dies an entsprechend kalten Tagen vor. Ein Beispiel für die Modellrechnung eines solchen Ereignisses ist in Abbildung 6.9 dargestellt. Hier ist ein Niederschlag mit einer Intensität von 1,0 mm/h über einen Zeitraum von 3 Stunden dargestellt. Hier ist erkennbar, dass selbst bei dieser maximalen Streumenge ein Tauen des Schnees bzw. ein Verhindern von Eis nicht mehr möglich ist.

### Restsalzmenge und Wasserfilmdicke



(a) Restsalzmenge und Filmdicke

### Fahrbahn- und Gefrierpunkttemperatur



(b) Gefrierpunkts- und Fahrbahntemperaturverlauf

Abbildung 6.9: Ergebnisse der Berechnungen für Szenario „starker Niederschlag“

## 6.2.4 Schnee neben der Rollspur

Beginnt nach einem Schneefall der Schnee auf der Fahrbahn liegen zu bleiben, so „wächst“ die Schneedecke zunächst vom Rand her über die Fahrbahn. Nach einer gewissen Zeit bleiben nur noch die Rollspuren bedingt durch den Verkehr schneefrei, der Rest der Fahrbahn ist bereits unter einer Schneedecke verborgen. Dies ist der Zeitpunkt, bei dem die Griffigkeit zu sinken beginnt. Die Rautiefen der Fahrbahntextur sind nun schon teilweise mit Schnee gefüllt, der aber vom Fahrer nicht erkannt wird, und so reichen schon geringe weitere Schneemengen aus, um eine Schneefahrbahn vorzufinden. Diese weiteren Schneemengen können auch durch den Wind in die Rollspur verfrachtet werden, was dazu führt, dass auch nach einem Niederschlagsereignis weiterhin Schnee in die Rollspur gelangen kann. Reduziert der KFZ-Fahrer bei dieser Situation nicht seine Geschwindigkeit, kann es im Falle dieser, oft nur lokal auftretenden Schneefahrbahn in der Rollspur, zum kurzfristigen Kontrollverlust kommen. Besonders auf Autobahnen wird dies aber oft nicht bemerkt, weil trotz der stark veringerter Griffigkeit, diese noch ausreicht, um das Fahrzeug auf Spur zu halten, da die Kurvenradien sehr groß sind. Ein plötzlicher Bremsvorgang ist allerdings aufgrund der reduzierten Griffigkeit nicht mehr möglich.

Bei dieser Fahrbahnsituation muss der Fahrer ohnehin ständig Räumfahrten durchführen, bei denen Tausalz allerdings nur in geringer Menge ausgebracht werden sollte. Die optimale Streustrategie für Schneefall ist in Abschnitt 6.5.2 erläutert.

## 6.2.5 Eis in der Rollspur

Die Bildung einer lokalen Eisplatte oder sogar einer großflächig vereisten Fahrbahn ist der für den Winterdienst problematischste Zustand. Eisplatten führen zu einem plötzlichen Kontrollverlust des Fahrers über sein KFZ, wobei im Falle von Eisplatten auch eine schlechte Erkennbarkeit gegeben ist. Weißer Schnee auf der Fahrbahn ist für den Fahrer erkennbar und er kann seine Geschwindigkeit dementsprechend anpassen. Zusätzlich können gute Winterreifen auch auf Schnee noch eine Kraftübertragung ermöglichen. Eis ist jedoch eher seidig matt bzw. transparent und daher nur schwer aus einem schnell fahrenden KFZ zu erkennen. Selbst ein guter Winterreifen kann auf einer glatten Eisfläche keine Haftung mehr herstellen, einzig Spikereifen oder Schneeketten können hier noch Kräfte übertragen. Eine einmal entstandene Eisfläche ist auch durch Salzstreuung kaum beherrschbar und kann nur durch Splittstreuung oder manuelle Entfernung beseitigt werden. Wenn notwendig muss diese Straße bis zur Entfernung des Eises zumindest teilweise gesperrt werden. Für dieses Szenario konnten keine Modellrechnungen angestellt werden, da die Zielsetzung schließlich war, dieses Szenario zu vermeiden und dazu noch weitere Labor- und Feldversuche notwendig sind.

## 6.3 Längere Streuintervalle durch verbesserte Streumittel

Da, wie in Abschnitt 4.3 erläutert wurde, kein späterer Abfall der Griffigkeit aufgrund eines mit Zusatzmittel versehenen Streumittels erkennbar ist, bringt die Verwendung dieser keinen Nutzen. Die Untersuchungen der Restsalzmenge mit dem Gerät SOBO 20 sind so starken Schwankungen unterlegen, dass hier keine zuverlässige Aussage über einen längeren Verbleib des Streumittels auf der Fahrbahn getroffen werden. Es gilt ebenfalls zu bedenken, dass an Stelle der Beimengung meist teurer Zusatzmittel, auch entsprechend mehr Natriumchlorid gestreut werden kann. Einzig bei sehr tiefen Temperaturen (unter  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ist, um ein Frieren der Sole im Tank zu verhindern, der Einsatz dieser Zusatzmittel sinnvoll und zum Teil sogar notwendig. Allerdings kommt es bei diesen Temperaturen nur selten zu Niederschlägen.

## 6.4 Geringerer Salzverbrauch durch variable Streumenge

In bisherigen Streuempfehlungen sind Verkehr und Niederschlag nicht entsprechend berücksichtigt worden, wobei diese auf die Liegezeit von Taumitteln einen enormen Einfluss haben. Unter Verwendung des im Rahmen dieses Projektes entwickelten Winterdienstmodelles ist es allerdings möglich, basierend auf dem DTV entsprechend variable Tabellen zu gestalten, die je nach Verkehrsstärke eine für ein Wetterszenario notwendige Streumenge angeben. Die auf Seite 99 angegebene Tabelle gilt für einen DTV von etwa 15.000, der auf der Messstrecke vorhanden war.

## 6.5 Geringerer Salzverbrauch durch Vermeidung ineffizienter Streuvorgänge

Da bei jeder Streufahrt neben den Kosten für das Streugut auch noch weitere Material-, Gerät- und Personalkosten anfallen, ist eine eingesparte Streufahrt jene mit dem höchsten wirtschaftlichen Nutzen. Die Modellrechnungen zeigen, dass bei einigen Szenarien solche Einsparung möglich sind.

### 6.5.1 Zeitnahes Streuen

Durch den kurz nach der Streufahrt sehr raschen Abfall der Restsalzmenge ist ein möglichst zeitnahes Streuen unerlässlich. Zeitnah bedeutet hier, dass die Streufahrt möglichst unmittelbar vor einem Niederschlagsereignis stattfindet.

Eine Präventivstreuung zwei Stunden vor einem Niederschlagsereignis ist nicht zielführend, da bis zu Ereignisbeginn das meiste Tausalz bereits wieder von der Fahrbahn verdrängt wurde. Die Optimierung zur zeitnahen Streuung kann nur über eine Präzisierung der Wetterprognose geschehen, die jedoch nicht Teil des Projektes ist.

Der Zeitpunkt der Streuung sollte im Optimalfall nicht mehr als 30 min vor dem Beginn des Niederschlagsereignisses liegen.

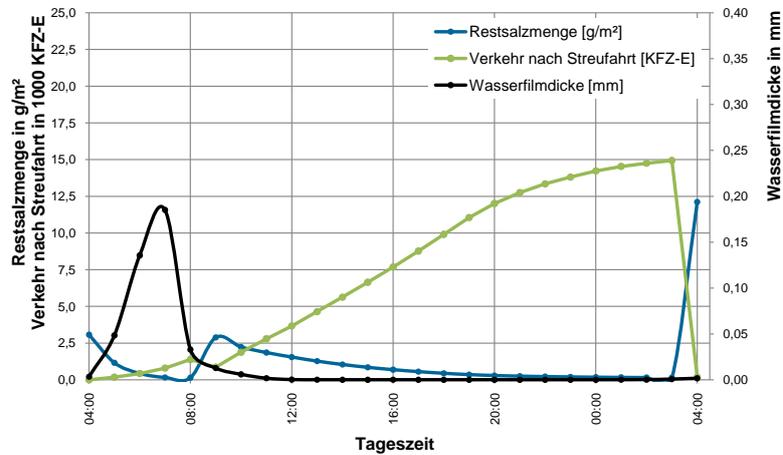
### 6.5.2 Keine Maximalmengen bei starkem Schneefall ausbringen

Eine Modellrechnung zeigte in Abbildung 6.9 auf Seite 85, dass selbst eine Streumenge von  $40 \text{ g/m}^2$  bei einem dreistündigen Niederschlag mit  $1 \text{ mm/h}$  Intensität nicht ausreicht, um Frostgefahr zu verhindern. Die Niederschlagsdauer von drei Stunden wurde deshalb gewählt, weil dies das Mindestintervall ist, das auf österreichischen Autobahnen und Schnellstraßen vom Gesetzgeber gefordert wird.

Dieselbe Wettersituation wird nun mit einer geringeren Streumenge von  $2 \times 5 \text{ g/m}^2$  simuliert und das Ergebnis bleibt gleich, wobei aber  $30 \text{ g/m}^2$  weniger verbraucht wurden. Die Ergebnisse der Modellrechnung sind in Abbildung 6.10 dargestellt. Da die zusätzliche Streufahrt ohnehin durchgeführt werden muss, da auch bei genügend Restsalz der Schnee geräumt werden muss fallen keine zusätzlichen Kosten für eine weitere Fahrt an. Wie bereits in Abschnitt 2.3.3 erwähnt, ist es nicht möglich größere Niederschlagsmengen einfach wegzutauen, da die erforderlichen Streukapazitäten nicht gegeben sind. In Wettersituationen mit starkem Schneefall *kann* die Straße nicht schneefrei gehalten werden, das gestreute Salz führt also nicht zum Ziel. Viele Winterdienstfahrer streuen aber genau bei diesen Wettersituationen so viel, wie mit dem Streugerät möglich ist, im Glauben den Schnee restlos tauen zu können.

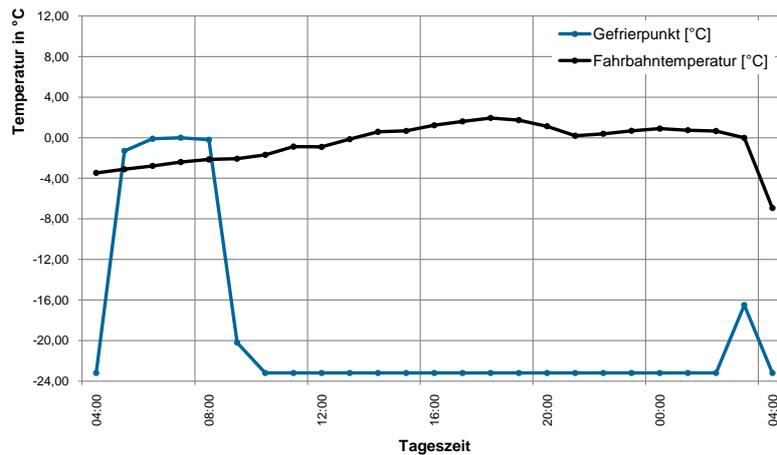
Die Einsparung von  $30 \text{ g/m}^2$  entspricht einer Einsparung von  $10,00 \text{ €}$  pro Fahrstreifenkilometer bei einer Fahrstreifenbreite von  $3,75 \text{ m}$ . Für das Netz der ASFINAG ( $11.000 \text{ Fstr.km}$ ) bedeutet dies eine mögliche Einsparung von  $110.000 \text{ €}$  bei jedem Niederschlagszenario dieser Art.

### Restsalzmenge und Wasserfilmdicke



(a) Restsalzmenge und Filmdicke

### Fahrbahn- und Gefrierpunkttemperatur



(b) Gefrierpunkts- und Fahrbahn temperaturverlauf

Abbildung 6.10: Berechnungen für das Szenario „starker Niederschlag“

### 6.5.3 Reduktion der Streufahrten an trockenen Wintertagen

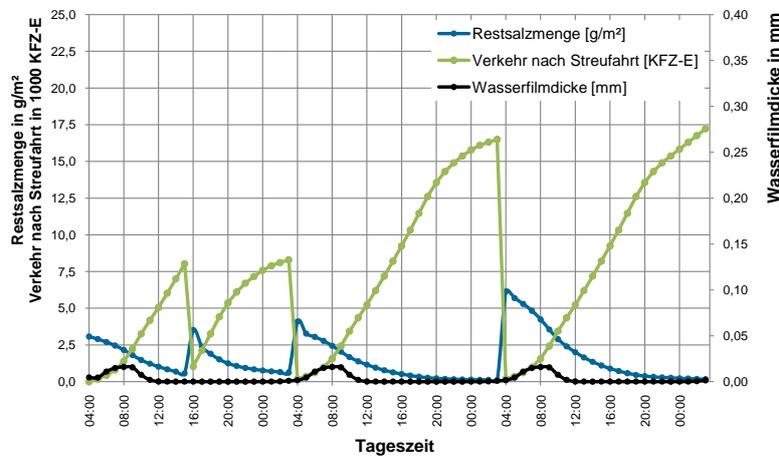
Ein häufig vorkommendes Wetterszenario ist ein Wintertag ohne Niederschlag, wobei in der Nacht und den Morgenstunden jedoch die Gefahr einer Reifbildung besteht, die zu Glätte führen kann. Um diese Glättebildung zu verhindern, wird häufig in den frühen Morgenstunden *und* am späten Nachmittag eine Streufahrt durchgeführt. Da aber jenes Salz, das am späten Nachmittag ausgebracht wurde, durch den Abendverkehr von der Fahrbahn verdrängt wird und sich durch den starken Verkehr kein Reif an der Fahrbahn ansammeln kann, ist eine Reduktion auf eine Streufahrt pro Tag denkbar.

Mit Hilfe des entwickelten Modelles war es möglich die Auswirkungen zu berechnen und darzustellen, wobei in der folgenden Abbildung 6.11 drei aufeinanderfolgende Tage mit denselben

Witterungsbedingungen aber verschiedenen Streustrategien dargestellt sind. Die Witterungsbedingungen sind Tiefsttemperaturen von  $-4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  in der Nacht, eine relative Luftfeuchtigkeit von etwa 90% und Wind mit 5 m/s. Die Streustrategien sind:

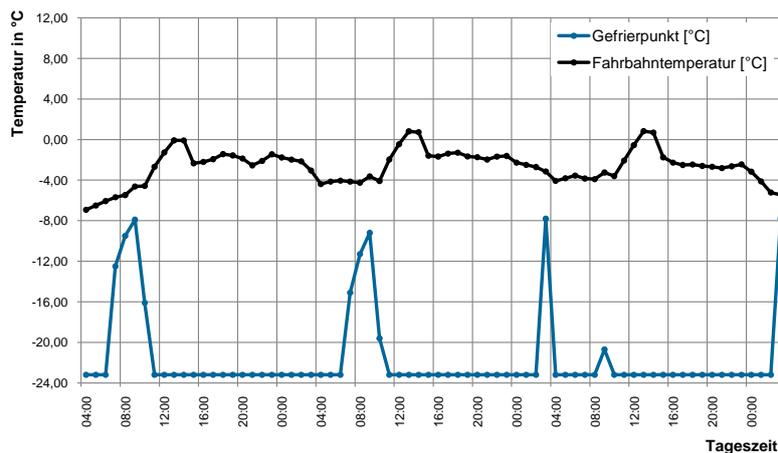
- Tag 1** Hier ist die übliche Vorgangsweise mit zwei Streufahrten pro Tag dargestellt, wobei jeweils die Minimalmenge von  $5\text{ g/m}^2$  gestreut wird.
- Tag 2** Hier ist eine reduzierte Vorgangsweise mit einer morgentlichen Streufahrt pro Tag dargestellt, wobei ebenfalls die Minimalmenge von  $5\text{ g/m}^2$  gestreut wird.
- Tag 3** Hier ist eine reduzierte Vorgangsweise mit einer morgentlichen Streufahrt pro Tag dargestellt, wobei zur Erhöhung der Sicherheit gegen Reifglätte eine Menge von  $10\text{ g/m}^2$  gestreut wird.

### Restsalzmenge und Wasserfilmdicke



(a) Restsalzmenge und Filmdicke

### Fahrbahn- und Gefrierpunkttemperatur



(b) Gefrierpunkts- und Fahrbahntemperaturverlauf

Abbildung 6.11: Berechnungen für das Szenario Reifbildung mit verschiedenen Streustrategien

In den Abbildung 6.11 ist zu erkennen, dass in allen drei Fällen keine Glättegefahr eintritt, wobei sich die Tage mit den Minimalstreumengen sehr ähnlich verhalten. Bei einer einmaligen Streuung um 04:00 Uhr ist jedoch zu erkennen, dass eine Stunde vor der nächsten Streuung ein plötzlicher

Anstieg der Gefrierpunktemperatur stattfindet, da nur noch sehr wenig Salz auf der Fahrbahn ist und so bereits geringste Wassermengen reichen, um die frostsichere Solekonzentration zu überschreiten. Dies stellt eine gefährliche Situation dar, da eine Verzögerung der Streufahrt um einen Zeitschritt (eine Stunde) bereits eine Reifglättebildung ermöglicht.

Da diese in der Modellrechnung knappe Situation noch mit Unsicherheiten zu sehen ist, kann eine einmalige Streuung von  $5 \text{ g/m}^2$  pro Tag vorerst NICHT empfohlen werden. Wird die Streumenge auf  $10 \text{ g/m}^2$  verdoppelt, ist diese Gefahr aus Sicht des Modelles immer noch gegeben, da die verbleibende Restsalzmenge in beiden Fällen sehr gering ist.

Berechnet man die Kosten für die Streufahrten der verschiedenen Strategien für ein beispielhaftes Netz von 200 Fahrstreifenkilometer mit 3,75 m Fahrstreifenbreite, für jeweils einen Tag, ergibt sich folgendes Bild:

	Tag 1	Tag 2	Tag 3
<b>Streukosten pro Tag (Salz)</b>	100%	50%	100%
<b>Streufahrten pro Tag</b>	2	1	1
<b>Kosten der Streufahrten pro Tag</b>	100%	50%	50%
<b>Gesamtkosten pro Tag</b>	100%	50%	65%

Tabelle 6.1: Streukosten für drei verschiedene Strategien

Die komplette Einsparung einer Streufahrt, was jedoch unsicher erscheint, würde nur 50 % der Kosten verursachen, die sonst an einem üblichen trockenen Winterdiensttag anfallen. Eine einmalige Streufahrt mit der doppelten Menge an Streumittel ist aus Sicht der Materialkosten gleich teuer, da jedoch eine Fahrt eingespart wird, belaufen sich die Kosten nur noch auf 65 % der üblichen Streufahrtenkosten eines Tages mit zwei Fahrten zu je  $5 \text{ g/m}^2$ .

## 6.6 Wirtschaftlichkeit & Überlegungen zu den Streufahrten

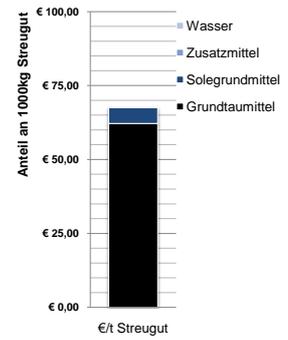
### 6.6.1 Kosten pro Kilogramm Streugut

Durch die unterschiedliche Zusammensetzung der Streugüter aus Stoffen, die zum Teil sehr wenig kosten wie etwa Wasser und teuren Stoffen wie Zusatzmitteln, entsteht eine große Bandbreite an Kosten für fertig zusammengemischte Streugüter. In den folgenden Tabellen und Abbildungen sind für vier gebräuchliche Streugüter die Kosten für jeweils ein Kilogramm fertiges Streugut berechnet worden. Diese Kosten sind entscheidend, da vom Streuwagenfahrer nur die Streumenge der ausbringfertigen Mischung verändert werden kann, er also bei einer Streumenge von  $10 \text{ g/m}^2$  mit einem kg Streugut zwar immer  $100 \text{ m}^2$  betreuen kann jedoch die effektive Taumittelmenge je nach Streugut unter  $10 \text{ g/m}^2$  liegen kann. Die Preise sind Stand 2010 wobei besonders bei den Zusatzmitteln starke Schwankungen durch die Nachfrage bestehen.

Der Preisunterschied zwischen Feuchtsalzstreuung mit herkömmlicher NaCl-Sole und Sole mit anderen Taumitteln beträgt etwa 12 % bis 14 % bezogen auf die ausgebrachte Streumenge, die in diesen drei Fällen annähernd gleich ist. Reine Solestreuung kostet pro Tonne ausgebrachten Streumittels wesentlich weniger als Feuchtsalzstreuung. Wenn aber gleich viel effektives Taumittel ausgebracht werden soll, muss entsprechend mehr gestreut werden und die Kosten sind dieselben wie bei FS30-Streuung mit NaCl. Da keine Auswirkungen auf die Griffigkeit durch den Zusatz teurerer Mittel festgestellt werden konnten, können die Mehrkosten nur durch eine längere Liegezeit wettgemacht werden. Diese Liegezeitverlängerung müsste im Bereich von etwa 15 % liegen, um einen Vorteil aus den Zusatzmitteln zu schlagen, wobei die Untersuchungen zu diesem Thema noch keine endgültige Aussage zulassen.

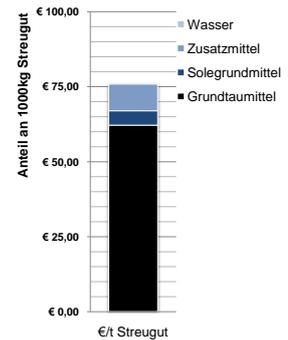
		Kosten/to	g/kg Streugut	€/t Streugut
Grundtaumittel	NaCl	88,80 €	700 g	62,16 €
Solegrundmittel	NaCl	88,80 €	60 g	5,33 €
Zuzsatzmittel			0 g	0,00 €
Wasser	Wasser	1,09 €	240 g	0,26 €
<b>Summe Taumittel und Kosten</b>			<b>760 g</b>	<b>67,75 €</b>

Tabelle 6.2: FS30 NaCl



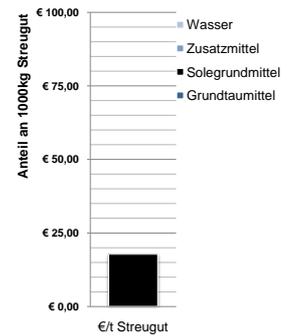
		Kosten/to	g/kg Streugut	€/t Streugut
Grundtaumittel	NaCl	88,80 €	700 g	62,16 €
Solegrundmittel	NaCl	88,80 €	54 g	4,80 €
Zuzsatzmittel	Safecote	297,5 €	30 g	8,93 €
Wasser	Wasser	1,09 €	216 g	0,24 €
<b>Summe Taumittel und Kosten</b>			<b>784 g</b>	<b>756,12 €</b>

Tabelle 6.3: FS30 Safecote



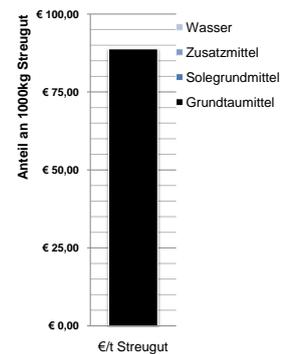
		Kosten/to	g/kg Streugut	€/t Streugut
Grundtaumittel	NaCl	88,80 €	0 g	0,00 €
Solegrundmittel	NaCl	88,80 €	200 g	17,16 €
Zuzsatzmittel			0 g	0,00 €
Wasser	Wasser	1,09 €	800 g	0,87 €
<b>Summe Taumittel und Kosten</b>			<b>200 g</b>	<b>18,63 €</b>

Tabelle 6.4: Sole (FS100)



		Kosten/to	g/kg Streugut	€/t Streugut
Grundtaumittel	NaCl	88,80 €	1000 g	88,80 €
Solegrundmittel			0 g	0,00 €
Zuzsatzmittel			0 g	0,00 €
Wasser	Wasser	1,09 €	0 g	0,00 €
<b>Summe Taumittel und Kosten</b>			<b>1000 g</b>	<b>88,80 €</b>

Tabelle 6.5: Trockensalz (FS0)



## 6.6.2 Kosten pro Streufahrt

Werden die Kosten auf eine gleiche Tauleistung bezogen, die durch eine gleiche Menge an effektiv ausgebrachtem Tausalz bei verschiedenen Streugutmischungen festgelegt wird, können Kosten für eine Streufahrt bzw. die Streuung eines bestimmten Netzes bestimmt werden. Zusätzlich zu den Taumittelkosten werden noch Personal- und Materialkosten berücksichtigt, wobei die Anschaffung der Streufahrzeuge nicht einbezogen wird.

Die ausgebrachte Salzmenge ist mit effektiven  $10 \text{ g/m}^2$  als Vergleichsgröße gewählt worden, was zu verschiedenen Streumittelausbringungsmengen führt, da der Anteil an Wasser unterschiedlich ist. Als Fahrzeug wurde für die Feuchtsalzstreuung ein typisches Gerät mit  $7 \text{ m}^3$  Salzbehälter und 3000l Soletank gewählt, wie sie die ASFINAG regelmäßig einsetzt, wobei für die Solestreuung ein spezieller Streuwagen mit  $10 \text{ m}^3$  Soletank gewählt wurde. Die Länge des zu betreuenden Netzes wurde mit 125 km und vier Fahrstreifen, das sind 500 Fahrstreifenkilometer, angenommen. Die maximale Umlaufzeit wurde mit drei Stunden bei einer durchschnittlichen Streugeschwindigkeit von 50 km/h angenommen. Personal- und Materialkosten sind in folgender Rechnung aus durchschnittlichen Einheitskosten auf Basis der Kostenrechnung der ASFINAG angegeben.

In der Kostenrechnung wurde jeweils  $10 \text{ g/m}^2$  an *effektivem* Taumittel ausgebracht was zu einer Bandbreite der ausgebrachten Streugutmenge von etwa  $13,6 \text{ g/m}^2$  bei FS30-Streuungen bis zu  $50 \text{ g/m}^2$  bei reiner Solestreuung führt.

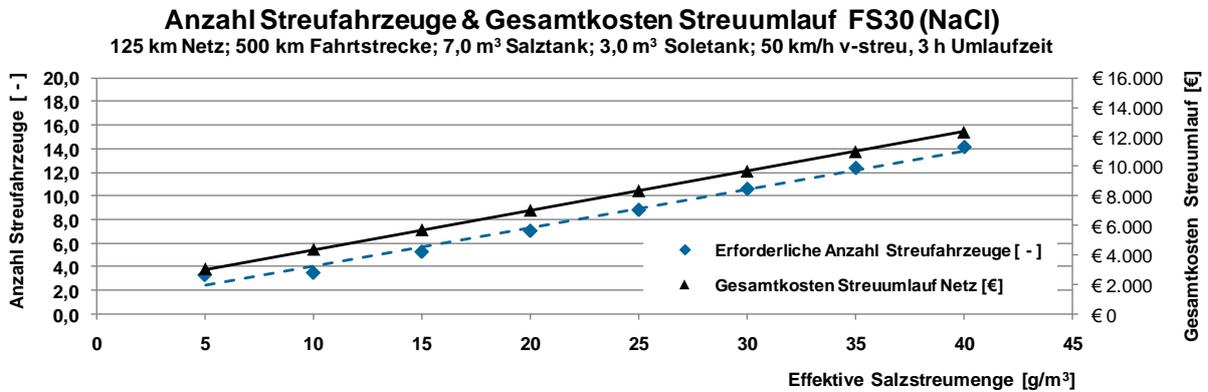
	FS30 NaCl	FS30 Safecote	FS30 CaCl <sub>2</sub>	Sole
Maximale Reichweite Fahrzeug [km]	142,0 km	142,0 km	142,0 km	37,4 km
Gesamtkosten einer Streufahrt [ € ]	1239,2 €	1391,7 €	1409,5 €	326,1 €
Theoretische Anzahl der Streufahrzeuge [ - ]	3,5	3,5	3,4	13,4
Gesamtkosten Streumuflauf [ € ]	4364,0 €	4808,0 €	4817,0 €	4364,0 €

Tabelle 6.6: Anzahl notwendiger Streufahrzeuge und Gesamtkosten eines Streumuflaues

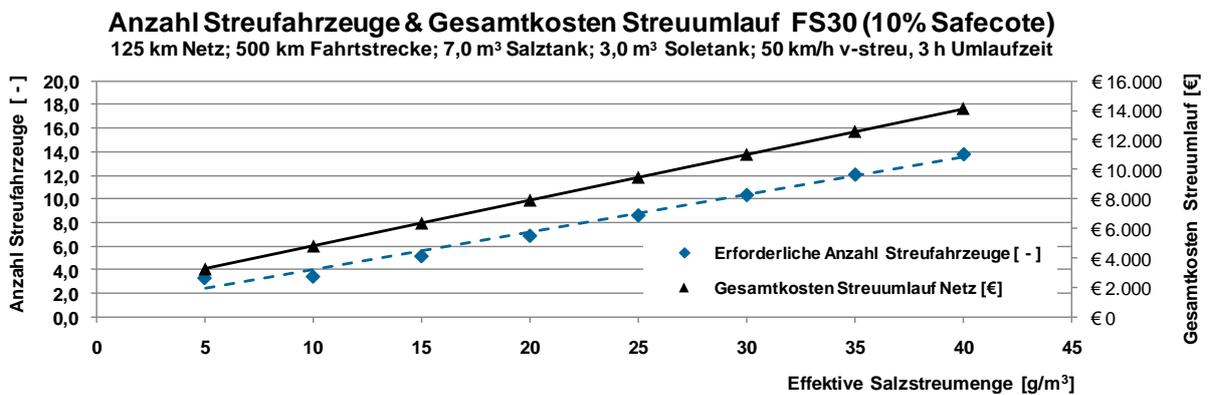
Eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 6.6 zu finden, wobei folgende Dinge auffallen:

- Bei Reichweite und der erforderlichen Anzahl an Fahrzeugen liegen alle drei Feuchtsalzstreuungen sehr eng zusammen, was durch das Faktum, dass nur ein geringer Teil der Sole, die wiederum nur 30 % des Streugutes ausmacht, verändert wird, auch nicht anders zu erwarten war.
- Bei den Kosten unterscheiden sich Feuchtsalzstreuungen mit Safecote- oder CaCl<sub>2</sub>-Zusatz untereinander wenig, verglichen mit normaler NaCl-Feuchtsalzstreuung liegen die Kosten aber 12 % bzw. 13 % höher, was sich auch in den Gesamtkosten für einen Streumuflauf zeigt.
- Ganz anders sehen die Zahlen bei einer reinen Solestreuung aus, die zwar aufgrund der gleichen ausgebrachten Natriumchloridmenge die gleichen Gesamtkosten wie Feuchtsalzstreuung mit NaCl hat, aber ein Problem mit der Reichweite hat. So wird hier von einem reinen Solestreufahrzeug mit einem Soletankvolumen von  $10 \text{ m}^3$  ausgegangen, das trotzdem nur eine maximale Reichweite von 37,4 km hat, was etwa 25 % der Reichweite eines Feuchtsalzstreufahrzeuges sind. Die Kosten für eine Streufahrt liegen bei denen von FS30, wobei die Mehrkosten für die Anschaffung notwendiger Fahrzeuge und Personal vernachlässigt wurden.

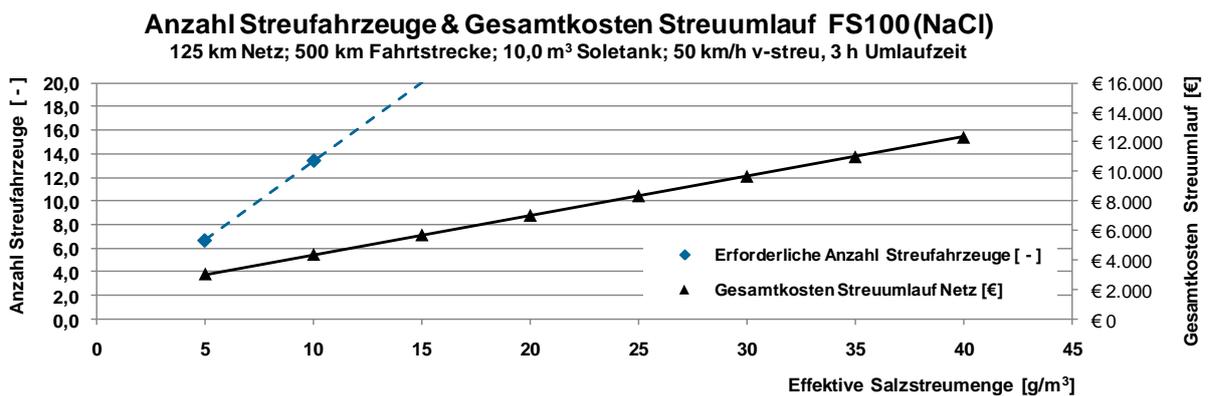
In Abbildung 6.12 sind diese Zusammenhänge der Kostenrechnung visuell erkennbar.



(a) Feuchtsalstreuung FS30, reine NaCl-Streuung



(b) Feuchtsalstreuung FS30, NaCl und Safecote-Streuung



(c) Reine Solestreuung (Soletank 10 m<sup>3</sup> statt der üblichen 3 m<sup>3</sup>)

Abbildung 6.12: Anzahl notwendiger Streufahrzeuge und Gesamtkosten eines Streuumlaufes

# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Erkenntnisse zu Einflussparametern und Modellansätze

Basierend auf den bereits vorliegenden Messreihen der Forschungsprojekte „Optimierung der Feuchtsalzstreuung“ sowie „Safecote und Griffigkeit“ konnten die wesentlichen der Straßengriffigkeit im Winter zugrunde liegenden Mechanismen ergründet und die Messwerte so miteinander verknüpft werden, dass alle wesentlichen Wetter- und Winterdienstszenerarien in ihrer Größenordnung plausibel abbildbar sind. Einschränkend muss jedoch angemerkt werden, dass es bei einer Reihe von Einflussparametern noch eine deutliche Verbesserung der Datenlage braucht, um den Einfluss unterschiedlicher Streumittel, Straßenoberflächen, Wettersituationen und Verkehrsbelastungen auf den Gefrierpunkt des Flüssigkeitsfilms und die Fahrbahntemperatur bzw. die resultierende Griffigkeit allgemeingültig vorherzusagen.

Eine solche allgemeingültige Vorhersage wäre die Grundlage für eine breite Anwendung z. B. in einem Softwaretool. Ein solches Tool könnte dabei helfen, die mit dem vorliegenden Modell abgeschätzten Optimierungspotentiale bei vertretbarem Aufwand flächendeckend umzusetzen. Aus Sicht der bisherigen Untersuchungsergebnisse ist die Erreichung eines solchen Zieles mittelfristig plausibel. Auf Basis der bisherigen Untersuchungen und Modellrechnungen ist es bereits jetzt schon möglich, eine Reihe von problematischen Fragestellungen in ausreichender Genauigkeit allgemeingültig zu beantworten.

Als ein wesentliches zentrales Ergebnis hat sich in Übereinstimmung mit vorhandenen Untersuchungen ([Zulauf, 1969], [Hoffmann, 1984], [Hausmann, 2009], [Hausmann, 2010]) gezeigt, dass der Einfluss der Verkehrs- und Niederschlagsmenge über die Zeit so entscheidend ist, dass er nicht vernachlässigt werden kann. Demgemäß sind bestehende Streueempfehlungen mit fixen Streumengen je Wettersituation z. B. von FGSV ohne Berücksichtigung dieser Einflüsse grundsätzlich ungeeignet, um einen sparsamen und zweckmäßigen Streumittel Einsatz sowie eine ausreichende Verkehrssicherheit zu gewährleisten. Die wenigen vorhandenen Streumodelle auf wissenschaftlicher Basis (z. B. MDSS) berücksichtigen zwar die Variabilität der Einflussfaktoren, aber nicht die Fahrbahntextur und Griffigkeit. Zudem liefern sie unwirtschaftliche bzw. kaum durchführbar kurze Streuintervalle und sind damit für den praktischen Einsatz (noch) ungeeignet.

### 7.2 Streuszenarien und Modellergebnisse

Die Messdaten und Überlegungen sind in das entwickelte Winterdienstmodell eingeflossen, mit dem es möglich ist, optimale Streumengen und -intervalle durch Eingabe der Wetterprognose (Lufttemperatur, Niederschlagsmenge) sowie Streuzeit und Streumenge zu finden. Für die

Optimierung aus wirtschaftlicher Sicht ist neben den Streumittelkosten auch Personal- und Gerätkosten berücksichtigt worden, um die Streuverfahren und Streumittel auch aus Kostensicht vergleichbar zu machen.

### **Feuchtsalzstreuung VS Trockensalzstreuung**

Reine Trockensalzstreuung (FS 0) ist aufgrund einer Vielzahl an Untersuchungen wegen der starken Verweh- und Vertragungsverluste nur bei weitgehender Windstille und feuchter Fahrbahn sinnvoll einsetzbar. Die Feuchtsalzstreuung zeigt gemäß Untersuchungen erst ab einem Anfeuchtungsgrad von FS20 ein ausreichend gutes Streubild, das sich bis zu FS 30 noch geringfügig verbessert aber darüber wieder verschlechtert. Einen wesentlichen Anteil der weiteren Verteilarbeit auf der Straße wird durch den Verkehr übernommen. Hohe Soleanteile über FS30 weisen bei Niederschlag zu geringe „Salzreserven“ auf, da die notwendige Gefrierpunktabenkung bereits bei ganz geringen Niederschlagsmengen und Temperaturen niedriger als  $-5\text{ °C}$  nicht mehr erreicht werden kann. Bei Soleanteilen  $< \text{FS20}$  sind dagegen die Streubilder suboptimal und die Restsalzmengen nehmen zu stark ab. Daher ist nach derzeitigem Stand FS20 bis FS30 optimal.

### **Reine Solestreuung**

Reine Solestreuung (FS 100) weist zwar bei den gleichen effektiven Streumengen die gleichen Streumittelkosten wie FS30 auf, kann aber aufgrund der großen mitzuführenden Wassermenge und der damit verbundenen geringen Reichweite (ca. 25% im Vergleich zu FS30) bei effektiven Streumengen von mehr als  $10\text{ g/m}^2$  nicht mehr sinnvoll angewendet werden. Damit ist reine Solestreuung (FS100) selbst bei Umrüstung der Fahrzeuge nur für die Wetterszenarien Reif oder präventiv (kein Niederschlag) einsetzbar. Nachdem diese Wetterszenarien z.B. im Vergleich zu Holland die Ausnahme sind und mit dem bestehenden Fuhrpark bzw. Ausrüstung effizienter beherrschbar sind, erscheint ein flächendeckender Einsatz in Österreich derzeit nicht als sinnvoll.

### **Streumittelzusätze**

Safecote und  $\text{CaCl}_2$  werden von der ASFINAG versuchsweise eingesetzt und verursachen bei einem typischen Streuumlauf Mehrkosten von ca. 10% bis 14%. Ausgehend von der mittleren Streumenge pro Winterdiensttag von  $13,5\text{ g/m}^2$  und Streumittelkosten von  $705\text{ €/Frst.km}$ ,  $11.151\text{ Frst.km}$  würden sich bei durchgehender Anwendung und ohne Berücksichtigung möglicher Vorteile (Verweildauer, Gefrierpunkt etc.) für die ASFINAG jährliche Mehrkosten von ca. 17% oder  $1,33\text{ Mio. €}$  ergeben. Aufgrund des geringen Anteils der Zusätze an der Gesamtstreumenge sind mögliche andere Wirkungen begrenzt und eine relevante Herabsetzung des Gefrierpunktes nicht zu erwarten. Bevor mögliche andere Vorteile von  $\text{CaCl}_2$  oder Safecote nicht besser wissenschaftlich abgesichert sind, ist ein flächendeckender Einsatz aufgrund der damit verbundenen Mehrkosten nicht zu empfehlen.

### **Streugeschwindigkeit**

Die übliche Streugeschwindigkeit liegt je nach Straßenkategorie und Schneehöhe zwischen  $30\text{ km/h}$  und  $60\text{ km/h}$ . Der Vergleich der Streugeschwindigkeiten in Bezug auf die Kosten ohne Berücksichtigung allfälliger Verwehverluste zeigt nur geringe Unterschiede. Bei geringen Streumengen

und geringen Streugeschwindigkeiten ist eine deutlich höhere Anzahl an Streufahrzeugen erforderlich, um die festgelegte Mindestumlaufzeit von 3 h einzuhalten. Bei höheren Streumengen ist die Reichweite durch die Tankgrößen beschränkt, wodurch zwar insgesamt eine höhere Anzahl, bezogen auf die Geschwindigkeit jedoch jeweils die gleiche Anzahl an Streufahrzeugen erforderlich ist. Nachdem die Anzahl der Fahrzeuge pro ABM begrenzt ist und sich an dem Bedarf bei höheren Streumengen (starke Schneefälle, Engpasseleistung) orientiert, ergibt sich die Schlussfolgerung, dass bei Streumengen  $> 15 \text{ g/m}^2$  eher langsamer zu fahren ist, da die Tankgröße und nicht die Geschwindigkeit die limitierende Größe darstellt und sich die Verwehverluste dadurch begrenzen lassen.

## **Streuszenarien**

Bei trockener Witterung ohne Reifbildung besteht auch im Winter kaum Glättegefahr (nur minimale Präventivstreuung nötig  $5 \text{ bis } 10 \text{ g/m}^2$ ). Jedoch tritt bereits bei geringen Niederschlagsmengen und Temperaturen unter  $-3 \text{ °C}$  vergleichsweise schnell Glättegefahr ein, die auch durch massiven Salzeinsatz bei Niederschlagssummen  $> 0,2 \text{ mm}$  kaum in den üblichen Streuintervallen zu verhindern sind. Trotz der Reserven der Fahrbahntextur, die einen (Teil-)Kontakt zum Reifen sicherstellt, führen Niederschlagssummen  $> 0,5 \text{ mm}$  (ca.  $5 \text{ mm}$  Schnee) üblicherweise zu Fahrbahnglätte. Bei typischen Schneefallereignissen von  $5 \text{ mm/h}$  oder mehr und ab etwa  $-3 \text{ °C}$  entsteht trotz eines engen Streuintervalls alle 3 Stunden und Maximalstreuung von  $40 \text{ g/m}^2$  mit hoher Sicherheit Fahrbahnglätte aufgrund der Verdünnung des getauten Schnees durch weitere Niederschläge. Die vergleichsweise häufigen Schneefallereignisse in diesem Ausmaß sind daher mit den herkömmlichen Streustrategien nicht beherrschbar.

## **Schlussfolgerungen zum Stand der Streupraxis**

Anhand des aktuellen Stand des Projektes lässt sich sagen, dass die derzeit übliche Wintervedienstpraxis aufgrund mangelnder Berücksichtigung entscheidender Faktoren wie Verkehrs- und Niederschlagsmenge und theoretisch möglicher Tauleistung noch vielversprechendes Verbesserungspotential besitzt. Um eine Optimierung des Wintervedienstes durchzuführen, muss allerdings nicht in teure neue Geräte investiert werden, da die bereits vorhandenen ausreichend gute Ergebnisse erzielen. Viel mehr sind über eine Veränderung der Streustrategie bzw. Intervalle und Streumengen Einsparungspotentiale im Bereich von  $10 \%$  bis  $20 \%$  mit einfacheren Mitteln durchaus erreichbar. Standardisierte Witterungsszenarien und klar definierte, erkennbare Fahrbahnsituationen sowie einfache Berechnungsdiagramme, die auf unterschiedliche Verkehrs- und Niederschlagsmenge eingehen, helfen der Einsatzleitung bei der Ausarbeitung der Streuvorgaben sowie dem Streupersonal bei der richtigen Dosierung der Streumengen. Insgesamt bedeutet dies die Möglichkeit an den üblichen trockenen Wintertagen und während Niederschlagsereignissen die Salzmengen mehr als einzusparen, die dann nach Abklingen des Niederschlagsereignisses konzentriert auszubringen ist.

## 7.3 Streuempfehlungen für den Straßenbetreiber

### 7.3.1 Oberes Management

#### **Welches Budget und welche Betriebsmittel werden für Winterdienst benötigt?**

Die durchschnittliche Menge an Streusalz für Straßen der Kategorie B+L beträgt 4,86 Tonnen pro Fahrstreifenkilometer und Jahr, was zu mittleren Kosten von 413 € pro Fahrstreifenkilometer und Jahr führt. Auf Straßen der Kategorie A+S steigen die Mengen auf 7,56 Tonnen und die Kosten auf 705 €; jeweils pro Fahrstreifenkilometer und Jahr. Die Streugutkosten machen etwa 20% der gesamten Winterdienstkosten aus.

#### **Welche Kennzahlen und Benchmarks stehen zur Verfügung, um die Effizienz des Winterdienstes zu beurteilen?**

Durch die derzeit ungenaue Protokollierung der Streufahrten, in welcher die Streumengen nicht erfasst werden, kann nur über den gesamten jährlichen Salzeinkauf umgelegt auf die zu betreuenden Fahrstreifenkilometer eine Vergleichsgröße in Tonnen Salz pro Fahrstreifenkilometer und ermittelt werden. Um die klimatischen Unterschiede noch zu berücksichtigen müssen diese Daten noch mit den Schneefallmengen, die aus Wetterstationen bekannt sind, verknüpft werden, um eine Benchmarkgröße in Form von beispielsweise Kilogramm Salz pro mm Niederschlag zu erhalten.

### 7.3.2 Mittleres Management

#### **Welche Winterdienstgeräte sind für das betreute Netz und die Winterszenarien optimal?**

Reine Solesprühfahrzeuge haben stark begrenzte Reichweite sowie geringe effektive Taumittelabbringungsmengen und sind nicht in der Lage, Feuchtsalz auszubringen, weshalb sie bei tieferen Temperaturen bzw. Schneefall nicht einsetzbar sind. Zudem sind die derzeit eingesetzten Fahrzeuge auch in der Lage, reine Sole, mit Einschränkungen in der Reichweite, auszubringen. Eine Anschaffung reiner Solestprühfahrzeuge ist mangels fehlender Flexibilität für das in Österreich vorherrschende Klima nicht zu empfehlen.

#### **Welche Streumittel sind für welche Situation optimal, und wo liegt die Bandbreite einer optimalen Streumenge?**

Nach derzeitigem Stand des Projektes gibt es in Bezug auf Tauleistung und Kosten keine nennenswerte Alternative zu Natriumchlorid. Die Bandbreite geht über die gesamte technisch mögliche Bandbreite von 5 g/m<sup>2</sup> bis 40 g/m<sup>2</sup> und kann erst nach Kenntnis von Verkehrs- und Niederschlagsmengen eingeengt werden.

#### **Welche Informationen brauchen die Fahrer, um den Winterdienst eigenverantwortlich durchführen zu können?**

Die Winterdienstfahrer brauchen Information über die Verkehrsstärke, die Niederschlagsmenge und die Fahrbahntemperatur, um mithilfe der in dieser Arbeit dargestellten Diagramme die optimale Streumenge ermitteln zu können. Die Verkehrsmenge im betreuten Straßennetz ist aus Zählungen bekannt und relativ konstant und die Niederschlagsmenge kann aus Straßenwetterinformationssystemen entnommen werden. Einzig zur Ermittlung der Fahrbahntemperatur sind weitere Sensoren an den Fahrzeugen notwendig, welche aber keine hohen Einbaukosten verursachen sollten.

### 7.3.3 Operative Ebene

**Wie kann ich ein vordefiniertes Wetterszenario augenscheinlich sofort erkennen?**

**Welche Streumenge ist dafür optimal?**

Diese Fragen sind in einer möglichst einfach gehaltenen Tabelle die sich auf Seite 99 befindet beantwortet. Die Zuordnung der Wettersituationen erfolgt anhand der Bilder und mittels in den Streufahrzeugen installierten Fahrbahntemperaturanzeigen, wodurch auch auf Änderungen während einer Streufahrt eingegangen werden kann, da die Information kompakt dargestellt ist.

- Bei trockener Fahrbahn besteht in der Regel keine Notwendigkeit einer Streuung, egal wie tief die Fahrbahntemperatur ist. Ist jedoch eine Präventivstreuung vor einem erwarteten Niederschlagsereignis oder prognostizierter starker Reifbildung notwendig so muss diese möglichst zeitnah mit Streumengen zwischen  $5 \text{ g/m}^2$  bis  $10 \text{ g/m}^2$  bekämpft werden.
- Bei nasser Fahrbahn und Temperaturen über  $0^\circ\text{C}$  ist ebenfalls keine Streuung notwendig allerdings muss die Temperatur beobachtet werden und im Falle eines möglichen Absinkens unter  $0^\circ\text{C}$  (bzw. etwas höher um Unsicherheit in der Prognose zu beachten!) Streufahrten durchgeführt werden. Wird  $\text{CaCl}_2$  eingesetzt, ist durch die starke Hygroskopizität dieses Salzes auch ohne Niederschlag eine feuchte Fahrbahn möglich. Die bedeutet allerdings das sich noch genügend Salz auf der Fahrbahn befindet und keine weitere Streuung notwendig ist!
- Ist Schnee auf der Fahrbahn, die Rollspur allerdings noch schneefrei, so ist zusätzlich zum Räumen ein gleichzeitiges Streuen mit Streumengen  $> 20 \text{ g/m}^2$  sinnvoll solange der Niederschlag nicht stärker wird wodurch die Fahrbahn im Bereich der Rollspuren ausreichend Griffigkeit aufweist.
- Befindet sich Schnee auf der Fahrbahn ist mit Räumfahrten, die im kürzest möglichen Intervall stattfinden, dieser zu beseitigen und durch Streuen geringer Mengen von etwa  $10 \text{ g/m}^2$  ein Anfrieren an der Fahrbahn zu verhindern. Nach Ende des Schneefalles muss der noch gefallene Schnee geräumt werden und der Restschnee, der durch den Pflug nicht entfernt werden kann, durch Salz getaut werden.
- Bei Eisglätte dauert eine Lösung des Eises durch Tausalz zu lange, weshalb eine mechanische Beseitigung die einzige Möglichkeit ist das Eis zu entfernen. Eisige Stellen müssen auf jeden Fall gemeldet werden, um eventuell notwendiges Personal mit der Entfernung zu beauftragen bzw. eine temporäre Sperre des betroffenen Fahrstreifens einzurichten.

Die Empfehlungen an die Winterdienstfahrer stellen einen aktuellen Stand des Wissens dar, das aus den beiden Projekten gewonnen wurde. Präzisierungen und kleinere Änderungen werden noch vorgenommen, wobei die Grundlagen zur Empfehlungen von Streustrategien bereits anhand dieser Tabelle erkennbar sind. Die optimale Streumenge ergibt sich aus den Abbildungen 7.2 bis 7.3 unter Berücksichtigung von Niederschlag und Verkehr.

Fotodokumentation	Fahrbahnzustand	Winterdienstempfehlung
	<p><b>Trockene Fahrbahn:</b> Hohe Griffigkeit <math>\mu = 0,7 - 1,0</math> Fahrbahntemperatur <math>-30^{\circ}\text{C}</math> bis <math>+60^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Keine Reifglätte zu erwarten</p> <p>Reifglätte möglich bzw. zu erwarten</p>	<p><b>Minimalstreuung:</b> Die Fahrbahn ist in der Regel sicher befahrbar</p> <p>Keine Streuung erforderlich</p> <p>Präventive Streuung 10 - 15 g/m<sup>2</sup> 1x pro Tag 19.00 - 22.00 Uhr</p>
	<p><b>Nasse Fahrbahn:</b> Keine Sprühfahnenbildung Mittlere Griffigkeit <math>\mu = 0,4 - 0,7</math> Fahrbahntemperatur <math>\geq 0^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Sprühfahnenbildung Mittlere Griffigkeit <math>\mu = 0,3 - 0,6</math> Fahrbahntemperatur <math>\geq 0^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Glätteis-(Gefahr) bei seidig matter Textur, Spiegelung, sehr geringe Griffigkeit <math>\mu = 0,1 - 0,6</math> Fahrbahntemperatur <math>\leq 0^{\circ}\text{C}</math></p>	<p><b>Streuung nur bei Minusgraden erforderlich:</b></p> <p>Keine Streuung erforderlich</p> <p>Keine Streuung erforderlich Kontrolle Spurrinnentiefe (&gt;20 mm Meldung)</p> <p>Präventive Streuung wichtig! Sperren + Räumen + Streuen Warnmeldung ausgeben</p>
	<p><b>Schnee neben Rollspur:</b></p> <p>Kein Schneefall, Rollspur trocken bis leicht feucht Griffigkeit <math>\mu = 0,3 - 0,5</math></p> <p>Schneefall, Schnee bleibt in Rollspur liegen (grau - weiße FB) Griffigkeit <math>\mu = 0,2 - 0,4</math></p>	<p><b>Geschwindigkeitsreduktion erforderlich:</b></p> <p>Räumung &amp; Salzstreuung bis Schmelze des Restschnees</p> <p>Räumen &amp; Wegstreuen bis Niederschlag &lt; 0,5 mm in 3 h (<math>\approx 3 - 5</math> cm Schnee). Darüber Räumen &amp; ev. Splitstreuen bis zum Ende der Schneefälle und danach Restschnee wegstreuen</p>
	<p><b>Schnee in der Rollspur:</b></p> <p>Kein Schneefall, geräumt, geringe Griffigkeit <math>\mu = 0,2 - 0,3</math> FB - Temp. <math>-20^{\circ}\text{C}</math> bis <math>0^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Schneefall, geräumt, ungeräumt, Niederschlag &lt; 0,5 mm in 3h (<math>\approx 3 - 5</math> cm Schnee)</p> <p>Niederschlag &gt; 0,5 mm in 3h geringe Griffigkeit <math>\mu = 0,2 - 0,3</math> Fahrbahntemperatur <math>-20^{\circ}\text{C}</math> bis <math>0^{\circ}\text{C}</math></p>	<p><b>Geschwindigkeitsreduktion erforderlich:</b></p> <p>Ev. nochmals räumen, Restschnee mit Salz wegstreuen</p> <p>Räumen und Streuen so lange wie erforderlich alle 3h</p> <p>Räumen &amp; ev. Splitstreuen bis zum Ende der Schneefälle und danach Restschnee wegstreuen</p>
	<p><b>Eisglätte in der Rollspur:</b></p> <p>Kein Niederschlag Fahrbahnfläche seidig matt bis spiegelnd (Scheinwerfer) Sehr geringe Griffigkeit <math>\mu = 0,1 - 0,2</math> Fahrbahntemperatur <math>\leq 0^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Niederschlag (Schnee, gefrierender Regen)</p>	<p><b>Keine Weiterfahrt, im Ausnahmefall Schritttempo:</b></p> <p>Präventive Streuung falls möglich, Sperre, Warnmeldung, Räumen, Wegstreuen</p> <p>Mechanische Beseitigung &amp; Wegstreuen der Glätte, Verkehrsfreigabe erst nach Beseitigung der gefährdeten Stellen</p>

Abbildung 7.1: Tabelle mit vorläufigen Streuempfehlungen für den Winterdienstfahrer

Damit der Winterdienstfahrer den Zeitpunkt der nächsten Streufahrt genau planen kann, muss er darüber Bescheid wissen, wann die Gefahr des Gefrierens nach einer bereits durchgeführten Streufahrt auftritt. Dazu kann er auf zwei Diagrammen, die in Abb. 7.2 und Abb. 7.3 dargestellt sind, zurückgreifen. Da der Verkehr neben dem Niederschlag der ausschlaggebende Parameter ist, ist dieser statt der Zeit auf der x-Achse aufgetragen. Der Winterdienstfahrer muss also den Verkehr, der nach einer Streufahrt fährt abschätzen können um den Zeitpunkt zu finden, an dem die tatsächlich gefahrene Verkehrsmenge der aus dem Diagramm abgelesenen entspricht. Eine einfachere Darstellung, in der die Zeit direkt auf der x-Achse aufgetragen wird, ist aufgrund des starken Unterschiedes in der Verkehrsbelastung zwischen Nacht und Tag nicht möglich.

Für trockene Wintertage, an denen ausschließlich die Reifbildung für Feuchtigkeit auf der Fahrbahn sorgt, ist in Abb. 7.2 die Restsalzabnahme für mehrere Streumengen auf Basis erster Modellrechnungen dargestellt. Anhand dieses Diagrammes kann der Winterdienstfahrer sehen, wie viel von dem Salz, das bei der letzten Fahrt ausgebracht wurde noch auf der Fahrbahn vorhanden ist, um dann Zeitpunkt und Streumenge der nächste Streufahrt danach zu richten.

Die Restsalzabnahme beginnt aufgrund der Modellrechnung (Formel 5.7 auf Seite 77) bereits mit einem gegenüber der ausgebrachten Streumenge deutlich abgeminderten Wert. Der Abminderungsfaktor  $\beta_0$  beträgt in dieser Formel 0,4, um eine Angleichung des berechneten Verlaufes an den der Messergebnisse zu erreichen.

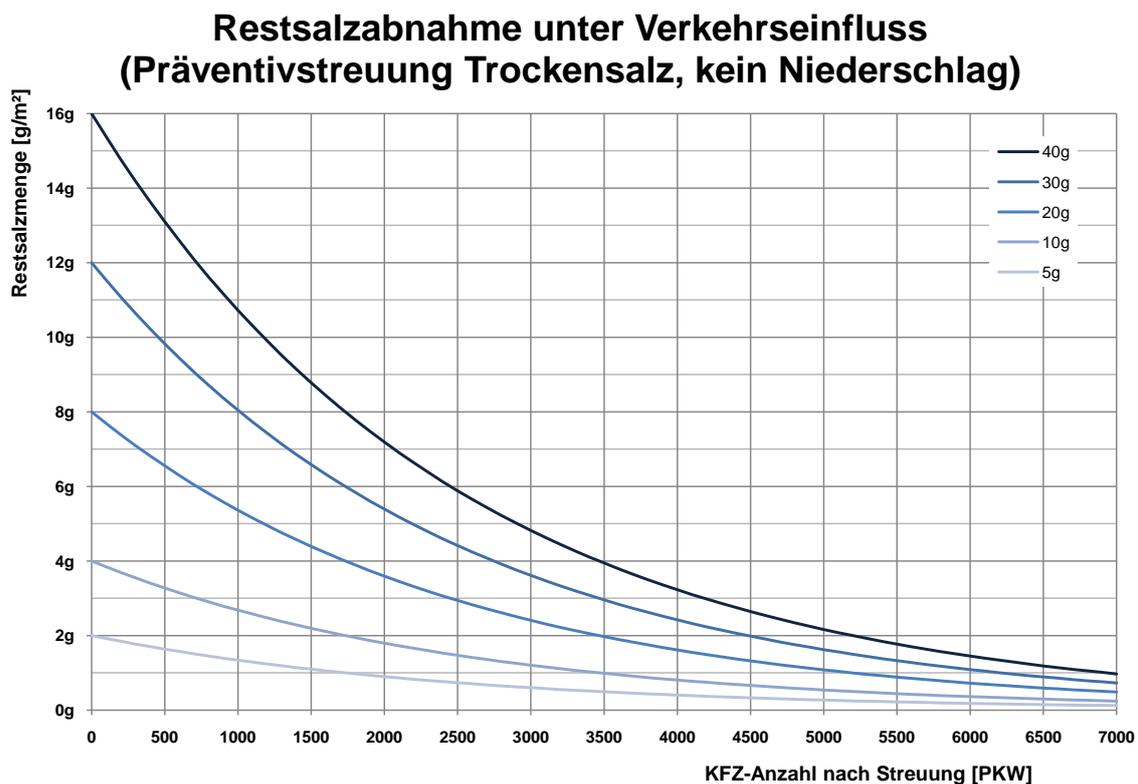
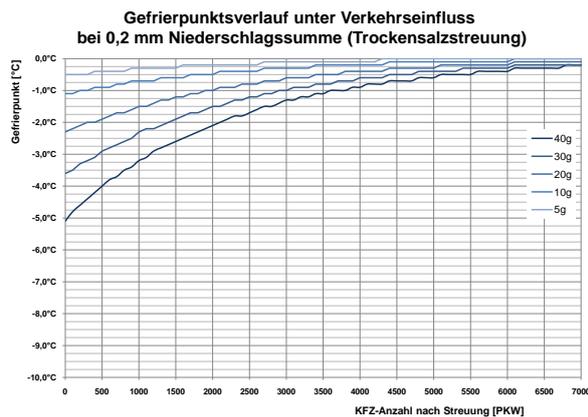


Abbildung 7.2: Restsalzabnahme unter Verkehrseinfluss mit berücksichtigtem Anfangsverlust

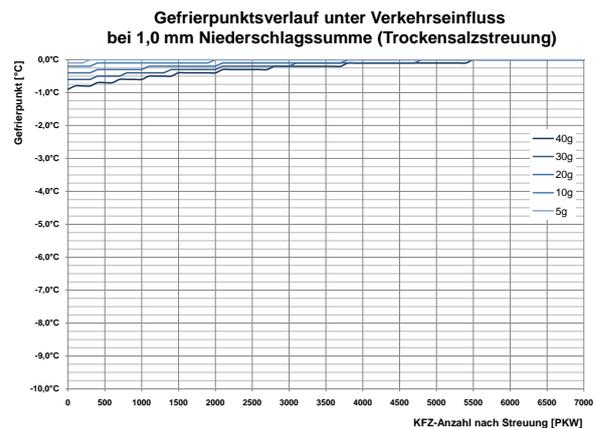
Aus den für Niederschlagstage entwickelten Diagrammen kann der Winterdienstfahrer bei einer Niederschlagsmenge, die er aus der Wetterprognose (z. B. WebsSWIS) kennt, direkt die erwartete Gefrierpunkttemperatur mit der tatsächlichen Fahrbahntemperatur vergleichen. Daraus ergibt sich eine bestimmte Menge an KFZ die seit der letzten Streufahrt die Strecke befahren können, bevor eine neue Streufahrt durchzuführen ist. In Abb. 7.3 ist ein Diagramm der Gefrierpunktverläufe für verschiedene Streumengen bei Feuchtsalzstreuung FS30 und einer Niederschlagsmen-

ge von 0,2 mm dargestellt. Diese Diagramme sind für Feuchtsalzstreuung FS30 sowie Trockensalzstreuung FS0 und die Niederschlagsmengen 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm 0,8 mm sowie 1,0 mm erstellt worden. Bei größeren Niederschlagsmengen wird das Salz so stark verdünnt, dass keine relevante Gefrierpunktsabsenkung auftritt und daher keine weiteren Diagramme notwendig sind.

Wie stark der Einfluss des Niederschlages ist, kann in Abb. 7.3 erkannt werden, die den berechneten Gefrierpunktsverlauf einer Trockensalzstreuung bei den Niederschlagsmengen 0,2 mm und 1,0 mm zeigt. Bei 1,0 mm Niederschlag (Abb. 7.3b) liegt der Gefrierpunkt auch bei einer Streumenge von 40 g/m<sup>2</sup>, selbst vor Abminderung durch den Verkehr nur noch bei -1 °C während bei 0,2 mm Niederschlag der Gefrierpunkt zu Beginn bei etwa -5 °C.



(a) 0,2 mm Niederschlagssumme



(b) 1,0 mm Niederschlagssumme

Abbildung 7.3: Gefrierpunktsverlauf abhängig vom Verkehr und Niederschlagssumme

## 7.4 Fahrempfehlungen für den Straßennutzer

Zusammen mit der Streuempfehlung für den Winterdienst ist eine Tabelle für den Straßennutzer entstanden, die eine Einschätzung der Situation erlaubt und eine angepasste Fahrweise, also geringere Geschwindigkeit und größere Sicherheitsabstände, fördern soll. Der Fahrer kann anhand der Bilder bzw. Schulungen die Situation in eine Kategorie einteilen, in der festgelegte Geschwindigkeitsreduktionen, wenn sie eingehalten werden, eine weitgehend sichere Fahrt ermöglichen.

Zusätzlich zu den Geschwindigkeitsreduktionen, die aufgrund der Fahrbahnverhältnisse erforderlich sind, muss auch bei Beeinträchtigung der Sichtweite durch starke Niederschläge, starke Sprühhahnenbildung oder Nebel die Fahrgeschwindigkeit soweit reduziert werden, dass ein Anhalten vor einem Hindernis noch möglich ist. Tritt eine Sichtbehinderung zusammen mit einer Griffigkeitsreduktion auf, so ist der Anhalteweg deutlich länger und die Geschwindigkeit drastisch zu reduzieren.

- Ist die Fahrbahn trocken, so besteht auch bei sehr tiefen Temperaturen keine Gefahr eines Griffigkeitsabfalls durch Schnee oder Eis was aus Sicht des Fahrbahnzustandes ein Fahren mit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit erlaubt. Sind die Temperaturen jedoch niedrig kann es durch Reifbildung oder Wasserzulauf vom Fahrbahnrand zu vereisten Stellen kommen auf die zu achten ist. Bei Nebel und der damit verbundenen Feuchtigkeit ist bereits Aufgrund der Sichtweite die Geschwindigkeit ohnehin zu reduzieren.
- Bei feuchter Fahrbahn tritt bei jeder Temperatur eine Verringerung der Griffigkeit auf, die jedoch aufgrund der großzügigen Trassierungsparameter im A+S Netz bei der Straßenplanung in der Regel eine Reduktion der Geschwindigkeit nicht erforderlich macht. Eine Ausnahme hierbei sind tiefe Spurrinnen, in denen sich das Wasser sammelt und Aquaplaning auftreten kann, was allerdings nicht Thema des Winterdienstes ist. Sinkt die Temperatur unter 0°C ist jedoch die Gefahr eines Frierens des Wasserfilmes auf der Fahrbahn mit Eisglätte gegeben, kann bei der die Geschwindigkeit auf unter 30 km/h reduziert werden muss, um noch sicher anhalten zu können.
- Schnee auf der Fahrbahn macht in jedem Fall eine Reduktion der Geschwindigkeit erforderlich, die solange die Rollspur noch frei ist, mindestens so groß sein muss, dass vor Stellen wo durch Schneeverwehungen auch in der Rollspur Schnee liegt, rechtzeitig erkannt werden. Ist die gesamte Fahrbahn mit Schnee bedeckt, muss die Geschwindigkeit auf jeden Fall unter 50 km/h liegen, damit die Verkehrssicherheit noch gegeben ist.
- Bei Eisglätte verliert der Reifen die Haftreibung und der Fahrer kann keinerlei Einfluss mehr auf Geschwindigkeit oder Fahrtrichtung nehmen. Eisflächen sollten daher auf keinen Fall befahren werden, wenn sie rechtzeitig erkannt werden, was leider oft nicht der Fall ist. An besonders eisglättegefährdeten Stellen die vom Straßenbetreiber als solche markiert sind, ist daher eine Reduktion der Geschwindigkeit notwendig, um ein rechtzeitiges Anhalten vor der Eisfläche zu ermöglichen.

Für die Reduktion der Geschwindigkeit ist allein der Lenker des KFZ verantwortlich. Es bedarf also einer weitaus genaueren Information der Lenker über die Möglichkeiten und Grenzen im Winterdienst als bisher vorhanden waren.

Fotodokumentation	Fahrbahnzustand	Fahrempfehlung
	<p><b>Trockene Fahrbahn:</b></p> <p>Hohe Griffigkeit <math>\mu = 0,7 - 1,0</math>  Fahrbahntemperatur <math>-30^{\circ}\text{C}</math> bis <math>+60^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Keine Reifglätte zu erwarten</p> <p>Reifglätte möglich bzw. zu erwarten</p>	<p><b>Keine Einschränkung:</b></p> <p>Keine Einschränkung bei der zulässigen Geschwindigkeit aus Sicht des Fahrbahnzustands erforderlich.</p>
	<p><b>Nasse Fahrbahn:</b></p> <p>Keine Sprühfahnenbildung  Mittlere Griffigkeit <math>\mu = 0,4 - 0,7</math>  Fahrbahntemperatur <math>\geq 0^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Sprühfahnenbildung  Mittlere Griffigkeit <math>\mu = 0,3 - 0,6</math>  Fahrbahntemperatur <math>\geq 0^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Glatteis-(Gefahr) bei seidig matter Textur, Spiegelung,  sehr geringe Griffigkeit <math>\mu = 0,1 - 0,6</math>  Fahrbahntemperatur <math>\leq 0^{\circ}\text{C}</math></p>	<p><b>Geschwindigkeitsreduktion erforderlich:</b></p> <p>Angepasste Fahrweise</p> <p>Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit besonders bei Spurrinnen (<math>&lt; 70\text{ km/h}</math>)</p> <p>Glatteisgefahr, starke Geschwindigkeitsreduktion (<math>&lt; 30\text{ km/h}</math>)</p>
	<p><b>Schnee neben Rollspur:</b></p> <p>Kein Schneefall, Rollspur trocken bis leicht feucht  Griffigkeit <math>\mu = 0,3 - 0,5</math></p> <p>Schneefall, Schnee bleibt in Rollspur liegen (grau - weiße FB)  Griffigkeit <math>\mu = 0,2 - 0,4</math></p>	<p><b>Geschwindigkeitsreduktion erforderlich:</b></p> <p>Angepasste Fahrweise. Reduktion der Geschwindigkeit um mindestens 20 bis 30%</p> <p>Angepasste Fahrweise  Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit <math>&gt; 50\%</math></p>
	<p><b>Schnee in der Rollspur:</b></p> <p>Kein Schneefall, geräumt, geringe Griffigkeit <math>\mu = 0,2 - 0,3</math>  FB - Temp. <math>-20^{\circ}\text{C}</math> bis <math>0^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Schneefall, geräumt, ungeräumt, Niederschlag <math>&lt; 0,5\text{ mm}</math> in 3h (<math>\approx 3 - 5\text{ cm}</math> Schnee)</p> <p>Niederschlag <math>&gt; 0,5\text{ mm}</math> in 3h  geringe Griffigkeit <math>\mu = 0,2 - 0,3</math>  Fahrbahntemperatur <math>-20^{\circ}\text{C}</math> bis <math>0^{\circ}\text{C}</math></p>	<p><b>Geschwindigkeitsreduktion erforderlich:</b></p> <p>Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit  <math>&lt; 70\text{ km/h}</math> (A+S) bzw. <math>&lt; 50\text{ km/h}</math> (sonstige Straßen)</p> <p>Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit  <math>&lt; 50\text{ km/h}</math> (A+S) bzw. <math>&lt; 30\text{ km/h}</math> (sonstige Straßen)</p>
	<p><b>Eisglätte in der Rollspur:</b></p> <p>Kein Niederschlag  Fahrbahnfläche seidig matt bis spiegelnd (Scheinwerfer)  Sehr geringe Griffigkeit <math>\mu = 0,1 - 0,2</math>  Fahrbahntemperatur <math>\leq 0^{\circ}\text{C}</math></p> <p>Niederschlag (Schnee, gefrierender Regen)</p>	<p><b>Keine Weiterfahrt, im Ausnahmefall Schritttempo:</b></p> <p>Fahrbeschränkungen bis zur Beseitigung der Eisglätte einhalten, In Ausnahmefällen bzw. an Gefahrenstellen im Schritttempo weiterfahren</p>

Abbildung 7.4: Tabelle mit Fahrempfehlungen für den Straßenbenutzer

## **7.5 Ausblick auf weitere Schritte**

Da diese Diplomarbeit nur ein Teil eines größeren Winterdienstprojektes am Institut für Verkehrswissenschaften ist, werden noch weitere Schritte mit den nachfolgenden Themenblöcke bearbeitet werden:

### **Laborversuche**

In den Monaten, die zu warm für den Winterdienstesinsatz sind und daher keine Feldmessungen erlauben, werden Laborversuche durchgeführt, die vor allem die Frage der Tauleistung verschiedener Salze beantworten sollen. Für die Restsalzmessung von Safecote wird ein Umrechnungsfaktor gesucht, der eine quantitative Messung mit dem SOBO20-Messgerät ermöglichen soll.

### **Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen**

Durch eine noch laufende Befragung der Straßenmeistereien soll die Grundlage für Untersuchungen der Wirtschaftlichkeit gewonnen werden, die vor allem die Einsatztage und Streumittelverbräuche betrifft. Eine Einteilung der Straßenmeistereien in klimatisch und topografisch ähnliche Kategorien würde eine, falls dies gewünscht ist, Ermittlung der „best practice“ erlauben.

### **Messreihen auf Landesstraßen**

Für den Winter 2010/11 sind weiter Messungen mit dem Griptester aber vor allem Restsalzmessungen mit dem SOBO20-Gerät sowie dem Spül-Sauggerät der BAST auf Bundes- und Landesstraßen vorgesehen. Durch den geringeren Aufwand bei der Absicherung der Messungen wird eine höhere Dichte und vor allem eine bessere Durchgängigkeit der Restsalzmessungen erwartet.

### **Optimierungspotential des Modells**

Die so gewonnenen Daten werden direkt in das Modell einfließen und die Zuverlässigkeit der Prognose erhöhen. Gleichzeitig werden andere Parameter des Modells, wie etwa die Fahrbahntemperatur mit andere Berechnungsmethoden aus der Literatur verglichen und auf mögliche Verbesserung geprüft werden.

Die Optimierung des Modells soll auch in Zusammenarbeit mit ausgewählten Straßenmeistereien, die ihren Winterdienst auf Basis des Rechenmodells gestalten, durchgeführt werden. So gewonnenen Erkenntnisse sichern ein in der Praxis auch tatsächlich sinnvoll einsetzbares Werkzeug für einen nachhaltigen und effektiven Winterdienst.

# Literaturverzeichnis

- [Badelt 2007] BADELDT, H.: Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen / BAST. 2007.
- [Cluett 2007] CLUETT, C.: A Case Study of the Support System (MDSS) in Maine / U.S. DOT ITS Joint Program Office. 2007.
- [Dicken 2003] DICKEN, G.E.: Evaluation of Safecote Products using Electrochemical Techniques / capcis. 2003.
- [Durth und Hanke 2004] DURTH, W. ; HANKE, H.: Feuchtsalz-Streuung im kommunalen Straßendienst. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2004.
- [Hagan 2006] HAGAN, P.: Freezing point determinations of Safecote brine mixtures / Department of Biomedical Sciences University of Ulster. 2006.
- [Hausmann 2009] HAUSMANN, G.: Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn / KOMMZEPT Ingenieurbüro Hausmann Bannewitz. 2009.
- [Hausmann 2010] HAUSMANN, G.: Einsatz von Safecote im Straßenwinterdienst - Zwischenbericht / BAST. 2010.
- [Hoffmann 1984] HOFFMANN, G.: Untersuchungen zum Einsatz von mineralischen Streustoffen beim Straßenwinterdienst in Berlin. 1984.
- [Kirchmaier u. a. 2009] KIRCHMAIER, L. ; BLAB, R. ; JANKOWSKI, N.: Technisch-wirtschaftliche sowie medizinisch-hygenische Beurteilung des abstumpfenden Streumittleinsatzes im kommunalen Winterdienst / Magistratsabteilung 48. 2009.
- [Matthiessen 2006] MATTHIESSEN, P.: Report on the likely environmental impact on UK streams and rivers of Safecote S2 used as an additive for road salt / Highways Agency by Halcrown Group Ltd. 2006.
- [Maurer 2007] MAURER, P.: Aspekte der Fahrbahngriffigkeit und ihr Einfluss auf erreichbare Pkw-Bremsverögerungen Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie 2007.
- [NCAR 2007] NCAR: A Comparison of Road Temperature Models: FASST, METRo, and SN-THERM / National Center for Atmospheric Research Research Applications Laboratory Boulder, Colorado, USA. 2007.
- [Neuhold 2009] NEUHOLD, J.: *Streumittel - Wirkung und Einsatzbereiche*. 2009
- [Pfeiler 2004] PFEILER, A.: Erhöhung der Griffigkeit von Asphaltstraßen. Der Einfluss der Pflasterresistenz feiner Gesteinskörnungen auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltdeckschichten. TU Wien, Dissertation, 2004.
- [Skerlan 2001] SKERLAN, M.: Winter Maintenance in Austria. CORDIS, 2001.
- [Spitzer 2010] SPITZER, J.: *Präzisionsmessungen zur Griffigkeitsmessung mit den GripTester Modellen MK1 und MK2*, TU Wien, Diplomarbeit, 2010

- [Wehner 1960] WEHNER, B.: Griffigkeitsmessungen auf winterglatten Fahrbahnoberflächen. 1960.
- [Winterdienst 2010] WINTERDIENST, Arbeitsausschuss (Hrsg.): *Einweisungsunterlagen für das Winterdienstpersonal*. Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr, 2010
- [Wirtz u. a. 2006] WIRTZ, H. ; THESENVITZ, U. ; MORITZ, K.: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen / BAST. 2006.
- [Woodward 2006] WOODWARD, D.: Report on: Effect of Safecote on Laboratory measurement of skid resistance / Universtiy of Ulster. 2006.
- [Zulauf 1969] ZULAUF, R.: Über das Haftvermögen des Haftsatzes auf der Straßenoberfläche. 1969.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Vom Winterdienst betroffene Gruppen und deren Interessen . . . . .	8
1.2	Screenshot der MDSS Software <i>Quelle: NCAR</i> . . . . .	15
1.3	Vergleich verschiedener Prognosemodelle der Fahrbahntemperatur <i>Quelle: NCAR</i> .	15
1.4	Darstellung der Funktion des Treatmentmoduls <i>Quelle: NCAR</i> . . . . .	16
1.5	Screenshot der MDSS Anwendung <i>Quelle: NCAR</i> . . . . .	16
1.6	Saug-Spülgerät <i>Quelle: [Hausmann, 2010]</i> . . . . .	19
1.7	Skizze der Herangehensweise . . . . .	20
2.1	Zusammenhang H-N . . . . .	23
2.2	Kräfte am rollenden Rad . . . . .	24
2.3	Zusammenhang $\mu$ –Schlupf . . . . .	25
2.4	Bremsweg bei unterschiedlichen Griffigkeitswerten . . . . .	26
2.5	Wirkungsweise von Streusplitt . . . . .	27
2.6	Abnahme der Splitt- und Restsalzmenge in der Rollspur im Vergleich . . . . .	27
2.7	Thermografischer Verlauf des Tauvorganges auf einem Schneefeld . . . . .	28
2.8	Streiffahrzeug zur Feuchtsalzstreuung . . . . .	29
2.9	Streuteller . . . . .	30
2.10	Schema der Salzgewinnung in Ebensee <i>Quelle: Salinen Austria AG</i> . . . . .	31
2.11	Beschilderung der Teststrecke in Bruneck <i>Quelle: www.life-cma.at</i> . . . . .	34
2.12	Eutektische Diagramme für reines Salz und fertig gemischtes Streugut . . . . .	36
2.13	Gefrierpunktanalyse der Streumittel. <i>Quelle: MAPAG</i> . . . . .	36
2.14	Gefrierpunktstemperatur bei maximaler Streumenge und 1 mm Niederschlag . . .	37
2.15	Niederschlagsmenge bei -5 °C und durchschnittlichen Streumengen . . . . .	38
2.16	Eutektisches Diagramm für NaCl mit Ablesungen für Beispiele . . . . .	38
2.17	Anteil verschiedener Tausalze am gesamten Streugut . . . . .	42
2.18	Streustoffverteiler <i>Quelle: Küpper-Weisser GmbH</i> . . . . .	42
2.19	Taumittelsprühanlage <i>Quelle: Boschung</i> . . . . .	43
2.20	Wetterstation <i>Quelle: Vaisala</i> . . . . .	43

2.21	Schema des Winterdienstmodelles . . . . .	44
3.1	Griptester MKII . . . . .	46
3.2	Vaisala Kameras . . . . .	47
3.3	Wärmebildkamera . . . . .	48
3.4	Wärmebildaufnahme und Auswertung, Klagenfurt Völkermarkter Straße . . . . .	49
3.5	SOBO 20 Restsalzmessgerät . . . . .	50
3.6	Abschnitte der Teststrecke auf der A10 . . . . .	51
3.7	Lage der Messstrecke in Österreich . . . . .	51
3.8	Plan des Parkplatzes mit Darstellung der Versuchsanordnung . . . . .	52
3.9	Winterdienstfahrzeuge im Hof der ABM Golling . . . . .	53
4.1	Aufnahmen der Versuchsstrecke 1 (NaCl) bei den Parkplatzversuchen . . . . .	54
4.2	Griffigkeit auf geräumter Versuchsstrecke . . . . .	55
4.3	Griffigkeit auf ungeräumter Versuchsstrecke . . . . .	55
4.4	Karte des Abschnittes 1 . . . . .	56
4.5	Über die Abschnittslänge gemittelte Filmdicke . . . . .	57
4.6	Griffigkeit auf salznasser Fahrbahn . . . . .	58
4.7	Griffigkeit auf salznasser Fahrbahn . . . . .	58
4.8	Über die Abschnittslänge gemittelte Filmdicke . . . . .	59
4.9	Griffigkeit auf salznasser Fahrbahn . . . . .	60
4.10	Griffigkeit auf salznasser Fahrbahn . . . . .	60
4.11	Über die Abschnittslänge gemittelte Filmdicke . . . . .	61
4.12	Griffigkeit auf schneeglatter Fahrbahn . . . . .	62
4.13	Griffigkeit auf schneeglatter Fahrbahn . . . . .	62
4.14	Griffigkeit in Abschnitt 1 (NaCl) . . . . .	63
4.15	Griffigkeit in Abschnitt 2 (CaCl) . . . . .	63
4.16	Griffigkeit in Abschnitt 3 (Safecote) . . . . .	63
4.17	Griffigkeitswerte der Messsysteme Griptester und Vaisala-Kameras . . . . .	64
4.18	Skizze der Lage der Messpunkte . . . . .	65
4.19	Verschiedene Temperaturverläufe an trockenen Jännertagen 2009 . . . . .	66
4.20	Gemittelte Temperaturverläufe mit Konfidenzintervallen im Jänner 2009 . . . . .	67
4.21	Temperaturdifferenz mit Konfidenzintervallen im Jänner 2009 . . . . .	68
5.1	Grafische Darstellung des Modells . . . . .	71
5.2	Normalisierte Verkehrsganglinie A10 bei Golling . . . . .	73

5.3	Temperaturdifferenz an Niederschlagstagen im Februar . . . . .	75
5.4	Skizze der Einflussgrößen . . . . .	76
5.5	Zusammenhang Filmdicke - Fahrbahntextur . . . . .	79
5.6	Makroaufnahme der Fahrbahntextur . . . . .	79
6.1	Anteil der Wetterszenarien an einem durchschnittlichen Winter und Streupraxis einer ABM im städtischem Bereich . . . . .	81
6.2	Trockene Fahrbahn . . . . .	82
6.3	Nasse Fahrbahn . . . . .	82
6.4	Schnee neben Rollspur . . . . .	82
6.5	Schnee in der Rollspur . . . . .	82
6.6	Eis in der Rollspur . . . . .	82
6.7	Ergebnisse aus Berechnungen für Szenario „Trocken mit Reifbildung“ . . . . .	83
6.8	Ergebnisse der Berechnungen für Szenario „leichter Niederschlag“ . . . . .	84
6.9	Ergebnisse der Berechnungen für Szenario „starker Niederschlag“ . . . . .	85
6.10	Berechnungen für das Szenario „starker Niederschlag“ . . . . .	88
6.11	Berechnungen für das Szenario Reifbildung mit verschiedenen Streustrategien . . .	89
6.12	Anzahl notwendiger Streufahrzeuge und Gesamtkosten eines Streuumlafes . . .	93
7.1	Tabelle mit vorläufigen Streuempfehlungen für den Winterdienstfahrer . . . . .	99
7.2	Restsalzabnahme unter Verkehrseinfluss mit berücksichtigtem Anfangsverlust . . .	100
7.3	Gefrierpunktsverlauf abhängig vom Verkehr und Niederschlagssumme . . . . .	101
7.4	Tabelle mit Fahrempfehlungen für den Straßenbenutzer . . . . .	103

# Tabellenverzeichnis

1.1	Betreuungen nach Winterdienstkategorien Bundesstraßen [Skerlan, 2001] . . . . .	13
1.2	Betreuungen nach Winterdienstkategorien Innerstädtisch Quelle: [Neuhold, 2009] . .	14
1.3	Vergleich der Betreuungsintensitäten ausgewählter Länder, Quelle: COST 344 . . .	18
2.1	Griffigkeitsklassen des neuen österreichischen Bewertungshintergrundes 1996 . .	25
2.2	Technische Daten der STRATOS Aufbau-Streumaschinen Quelle: Aebi-Schmidt . .	30
2.3	Verwendung von NaCl, Quelle: Wikipedia, Stand: Mai 2010 . . . . .	32
2.4	Salzverbrauch für den Winterdienst in Österreich Quelle: FSV-Ausschuss Winterdienst	32
2.5	Gegenüberstellung der Eigenschaften verschiedener Tausalze . . . . .	35
2.6	Eigenschaften von Safecote nach [Woodward, 2006] . . . . .	39
2.7	Gefrierpunkte von Safecote-Sole Mischungen nach [Hagan, 2006] . . . . .	40
3.1	Gemessene Parameter . . . . .	45
3.2	Messtage . . . . .	45
3.3	Beispiel für gewonnen Daten der Vaisala-Kameras . . . . .	48
6.1	Streukosten für drei verschiedene Strategien . . . . .	90
6.2	FS30 NaCl . . . . .	91
6.3	FS30 Safecote . . . . .	91
6.4	Sole (FS100) . . . . .	91
6.5	Trockensalz (FS0) . . . . .	91
6.6	Anzahl notwendiger Streufahrzeuge und Gesamtkosten eines Streuumlafes . . .	92
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	113
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	114
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	115
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	116
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	117
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	118

A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	119
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	120
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	121
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	122
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	123
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	124
A.1	Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt . . . . .	125

## **Anhang A**

# **Tabelle aller Messfahrten im Winter 2009/10**

In dieser Tabelle sind die Daten aller Messfahrten, gemittelt über die gesamte Abschnittslänge, die während der Messreihen mit dem Griptester und den Vaisala-Kameras im Winter 2010 ermittelt wurden enthalten.

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Gripester [-]	Oberflächentemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Nieder-schlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
2010 13.01	S	AS1	Feuchte Fahrbahn und Reif	1	0,84	-7,81	-6,34	0,0	0,0028	0,0000	0,0000	0,0028	0	90	0,81
				2	0,81	-7,84	-6,59	0,0	0,0004	0,0000	0,0004	0	91	0,82	
				3	0,81	-8,02	-6,21	0,0	0,0005	0,0000	0,0005	0	91	0,82	
				4	0,80	-8,13	-6,25	0,0	0,0025	0,0000	0,0025	0	90	0,82	
				5	0,82	-8,54	-5,30	0,0	0,0007	0,0000	0,0007	0	91	0,82	
				6	0,73	-5,64	-2,08	0,0	0,0020	0,0000	0,0020	0	82	0,81	
				7	0,88	-2,13	1,23	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	1	73	0,81	
2010 13.01	S	AS2	Feuchte Fahrbahn und Reif	1	0,85	-8,28	-4,94	0,0	0,0016	0,0000	0,0000	0,0016	0	91	0,82
				2	0,81	-8,34	-6,51	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0	91	0,82	
				3	0,82	-8,51	-6,63	0,0	0,0020	0,0000	0,0020	0	91	0,82	
				4	0,80	-8,12	-4,98	0,0	0,0023	0,0000	0,0023	0	91	0,81	
				5	0,84	-8,95	-6,41	0,0	0,0016	0,0000	0,0016	0	90	0,82	
				6	0,84	-6,08	-2,04	0,0	0,0001	0,0000	0,0001	1	84	0,81	

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächentemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
2010			Feuchte Fahrbahn und Reif	7	0,92	-2,62	1,27	0,0	0,0008	0,0002	0,0035	0,0045	1	76	0,81
13.01	S	AS3	Feuchte Fahrbahn und Reif	1	0,85	-8,59	-3,60	0,0	0,0000	0,0005	0,0503	0,0509	1	88	0,78
			Feuchte Fahrbahn und Reif	2	0,80	-8,79	-3,57	0,0	0,0000	0,0000	0,0047	0,0048	1	88	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	3	0,81	-8,90	-3,90	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	88	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	4	0,80	-9,13	-4,50	0,0	0,0000	0,0006	0,0609	0,0615	1	95	0,77
			Feuchte Fahrbahn und Reif	5	0,84	-9,33	-4,60	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	90	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	6	0,78	-6,55	-1,00	0,0	0,0002	0,0000	0,0000	0,0002	0	89	0,81
			Feuchte Fahrbahn und Reif	7	0,95	-3,00	1,70	0,0	0,0004	0,0000	0,0157	0,0161	1	78	0,79
13.01	V	AS1	Feuchte Fahrbahn und Reif	1	0,87	-4,13	1,31	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	71	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	2	0,86	-7,13	-4,89	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	86	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	3	0,87	-6,92	-4,60	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	86	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	4	0,86	-6,82	-4,04	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	84	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	5	0,89	-6,38	-2,86	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	79	0,80
			Feuchte Fahrbahn und Reif	6	0,82	-4,24	-1,56	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	73	0,82

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächentemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
2010			Feuchte Fahrbahn und Reif	7	1,00	-1,96	-1,11	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	72	0,82
13.01	V	AS2	Feuchte Fahrbahn und Reif	1	0,89	-6,93	-0,07	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	85	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	2	0,88	-7,56	-4,02	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	89	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	3	0,88	-7,76	-3,79	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	88	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	4	0,86	-7,84	-2,97	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	88	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	5	0,89	-8,16	-2,54	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	87	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	6	0,88	-5,50	0,84	0,0	0,0002	0,0002	0,0009	0,0013	1	81	0,81
			Feuchte Fahrbahn und Reif	7	0,95	-2,30	1,43	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	74	0,82
13.01	V	AS3	Feuchte Fahrbahn und Reif	1	0,87	-6,57	-2,66	0,0	0,0000	0,0068	0,0811	0,0880	1	80	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	2	0,84	-7,36	-4,74	0,0	0,0004	0,0000	0,0000	0,0004	0	82	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	3	0,85	-7,62	-3,96	0,0	0,0027	0,0000	0,0000	0,0027	0	84	0,82
			Feuchte Fahrbahn und Reif	4	0,83	-7,52	-4,08	0,0	0,0000	0,0007	0,0015	0,0022	1	85	0,81
			Feuchte Fahrbahn und Reif	5	0,85	-8,23	-2,85	0,0	0,0091	0,0000	0,0000	0,0091	0	86	0,81
			Feuchte Fahrbahn und Reif	6	0,84	-5,37	-0,25	0,0	0,0007	0,0000	0,0000	0,0007	0	79	0,81

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächen-temperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Nieder-schlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
2010			Feuchte Fahrbahn und Reif	7	0,92	-2,59	1,54	0,0	0,0006	0,0000	0,0000	0,0006	0	74	0,81
18.01	S	AS1	Schneeregen	1	0,61	1,57	4,40	1,5	0,1228	0,0000	0,0000	0,1228	0	96	0,77
			Schneeregen	2	0,77	1,36	3,08	0,5	0,0690	0,0000	0,0000	0,0690	0	94	0,78
			Schneeregen	3	0,81	1,20	1,89	0,0	0,1422	0,0000	0,0000	0,1422	0	95	0,76
			Schneeregen	4	0,80	0,82	2,22	0,0	0,0559	0,0012	0,0053	0,0623	1	98	0,78
			Schneeregen	5	0,80	0,67	2,09	0,0	0,0482	0,0010	0,0069	0,0561	1	98	0,78
			Schneeregen	6	0,79	0,56	2,37	0,0	0,1007	0,0000	0,0000	0,1007	0	99	0,77
			Schneeregen	7	0,74	0,39	1,86	0,1	0,0848	0,0000	0,0000	0,0848	0	99	0,78
			Schneeregen	8	0,81	0,20	1,46	0,1	0,0332	0,0001	0,0000	0,0333	1	99	0,79
18.01	S	AS2	Schneeregen	1	0,76	1,37	4,32	1,5	0,1066	0,0000	0,0000	0,1066	0		0,77
			Schneeregen	2	0,82	1,14	3,26	0,5	0,0272	0,0005	0,0000	0,0277	1		0,80
			Schneeregen	3	0,83	1,20	1,90	0,0	0,1500	0,0000	0,0000	0,1500	0		0,76
			Schneeregen	4	0,79	0,60	2,38	0,0	0,0921	0,0000	0,0000	0,0921	0		0,78
			Schneeregen	5	0,77	0,40	2,36	0,0	0,1035	0,0004	0,0018	0,1057	1		0,77
			Schneeregen	6	0,82	0,49	2,19	0,0	0,0981	0,0000	0,0000	0,0981	0		0,78
			Schneeregen	7	0,78	0,37	1,91	0,1	0,0764	0,0000	0,0000	0,0764	0		0,78
			Schneeregen	8	0,81	0,12	1,37	0,1	0,0341	0,0004	0,0019	0,0364	1		0,79
18.01	S	AS3	Schneeregen	1	0,82	1,20	4,55	1,5	0,0717	0,0000	0,0000	0,0717	0		0,76
			Schneeregen	2	0,88	1,15	3,61	0,5	0,0938	0,0011	0,0038	0,0988	1		0,77
			Schneeregen	3	0,88	0,68	2,32	0,0	0,0731	0,0000	0,0000	0,0731	0		0,78
			Schneeregen	4	0,81	0,60	2,37	0,0	0,1452	0,0000	0,0000	0,1452	0		0,76
			Schneeregen	5	0,73	0,50	2,22	0,0	0,1970	0,0001	0,0003	0,1975	1		0,75
			Schneeregen	6	0,76	0,34	1,91	0,0	0,1804	0,0000	0,0000	0,1804	0		0,76
			Schneeregen	7	0,84	0,35	1,61	0,1	0,1288	0,0000	0,0000	0,1288	0		0,77
			Schneeregen	8	0,84	0,10	1,00	0,1	0,0758	0,0000	0,0000	0,0758	0		0,76
18.01	V	AS1	Schneeregen	1	0,69	2,37	4,59	1,5	0,2061	0,0000	0,0000	0,2061	0	85	0,71
			Schneeregen	2	0,74	1,47	2,90	0,5	0,2348	0,0000	0,0000	0,2348	0	96	0,75
			Schneeregen	3	0,84	1,86	2,74	0,0	0,0713	0,0000	0,0000	0,0713	0	91	0,79
			Schneeregen	4	0,84	1,80	2,10	0,0	0,0999	0,0001	0,0000	0,1000	1	91	0,78
			Schneeregen	5	0,81	1,58	1,65	0,0	0,1026	0,0000	0,0000	0,1026	0	92	0,78
			Schneeregen	6	0,80	1,16	2,07	0,0	0,0983	0,0000	0,0000	0,0983	0	95	0,78
			Schneeregen	7	0,81	1,06	2,56	0,1	0,1012	0,0000	0,0000	0,1012	0	95	0,78
			Schneeregen	8	0,84	0,66	2,10	0,1	0,0671	0,0000	0,0000	0,0671	0	97	0,79
18.01	V	AS2	Schneeregen	1	0,74	2,09	6,06	1,5	0,1046	0,0000	0,0000	0,1046	0	92	0,77
			Schneeregen	2	0,84	1,35	3,79	0,5	0,0635	0,0000	0,0000	0,0635	0	96	0,79
			Schneeregen	3	0,87	1,45	3,52	0,0	0,0486	0,0000	0,0000	0,0486	0	92	0,79
			Schneeregen	4	0,83	1,36	3,56	0,0	0,0760	0,0003	0,0003	0,0766	1	93	0,78
			Schneeregen	5	0,81	0,96	3,74	0,0	0,0826	0,0000	0,0000	0,0826	0	95	0,78
			Schneeregen	6	0,82	0,74	3,22	0,0	0,1044	0,0000	0,0000	0,1044	0	97	0,78
			Schneeregen	7	0,81	0,38	2,79	0,1	0,0554	0,0000	0,0000	0,0554	0	98	0,79

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächenlufttemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Nieder-schlag [mm]	Film-dicke Wasser [mm]	Film-dicke Schnee [mm]	Film-dicke Eis [mm]	Summe Film-dicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
2010			Schneeregen	8	0,84	0,22	2,30	0,1	0,0459	0,0000	0,0000	0,0459	0	99	0,79
18.01	V	AS3	Schneeregen	1	0,76	1,58	6,18	1,5	0,1077	0,0000	0,0000	0,1077	0	94	0,77
			Schneeregen	2	0,82	1,28	3,60	0,5	0,0275	0,0000	0,0000	0,0275	0	95	0,80
			Schneeregen	3	0,85	0,98	4,22	0,0	0,0376	0,0000	0,0000	0,0376	0	95	0,79
			Schneeregen	4	0,81	0,97	3,81	0,0	0,0405	0,0000	0,0000	0,0405	0	95	0,79
			Schneeregen	5	0,78	0,79	3,44	0,0	0,0964	0,0000	0,0000	0,0964	0	97	0,77
			Schneeregen	6	0,79	0,67	3,09	0,0	0,1083	0,0000	0,0000	0,1083	0	98	0,77
			Schneeregen	7	0,81	0,55	2,55	0,1	0,0442	0,0000	0,0000	0,0442	0	98	0,79
			Schneeregen	8	0,82	0,29	1,76	0,1	0,0546	0,0000	0,0000	0,0546	0	99	0,79
10.02	S	AS1	Schneefall (05 cm/h)	1	0,45	-4,47	-2,02	2,0	0,0107	0,0042	0,0006	0,0155	1	84	0,79
			Schneefall (05 cm/h)	2	0,26	-4,74	-2,60	0,5	0,0001	0,0384	0,0032	0,0418	1	84	0,55
			Schneefall (05 cm/h)	3	0,35	-4,96	-2,51	0,5	0,0000	0,0000	0,0266	0,0266	1	84	0,74
			Schneefall (05 cm/h)	4	0,23	-5,32	-3,28	0,5	0,0002	0,0265	0,0274	0,0541	1	83	0,50
10.02	S	AS2	Schneefall (05 cm/h)	1	0,65	-4,52	-1,50	2,0	0,0248	0,0000	0,0000	0,0248	0	86	0,81
			Schneefall (05 cm/h)	2	0,49	-4,87	-2,16	0,5	0,0007	0,0070	0,0025	0,0102	1	86	0,80
			Schneefall (05 cm/h)	3	0,59	-5,01	-1,97	0,5	0,0000	0,0000	0,0063	0,0063	1	85	0,82
			Schneefall (05 cm/h)	4	0,44	-5,33	-3,26	0,5	0,0124	0,0006	0,0002	0,0132	1	84	0,79
10.02	S	AS3	Schneefall (05 cm/h)	1	0,65	-4,40	-1,20	2,0	0,0101	0,0000	0,0000	0,0101	0	90	0,80
			Schneefall (05 cm/h)	2	0,46	-4,86	-1,36	0,5	0,0088	0,0014	0,0000	0,0102	1	88	0,80
			Schneefall (05 cm/h)	3	0,47	-4,80	-1,40	0,5	0,0000	0,0000	0,0020	0,0020	1	89	0,82
			Schneefall (05 cm/h)	4	0,28	-4,82	-2,60	0,5	0,0010	0,0178	0,0067	0,0256	1	87	0,63
10.02	V	AS1	Schneefall (05 cm/h)	1	0,32	-4,07	-0,72	2,0	0,0002	0,0176	0,0001	0,0179	1	85	0,70
			Schneefall (05 cm/h)	2	0,43	-3,61	-1,79	0,5	0,0068	0,0085	0,0000	0,0153	1	81	0,78
			Schneefall (05 cm/h)	3	0,23	-4,41	-0,77	0,5	0,0000	0,0019	0,0165	0,0184	1	85	0,79
			Schneefall (05 cm/h)	4	0,21	-4,81	-1,87	0,5	0,0064	0,0343	0,0061	0,0469	1	86	0,61

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächentemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Nieder-schlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
2010 10.02	V	AS2	Schneefall (05 cm/h)	1	0,63	-4,56	-0,55	2,0	0,0033	0,0005	0,0000	0,0038	1	87	0,81
			Schneefall (05 cm/h)	2	0,88	-4,40	-0,37	0,5	0,0010	0,0002	0,0000	0,0012	1	84	0,82
			Schneefall (05 cm/h)	3	0,57	-4,80	-1,53	0,5	0,0000	0,0000	0,0057	0,0057	1	85	0,82
			Schneefall (05 cm/h)	4	0,52	-5,38	-2,06	0,5	0,0075	0,0000	0,0000	0,0075	0	86	0,81
10.02	V	AS3	Schneefall (05 cm/h)	1	0,72	-4,43	-1,62	2,0	0,0022	0,0022	0,0004	0,0048	1	87	0,81
			Schneefall (05 cm/h)	2	0,84	-4,31	-1,30	0,5	0,0018	0,0000	0,0000	0,0018	0	86	0,82
			Schneefall (05 cm/h)	3	0,51	-4,73	-1,80	0,5	0,0000	0,0000	0,0016	0,0016	1	86	0,82
			Schneefall (05 cm/h)	4	0,44	-5,38	-2,90	0,5	0,0122	0,0000	0,0000	0,0122	0	85	0,80
11.02	S	AS1	Feuchte Fahrbahn nach NS	1	0,87	-3,73	3,03	1,5	0,0028	0,0007	0,0078	0,0113	1	69	0,80
			Feuchte Fahrbahn nach NS	2	0,70	-5,13	-2,37	0,5	0,0007	0,0000	0,0000	0,0007	0	79	0,82
11.02	S	AS2	Feuchte Fahrbahn nach NS	1	0,92	-3,26	2,15	1,5	0,0045	0,0003	0,0069	0,0117	1	69	0,80
			Feuchte Fahrbahn nach NS	2	0,86	-4,75	-2,31	0,5	0,0014	0,0000	0,0004	0,0019	1	79	0,81
11.02	S	AS3	Feuchte Fahrbahn nach NS	1	0,97	-3,30	2,80	1,5	0,0154	0,0000	0,0000	0,0154	0	71	0,79
			Feuchte Fahrbahn nach NS	2	0,80	-4,92	-1,93	0,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	80	0,82
11.02	V	AS1	Feuchte Fahrbahn nach NS	1	0,96	-3,68	0,66	1,5	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0	73	0,82
			Feuchte Fahrbahn nach NS	2	0,86	-4,56	-1,75	0,5	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001	0	79	0,82

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächentemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Nieder-schlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
2010 11.02	V	AS2	Feuchte Fahrbahn nach NS	1	0,93	-3,75	1,08	1,5	0,0009	0,0000	0,0000	0,0009	0	70	0,82
			Feuchte Fahrbahn nach NS	2	0,91	-4,83	-1,93	0,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	79	0,82
11.02	V	AS3	Feuchte Fahrbahn nach NS	1	0,90	-3,57	1,11	1,5	0,0002	0,0000	0,0000	0,0002	0	71	0,82
			Feuchte Fahrbahn nach NS	2	0,79	-4,63	-1,91	0,5	0,0000	0,0002	0,0005	0,0007	1	80	0,81
04.03	S	AS1	Trocken dann Schneefall	1	0,90	0,67	2,51	0,2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	74	0,82
			Trocken dann Schneefall	2	1,16	0,63	3,13	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	74	0,82
			Trocken dann Schneefall	3	0,79	0,80	1,25	0,1	0,0100	0,0000	0,0000	0,0100	0	84	0,81
			Trocken dann Schneefall	4	0,52	-1,69	0,73	0,1	0,1970	0,0000	0,0000	0,1970	0	92	0,76
			Trocken dann Schneefall	5	0,20	-1,98	0,62	0,2	0,0870	0,0320	0,0000	0,1190	1	87	0,74
04.03	S	AS2	Trocken dann Schneefall	1	1,03	0,66	3,66	0,2	0,0000	0,0000	0,0010	0,0010	1	74	0,81
			Trocken dann Schneefall	2	1,10	0,83	3,84	0,0	0,0010	0,0000	0,0000	0,0010	0	71	0,82

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächentemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Nieder-schlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]	
2010			Trocken dann Schneefall	3	0,76	-0,07	2,18	0,1	0,0630	0,0040	0,0040	0,0710	1	88	0,79	
			Trocken dann Schneefall	4	0,45	-1,64	1,69	0,1	0,1140	0,0000	0,0000	0,1140	0	92	0,78	
			Trocken dann Schneefall	5	0,35	-1,76	1,67	0,2	0,0960	0,0020	0,0000	0,0980	1	86	0,78	
	04.03	S	AS3	Trocken dann Schneefall	1	1,02	0,90	3,41	0,2	0,0010	0,0000	0,0000	0,0010	0	71	0,82
				Trocken dann Schneefall	2	1,00	1,09	4,07	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	68	0,82
Trocken dann Schneefall				3	0,81	0,41	2,81	0,1	0,0080	0,0000	0,0000	0,0080	0	85	0,81	
Trocken dann Schneefall				4	0,56	-0,55	3,20	0,1	0,0770	0,0110	0,0170	0,1050	1	97	0,72	
Trocken dann Schneefall				5	0,75	-0,28	1,23	0,2	0,1250	0,0000	0,0000	0,1250	0	77	0,78	
04.03	V	AS1	Trocken dann Schneefall	1	1,00	1,12	1,87	0,2	0,0614	0,0000	0,0000	0,0614	0	74	0,53	
			Trocken dann Schneefall	2	1,04	0,48	2,13	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	75	0,82	

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächentemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Nieder-schlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]	
2010			Trocken dann Schneefall	3	0,77	0,40	3,23	0,1	0,0011	0,0000	0,0000	0,0011	0	80	0,82	
			Trocken dann Schneefall	4	0,41	-0,12	4,22	0,1	0,0655	0,0000	0,0000	0,0655	0	86	0,79	
			Trocken dann Schneefall	5	0,48	0,00	1,44	0,2	0,0604	0,0019	0,0000	0,0622	1	74	0,79	
	04.03	V	AS2	Trocken dann Schneefall	1	1,02	0,74	3,75	0,2	0,0509	0,0000	0,0000	0,0509	0	74	0,53
				Trocken dann Schneefall	2	1,00	0,58	2,91	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	72
Trocken dann Schneefall				3	0,81	0,30	2,96	0,1	0,0022	0,0000	0,0000	0,0000	0,0022	0	87	0,82
Trocken dann Schneefall				4	0,76	-1,54	3,22	0,1	0,0280	0,0000	0,0000	0,0000	0,0280	0	94	0,80
Trocken dann Schneefall				5	0,51	-1,62	2,49	0,2	0,0897	0,0000	0,0099	0,0000	0,0997	1	84	0,78
04.03	V	AS3	Trocken dann Schneefall	1	1,02	0,67	3,99	0,2	0,0499	0,0000	0,0000	0,0499	0	74	0,53	
			Trocken dann Schneefall	2	0,96	0,88	3,28	0,0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	70	0,82

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächentemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Nieder-schlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
2010			Trocken dann Schneefall	3	0,83	-1,03	2,80	0,1	0,0007	0,0000	0,0000	0,0007	0	92	0,82
			Trocken dann Schneefall	4	0,77	-1,56	2,76	0,1	0,0032	0,0009	0,0001	0,0042	1	95	0,81
			Trocken dann Schneefall	5	0,75	-1,76	1,98	0,2	0,1172	0,0000	0,0000	0,1172	0	85	0,78
			Schneefall (05 cm/h)	1	0,14	-2,03	0,17	1,5	0,1946	0,0512	0,0005	0,2463	1	87	0,71
			Schneefall (05 cm/h)	2	0,25	-2,06	0,16	0,8	0,1839	0,0003	0,0000	0,1842	1	85	0,75
05.03	S	AS1	Schneefall (05 cm/h)	3	0,41	-2,10	0,15	0,4	0,1533	0,0006	0,0000	0,1539	1	85	0,77
			Schneefall (05 cm/h)	4	0,31	-2,38	0,33	1,5	0,1104	0,0013	0,0000	0,1116	1	87	0,77
			Schneefall (05 cm/h)	1	0,25	-2,09	1,26	1,5	0,1468	0,0386	0,0000	0,1854	1	90	0,74
			Schneefall (05 cm/h)	2	0,31	-1,96	1,14	0,8	0,1269	0,0061	0,0008	0,1338	1	85	0,76
05.03	S	AS2	Schneefall (05 cm/h)	3	0,42	-1,84	0,67	0,4	0,0873	0,0001	0,0000	0,0874	1	83	0,78
			Schneefall (05 cm/h)	4	0,34	-2,17	1,09	1,5	0,1065	0,0011	0,0000	0,1075	1	88	0,78
			Schneefall (05 cm/h)	1	0,76	-1,61	1,24	1,5	0,1582	0,0000	0,0000	0,1582	0	88	0,78
			Schneefall (05 cm/h)	2	0,80	-1,15	0,80	0,8	0,0912	0,0000	0,0000	0,0912	0	79	0,79
05.03	S	AS3	Schneefall (05 cm/h)	1	0,76	-1,61	1,24	1,5	0,1582	0,0000	0,0000	0,1582	0	88	0,78
			Schneefall (05 cm/h)	2	0,80	-1,15	0,80	0,8	0,0912	0,0000	0,0000	0,0912	0	79	0,79

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächentemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
2010			Schneefall (05 cm/h 4h)	3	0,79	-1,37	0,81	0,4	0,0789	0,0000	0,0000	0,0789	0	79	0,79
				4	0,80	-1,37	0,30	1,5	0,0883	0,0000	0,0883	0	80	0,79	
				1	0,40	-0,89	0,83	1,5	0,1052	0,0000	0,1119	1	84	0,78	
				2	0,57	-0,95	2,70	0,8	0,1912	0,0000	0,1912	1	80	0,77	
05.03	V	AS1	Schneefall (05 cm/h 4h)	3	0,69	-2,27	0,40	0,4	0,0535	0,0000	0,0535	0	86	0,79	
				4	0,64	-2,29	0,31	1,5	0,0464	0,0000	0,0464	0	87	0,79	
				1	0,29	-2,08	1,45	1,5	0,0893	0,0222	0,1114	1	90	0,77	
				2	0,54	-2,01	1,99	0,8	0,1752	0,0018	0,1770	1	86	0,77	
05.03	V	AS2	Schneefall (05 cm/h 4h)	3	0,59	-2,37	0,63	0,4	0,1104	0,0000	0,1104	1	88	0,78	
				4	0,59	-2,38	0,71	1,5	0,0727	0,0012	0,0739	1	90	0,79	
				1	0,70	-2,30	1,58	1,5	0,0587	0,0000	0,0587	0	93	0,79	
				2	0,76	-2,16	1,60	0,8	0,0840	0,0000	0,0840	0	89	0,79	
05.03	V	AS3	Schneefall (05 cm/h 4h)	3	0,77	-2,48	1,10	0,4	0,0541	0,0000	0,0541	0	89	0,79	
				4	0,77	-2,49	1,20	1,5	0,0123	0,0000	0,0123	0	90	0,81	

Fortsetzung auf der folgenden Seite

Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächenlufttemperatur [°C]	Nieder-schlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
05.03	S	AS1	Schneefall (05 cm/h 7h)	1	0,11	-3,09	1,5	0,0501	0,1654	0,0072	0,2227	1	83	0,58
			Schneefall (05 cm/h 7h)	2	0,22	-3,04	0,4	0,0823	0,0212	0,0011	0,1046	1	83	0,74
			Schneefall (05 cm/h 7h)	3	0,26	-3,07	0,4	0,0751	0,0061	0,0000	0,0813	1	82	0,77
05.03	S	AS2	Schneefall (05 cm/h 7h)	1	0,14	-2,82	1,5	0,1220	0,1294	0,0065	0,2579	1	84	0,64
			Schneefall (05 cm/h 7h)	2	0,23	-2,92	0,4	0,0606	0,0220	0,0071	0,0897	1	83	0,76
			Schneefall (05 cm/h 7h)	3	0,24	-2,93	0,4	0,0600	0,0419	0,0038	0,1057	1	82	0,73
05.03	S	AS3	Schneefall (05 cm/h 7h)	1	0,25	-2,86	1,5	0,0718	0,0196	0,0014	0,0928	1	82	0,75
			Schneefall (05 cm/h 7h)	2	0,70	-2,20	0,4	0,0423	0,0000	0,0000	0,0423	0	88	0,79
			Schneefall (05 cm/h 7h)	3	0,59	-2,13	0,4	0,0748	0,0000	0,0000	0,0748	0	80	0,78
05.03	V	AS1	Schneefall (05 cm/h 7h)	1	0,27	-1,75	1,5	0,1064	0,0103	0,0002	0,1169	1	76	0,77
			Schneefall (05 cm/h 7h)	2	0,39	-3,18	0,4	0,0747	0,0010	0,0000	0,0757	1	83	0,78
			Schneefall (05 cm/h 7h)	3	0,36	-3,25	0,4	0,0271	0,0087	0,0012	0,0371	1	82	0,78
05.03	V	AS2	Schneefall (05 cm/h 7h)	1	0,17	-3,18	1,5	0,1601	0,0614	0,0001	0,2216	1	86	0,73
			Schneefall (05 cm/h 7h)	2	0,36	-3,32	0,4	0,1188	0,0125	0,0024	0,1337	1	84	0,76

Fortsetzung auf der folgenden Seite

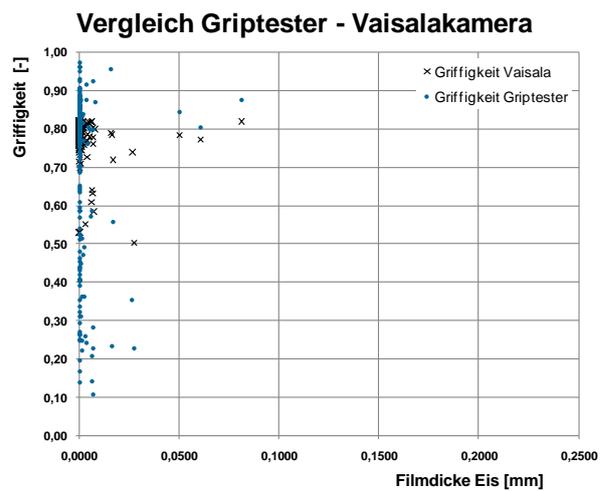
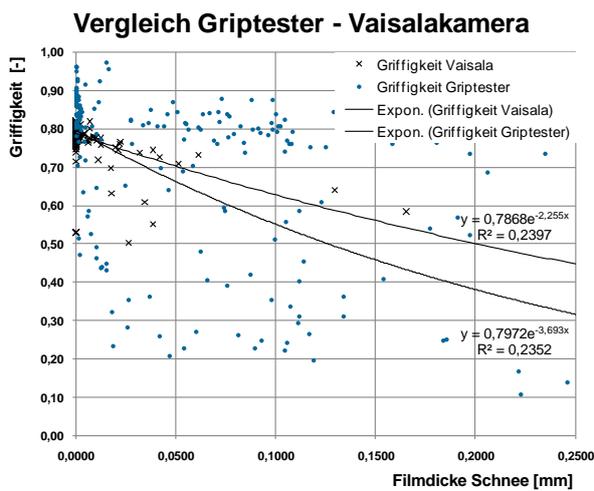
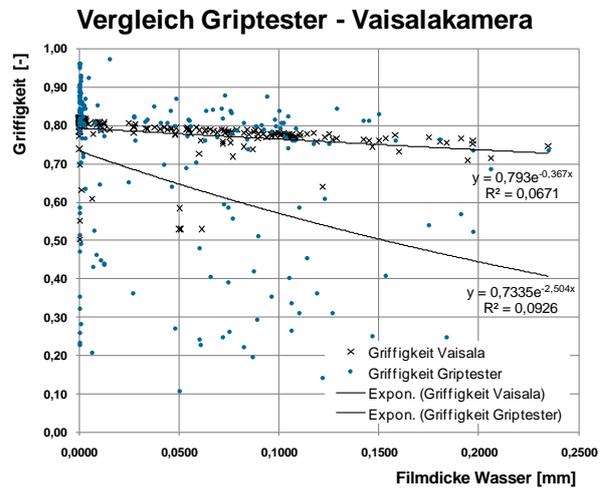
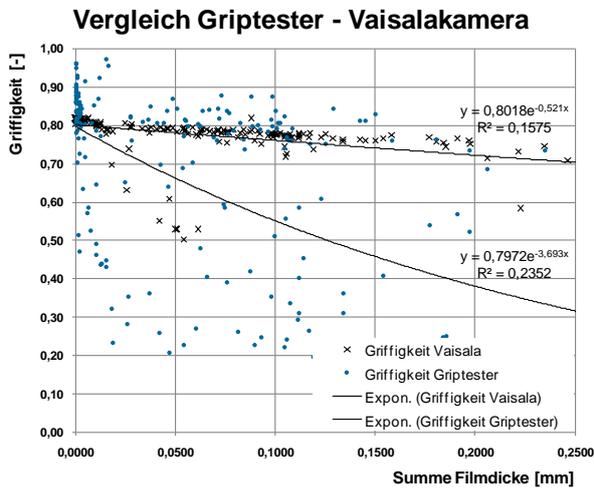
Tabelle A.1: Tabelle aller Gemessenen Parameter jeweils gemittelt auf einen Abschnitt

Datum	Richtung	Abschnitt	Fahrbahnzustand	Messfahrt	Griffigkeit Griptester [-]	Oberflächentemperatur [°C]	Lufttemperatur [°C]	Niederschlag [mm]	Filmdicke Wasser [mm]	Filmdicke Schnee [mm]	Filmdicke Eis [mm]	Summe Filmdicke [mm]	Eis bzw. Schnee	Luftfeuchtigkeit [%]	Griffigkeit Vaisala [-]
2010			Schneefall (05 cm/h 7h)	3	0,27	-3,49	0,13	0,4	0,0480	0,0124	0,0000	0,0604	1	84	0,78

# Anhang B

## Vergleich Vaisala VS Griptester

Gegenüberstellung von Messwerten der Griffigkeit der Messsysteme Griptester und Vaisala-Kameras für die einzelnen Abschnitte. Zusätzlich ist für jedes System die exponentielle Trendlinie eingezeichnet.



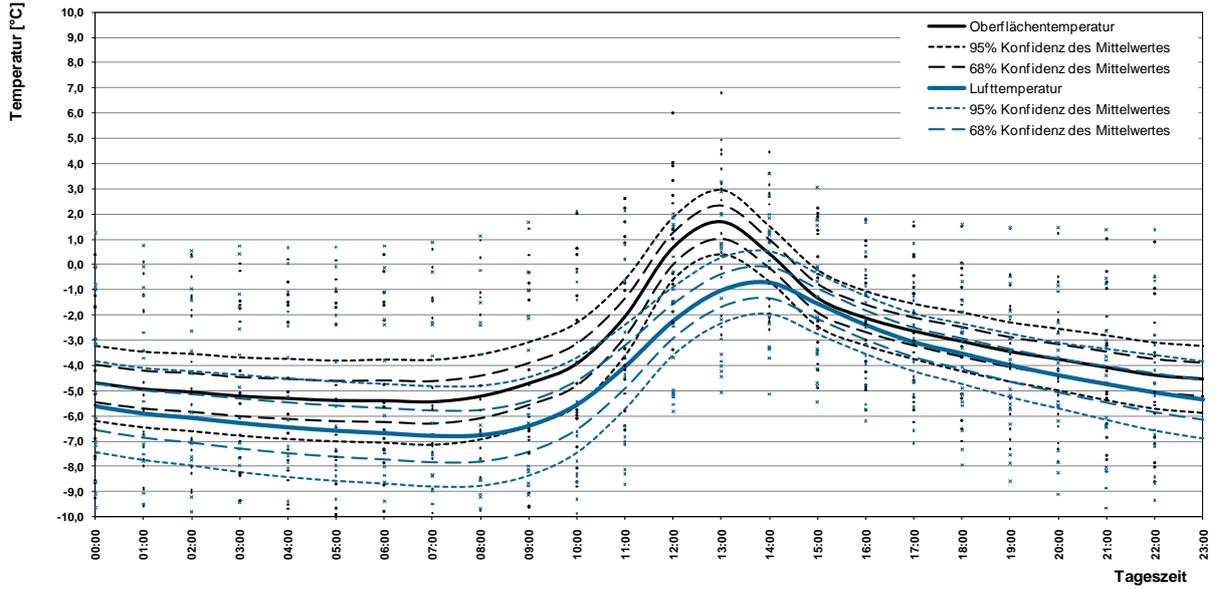
## Anhang C

# Temperaturdiagramme der Wintermonate 2009

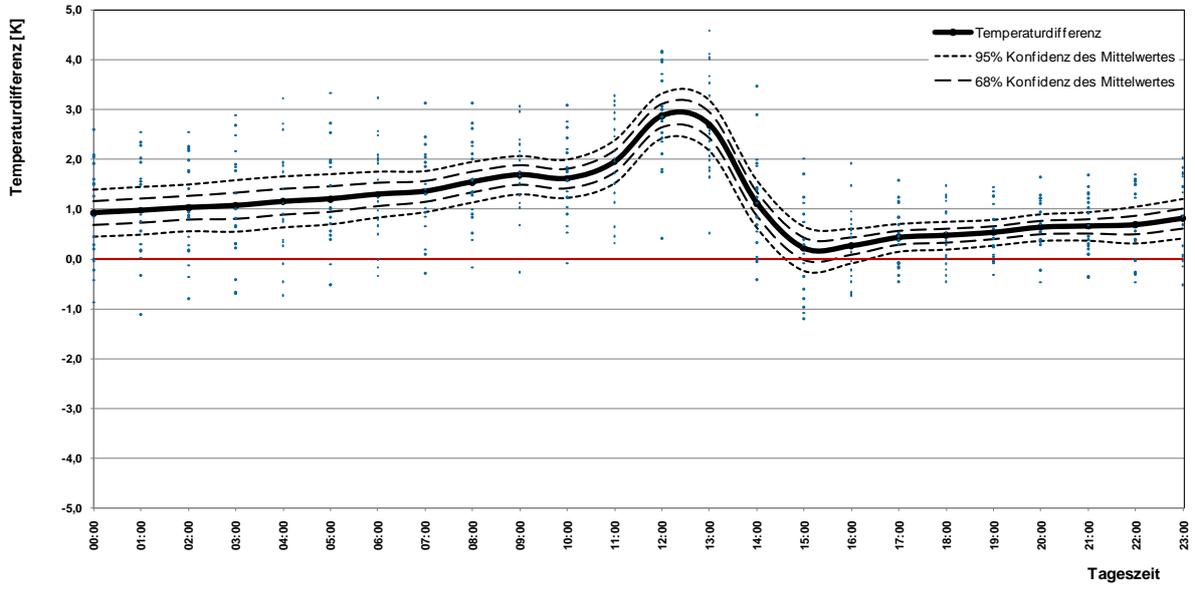
Die Auswertung der Temperaturganglinien auf Basis von Daten der Wetterstation bei Golling wurde für die Wintermonate Jänner, Februar, März, November und Dezember 2009 durchgeführt. Die Diagramme sind getrennt nach Niederschlagstagen und Trockentagen für jeden dieser Monate in der folgenden Aufteilung dargestellt. Die Diagramme werden benötigt, um aus der Lufttemperaturprognose auf die zu erwartende Fahrbahntemperatur schließen zu können.

- Oben** Darstellung der gemessenen Luft- und Fahrbahntemperaturen sowie der Mittelwerte und Konfidenzintervalle in 5-Minuten-Schritten.
- Mitte** Verlauf Luft- und Fahrbahntemperaturen sowie Mittelwerte und Konfidenzintervalle gemittelt auf Stundenwerte
- Unten** Differenz zwischen Fahrbahntemperatur und Lufttemperatur (der gemittelten Stundenwerte) und Konfidenzintervalle.

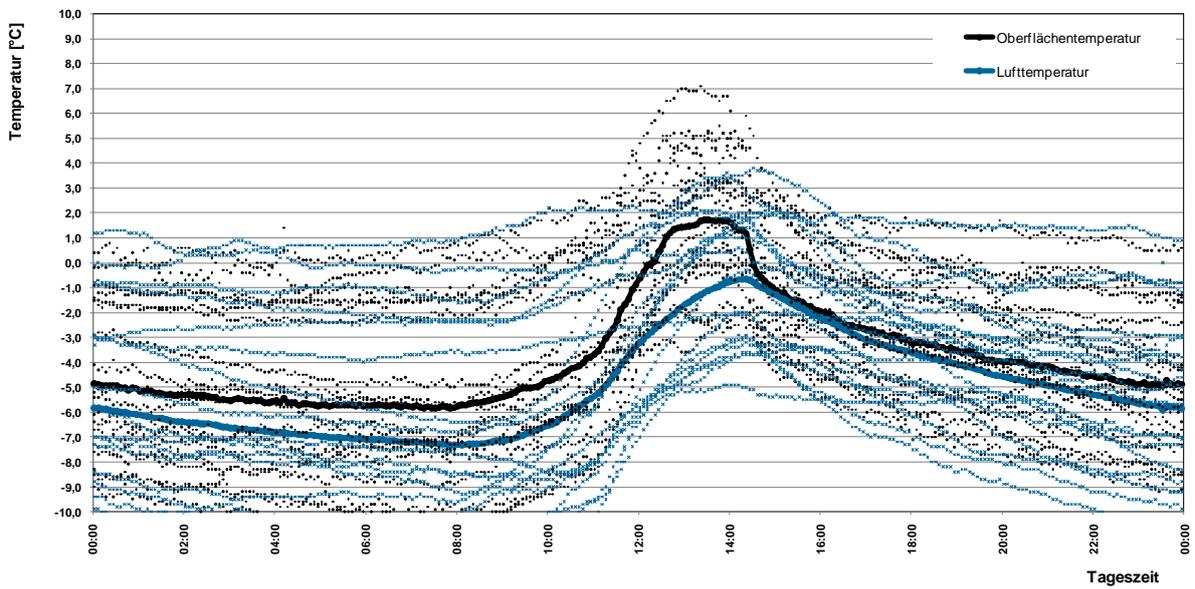
Verläufe der Luft- und Fahrbahntemperatur 01/2009 (Trockentage)



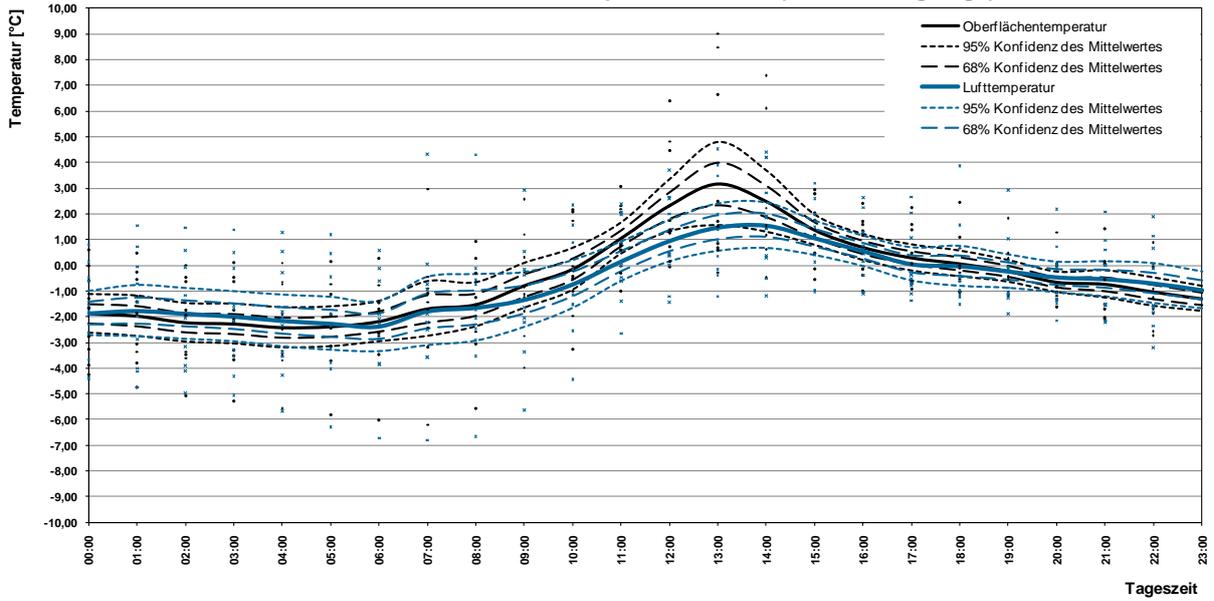
Differenz Luft - Fahrbahntemperatur 01/2009 (Trockentage)



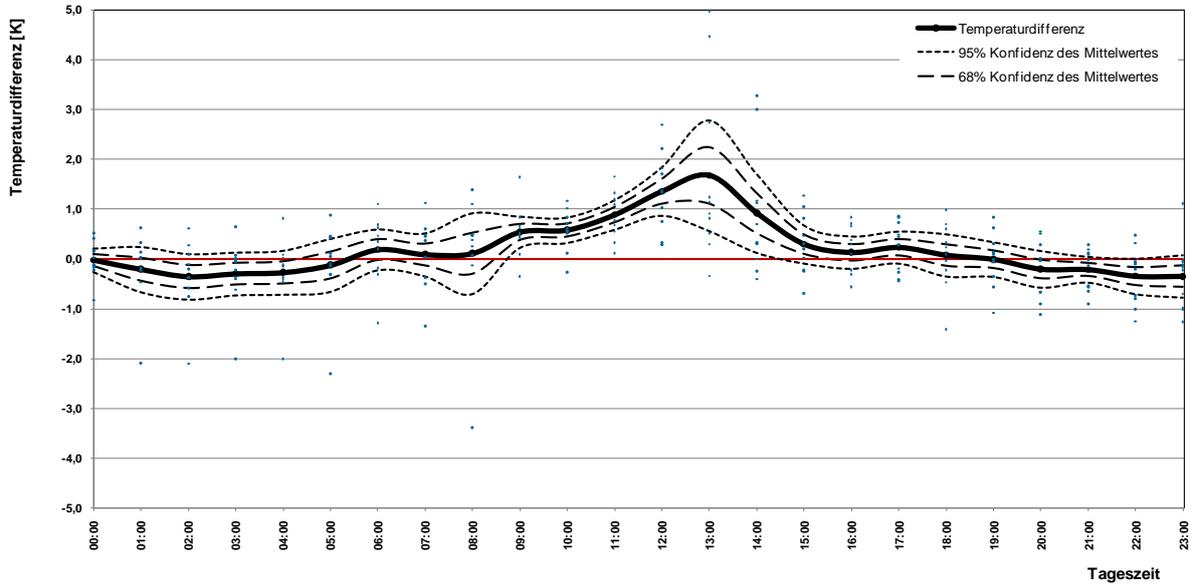
Einzelwerte der Luft- und Fahrbahntemperatur 01/2009 (Trockentage)



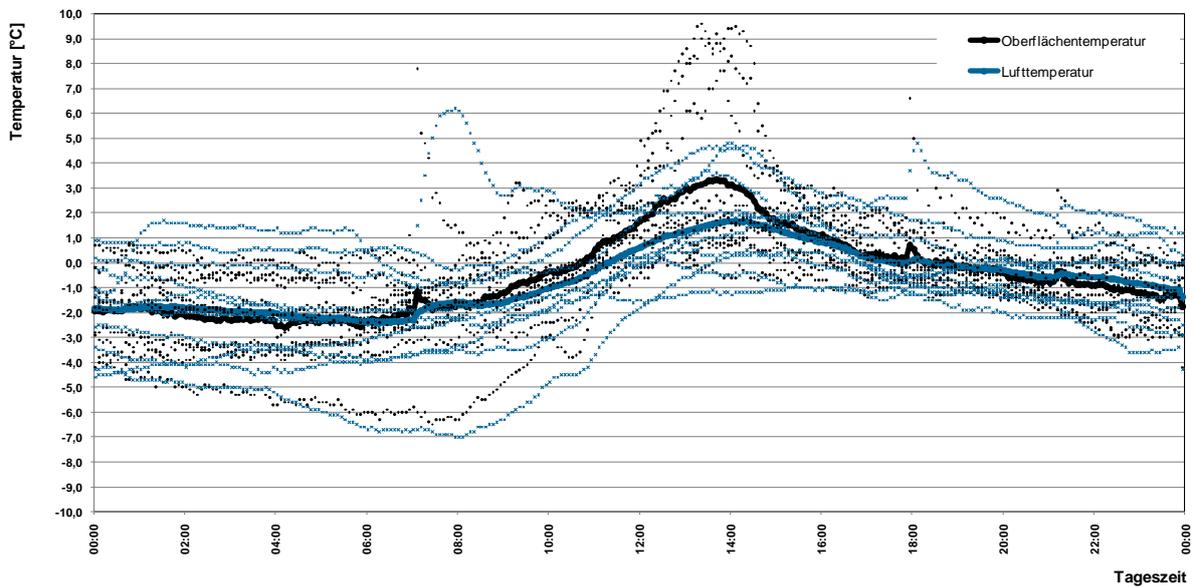
Verläufe der Luft- und Fahrbahntemperatur 01/2009 (Niederschlagstage)



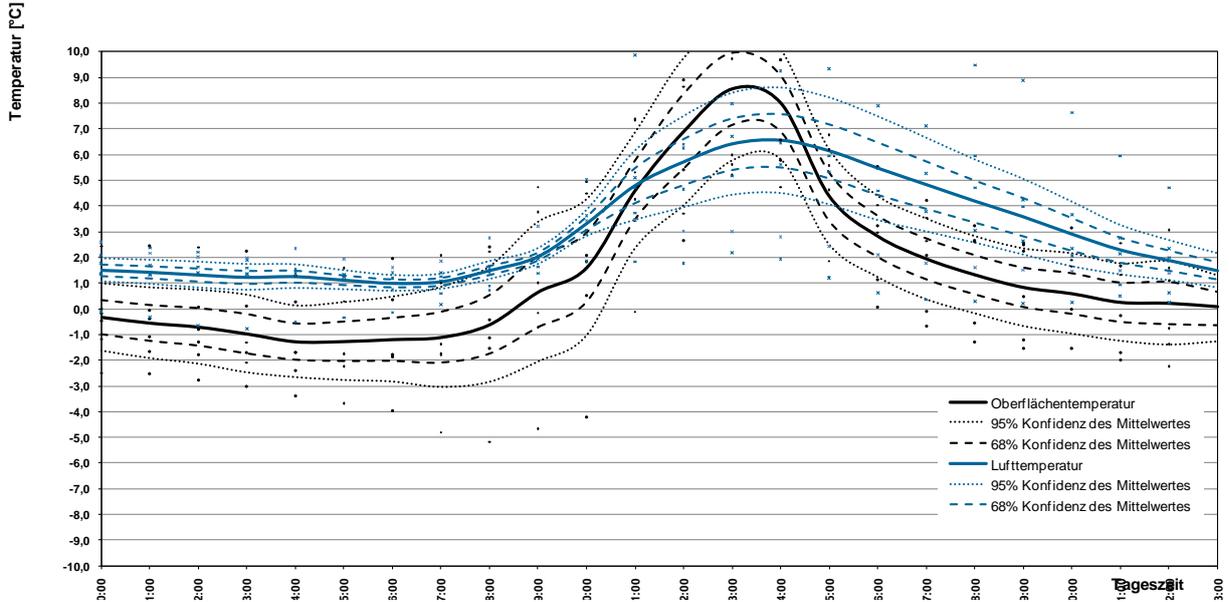
Differenz Luft - Fahrbahntemperatur 01/2009 (Niederschlagstage)



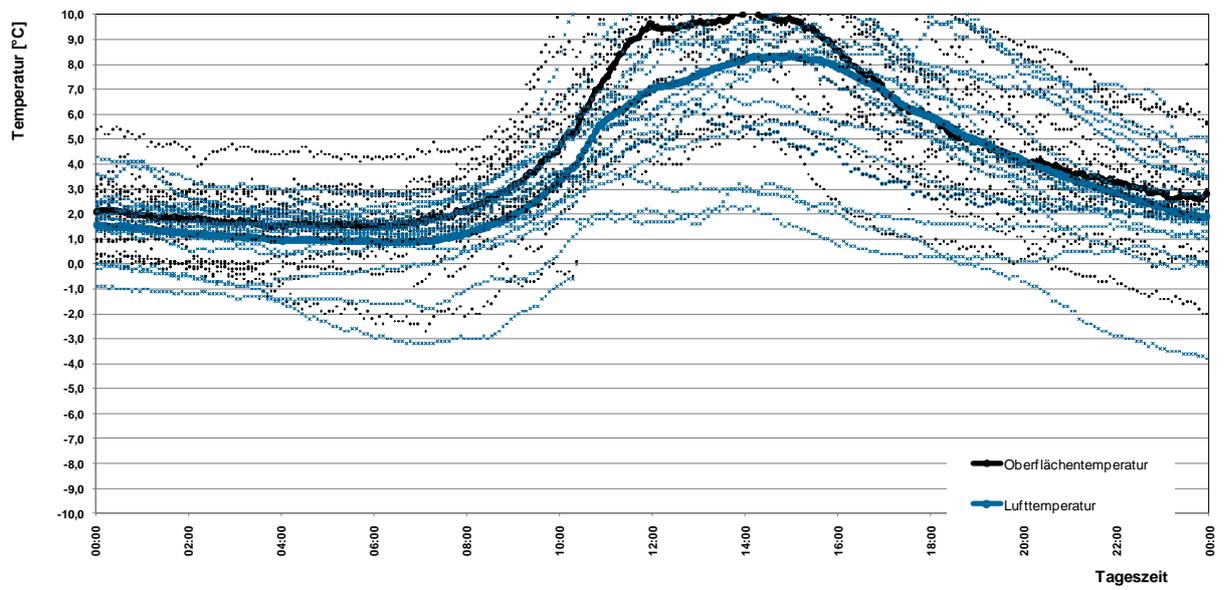
Einzelwerte der Luft- und Fahrbahntemperatur 01/2009 (Niederschlagstage)



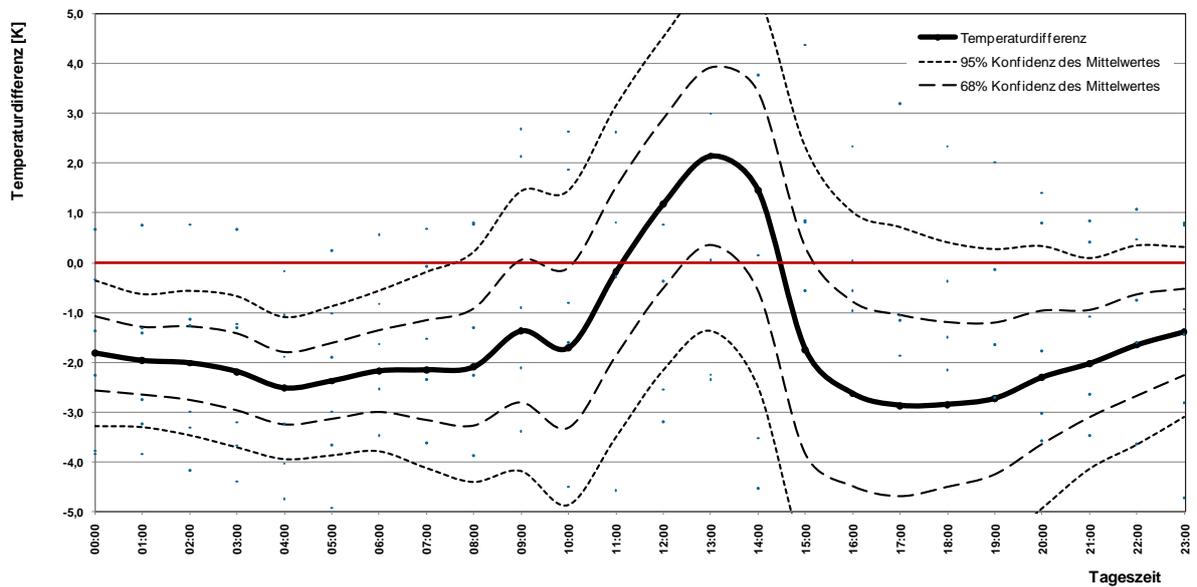
Verläufe der Luft- und Fahrbahntemperatur 02/2009 (Trockentage)



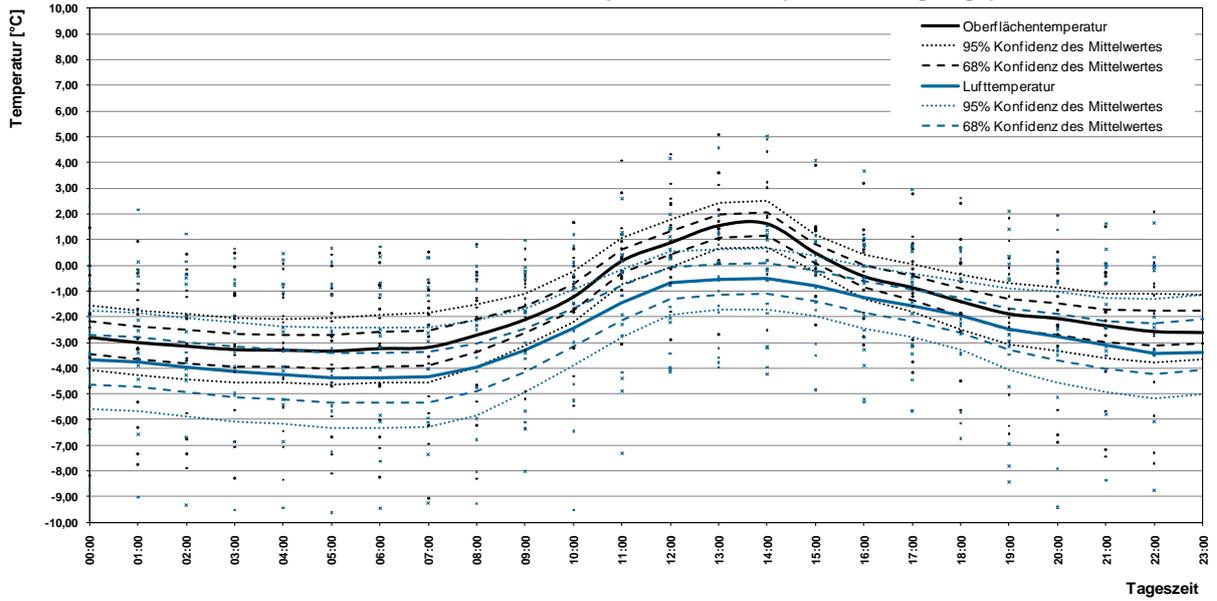
Einzelwerte der Luft- und Fahrbahntemperatur 02/2009 (Trockentage)



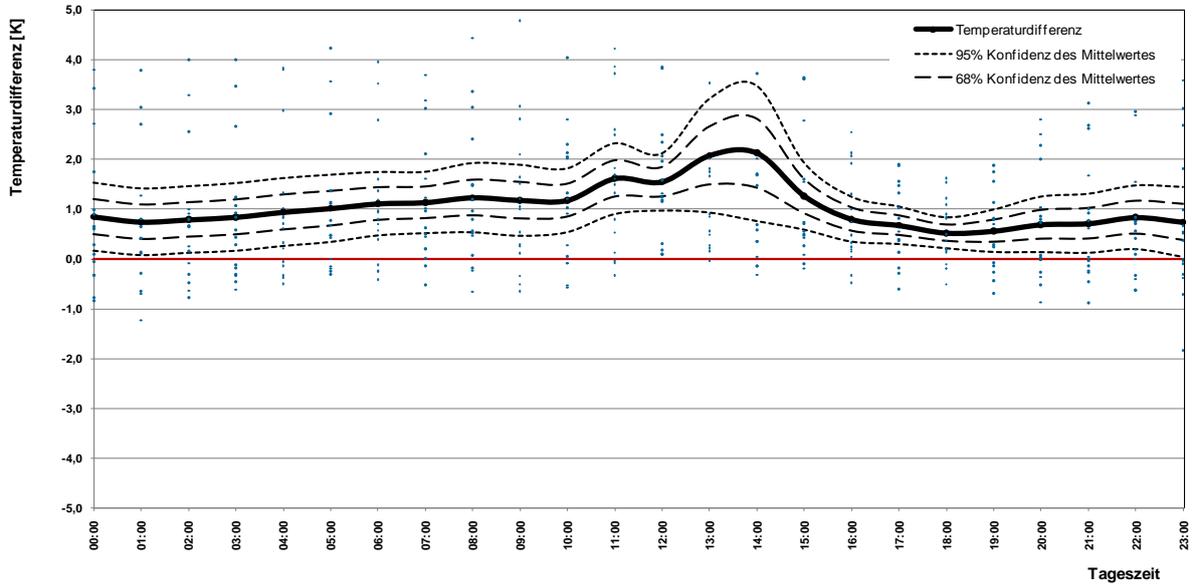
Differenz Luft - Fahrbahntemperatur 02/2009 (Trockentage)



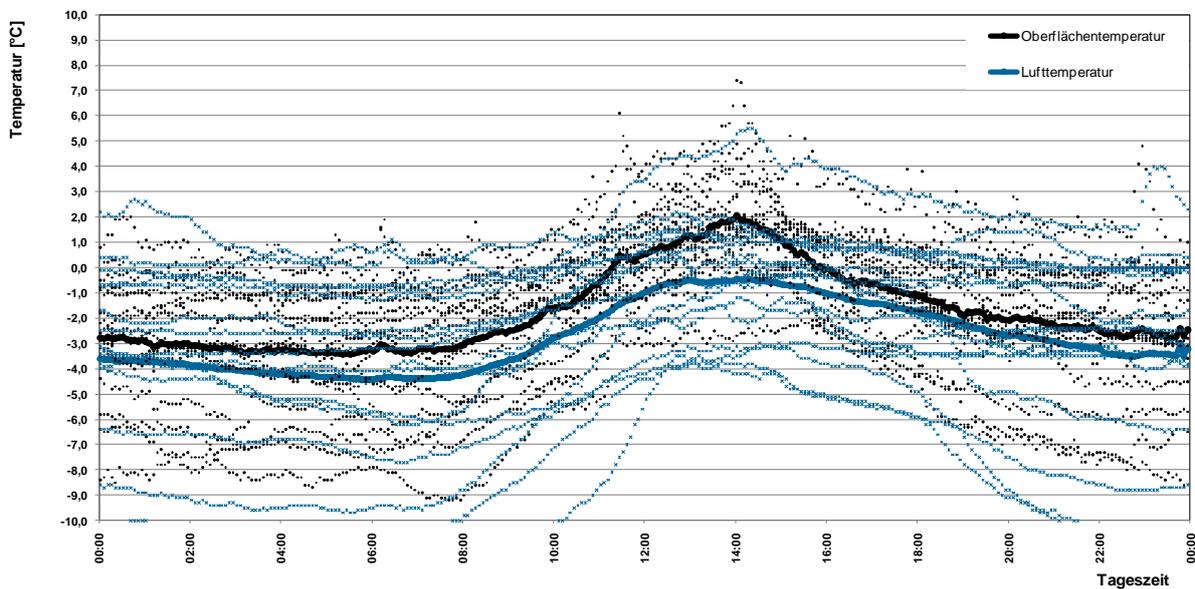
Verläufe der Luft- und Fahrbahntemperatur 02/2009 (Niederschlagstage)

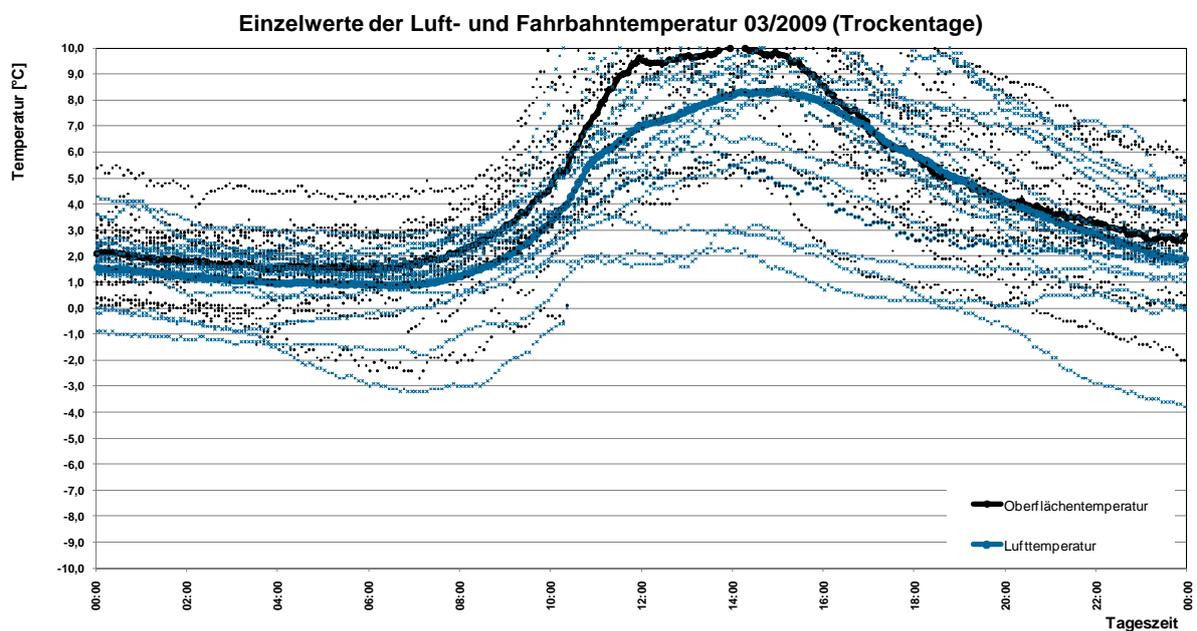
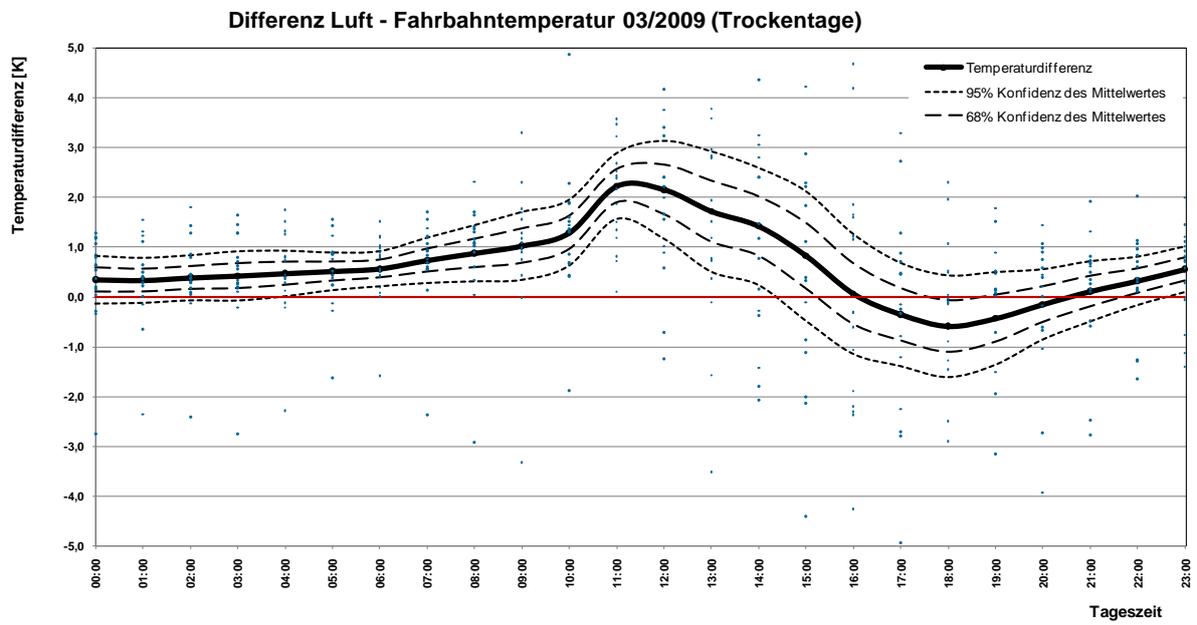
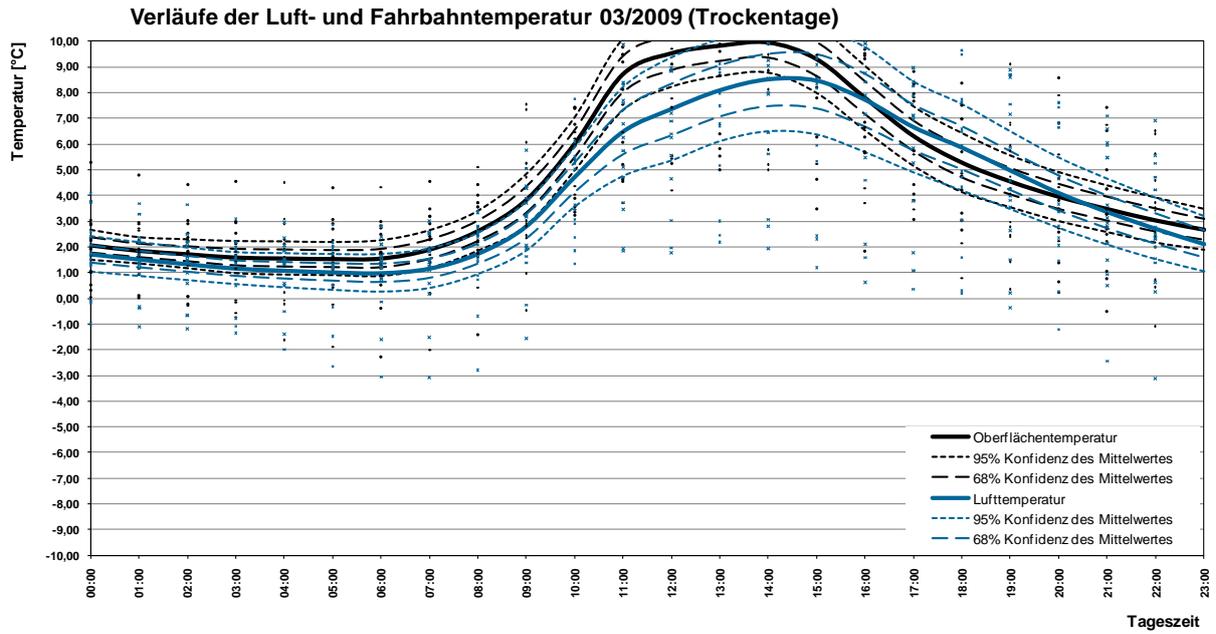


Differenz Luft - Fahrbahntemperatur 02/2009 (Niederschlagstage)

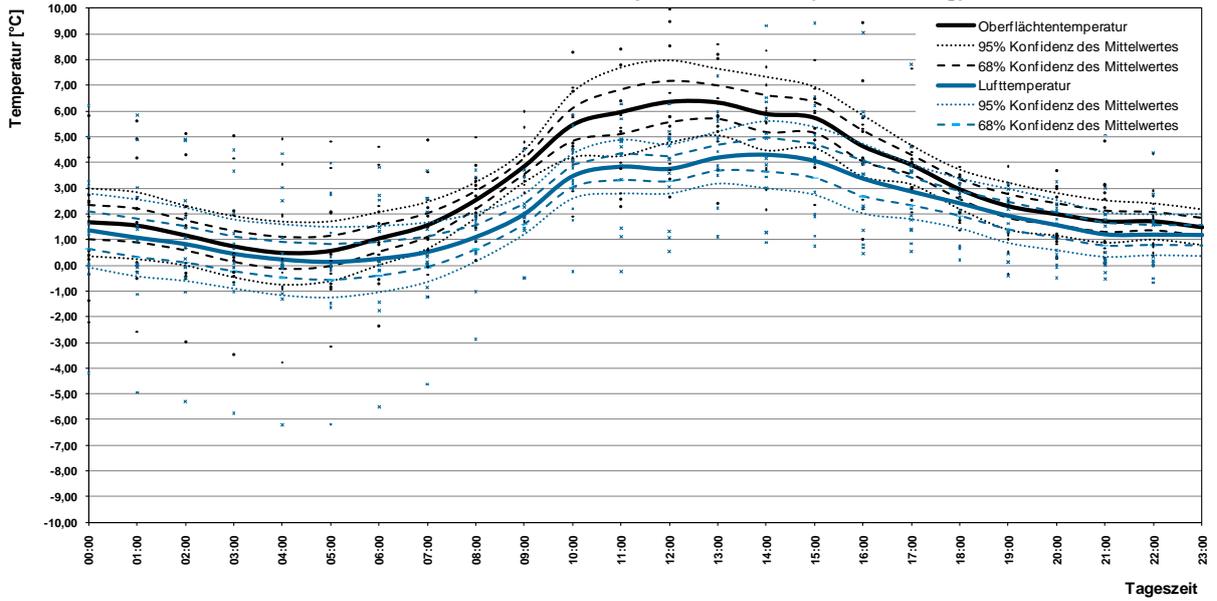


Einzelwerte der Luft- und Fahrbahntemperatur 02/2009 (Niederschlagstage)

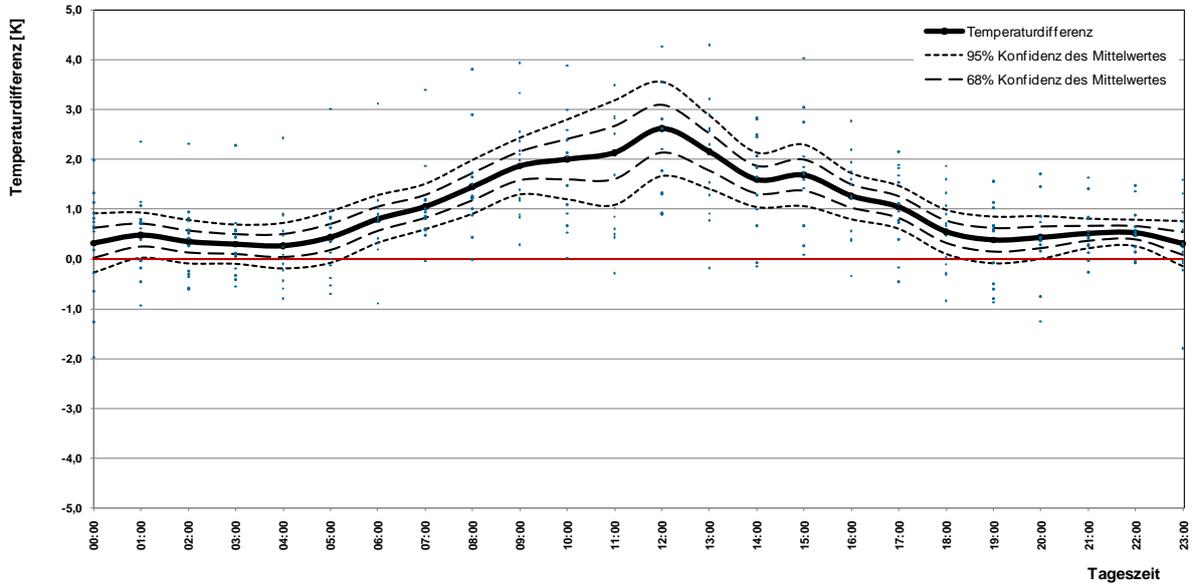




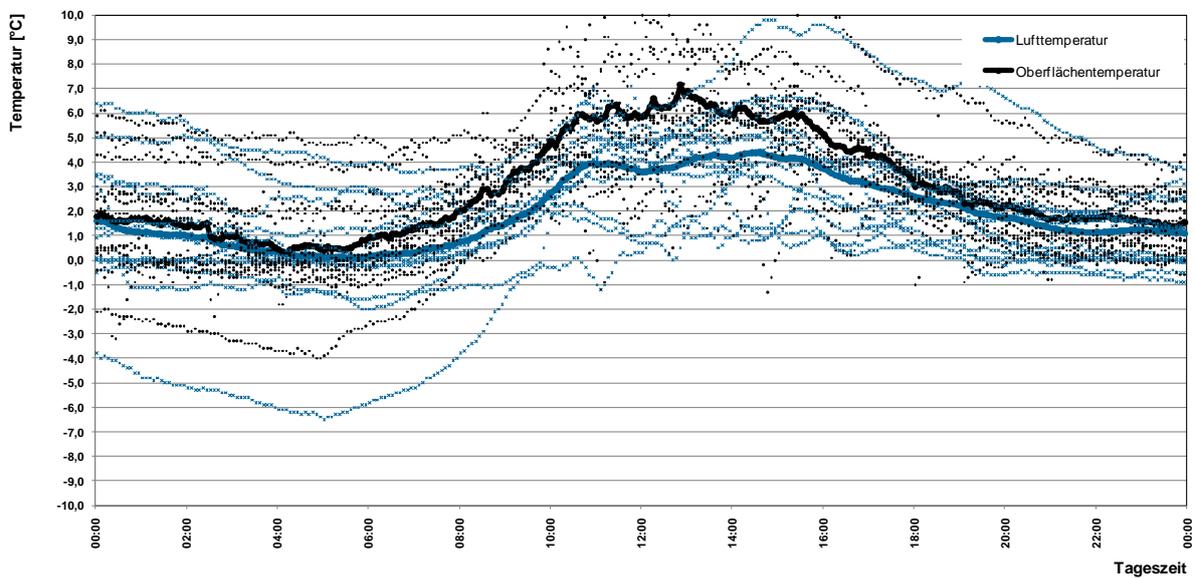
Verläufe der Luft- und Fahrbahntemperatur 03/2009 (Niederschlag)



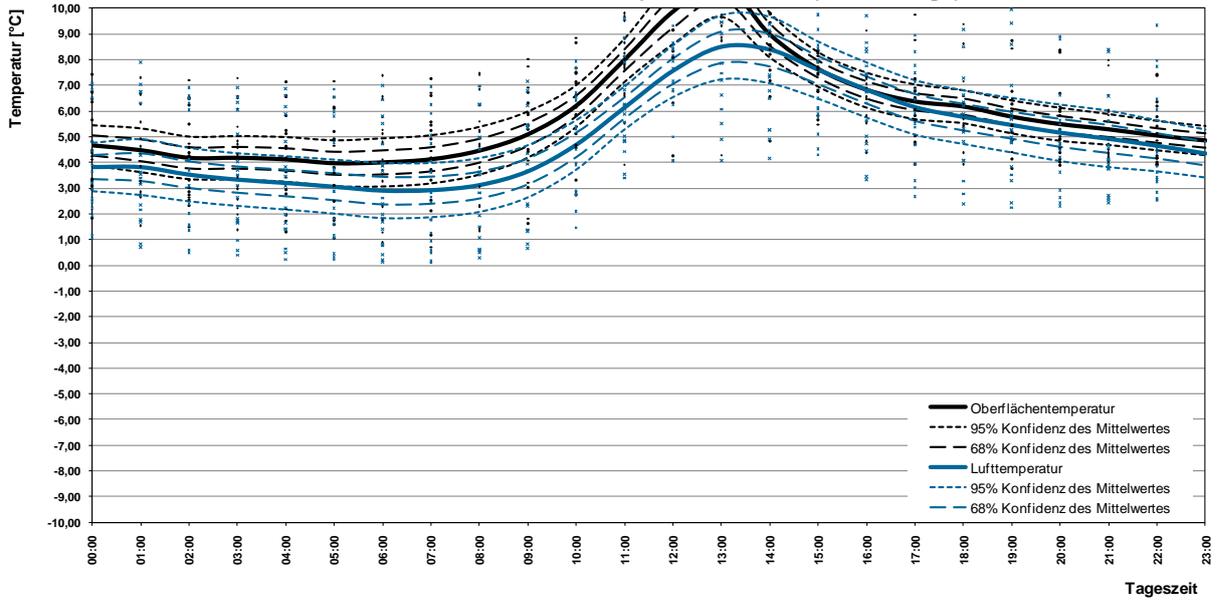
Differenz Luft - Fahrbahntemperatur 03/2009 (Niederschlagstage)



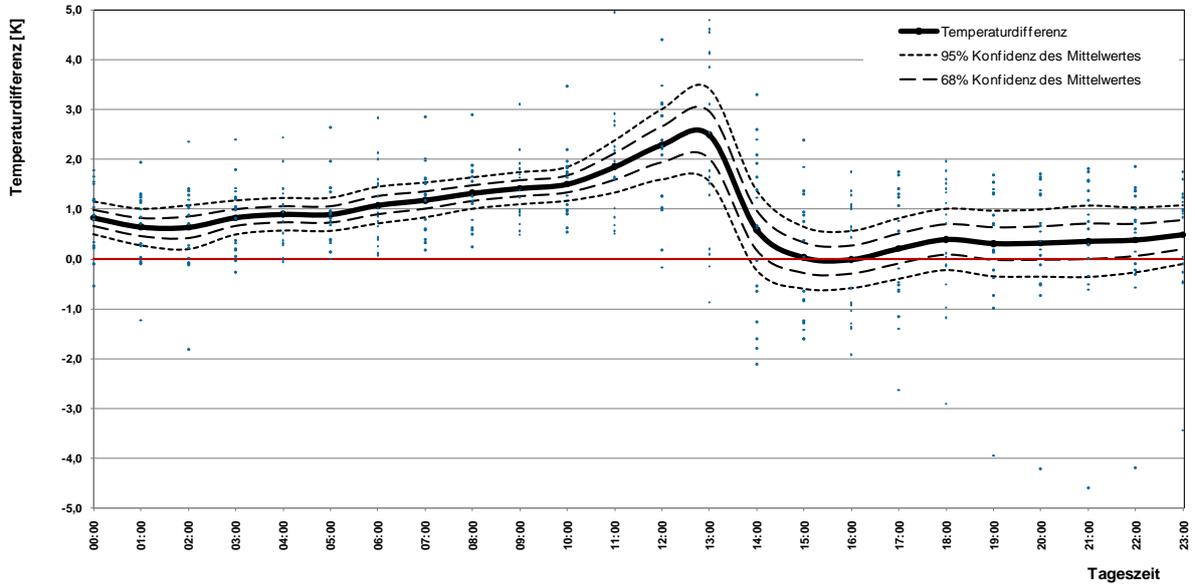
Einzelwerte der Luft- und Fahrbahntemperatur 03/2009 (Niederschlag)



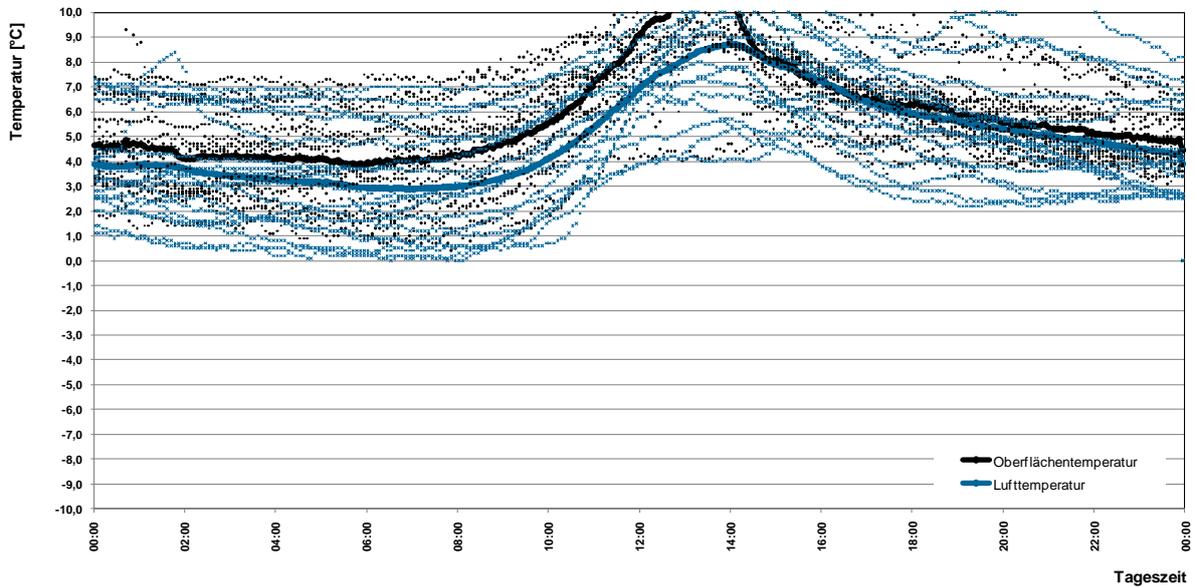
Verläufe der Luft- und Fahrbahntemperatur 11/2009 (Trockentage)



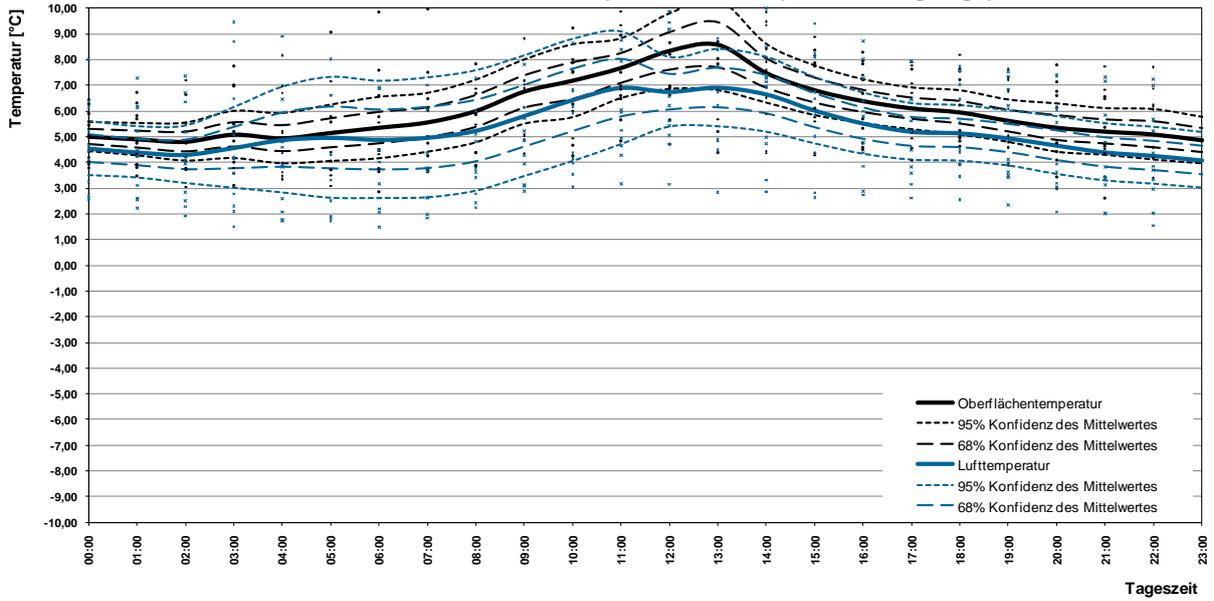
Differenz Luft - Fahrbahntemperatur 11/2009 (Trockentage)



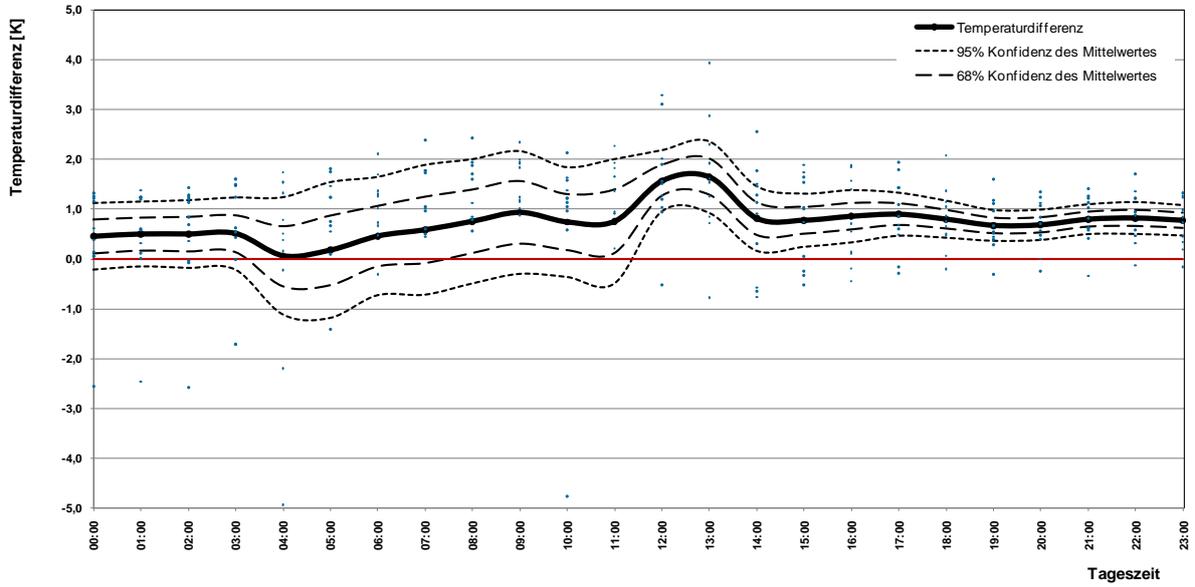
Einzelwerte der Luft- und Fahrbahntemperatur 11/2009 (Trockentage)



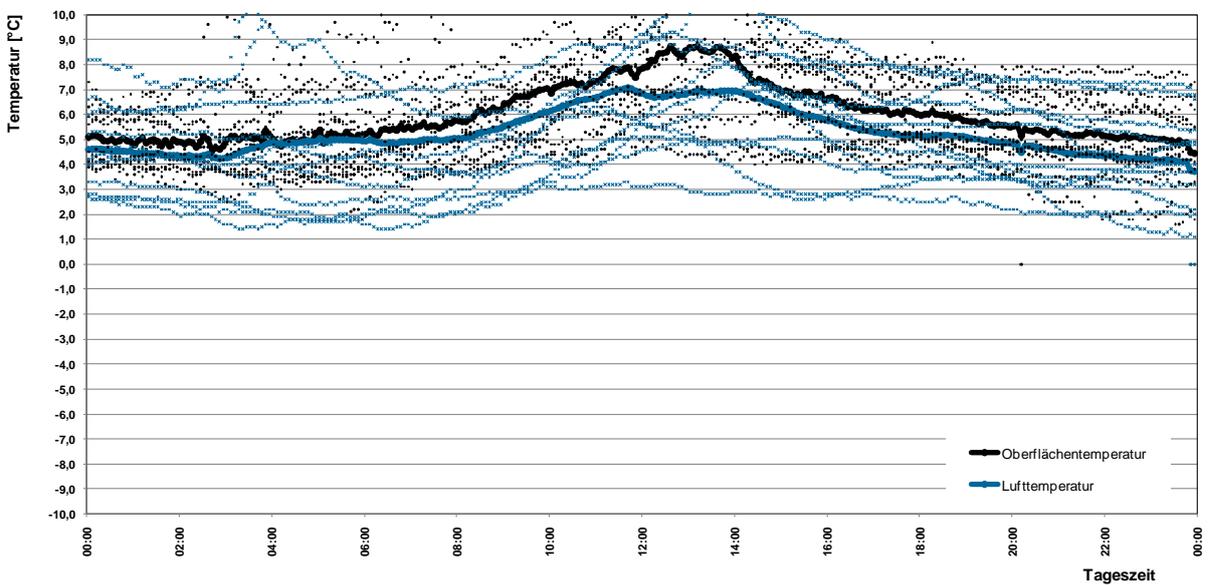
Verläufe der Luft- und Fahrbahntemperatur 11/2009 (Niederschlagstage)

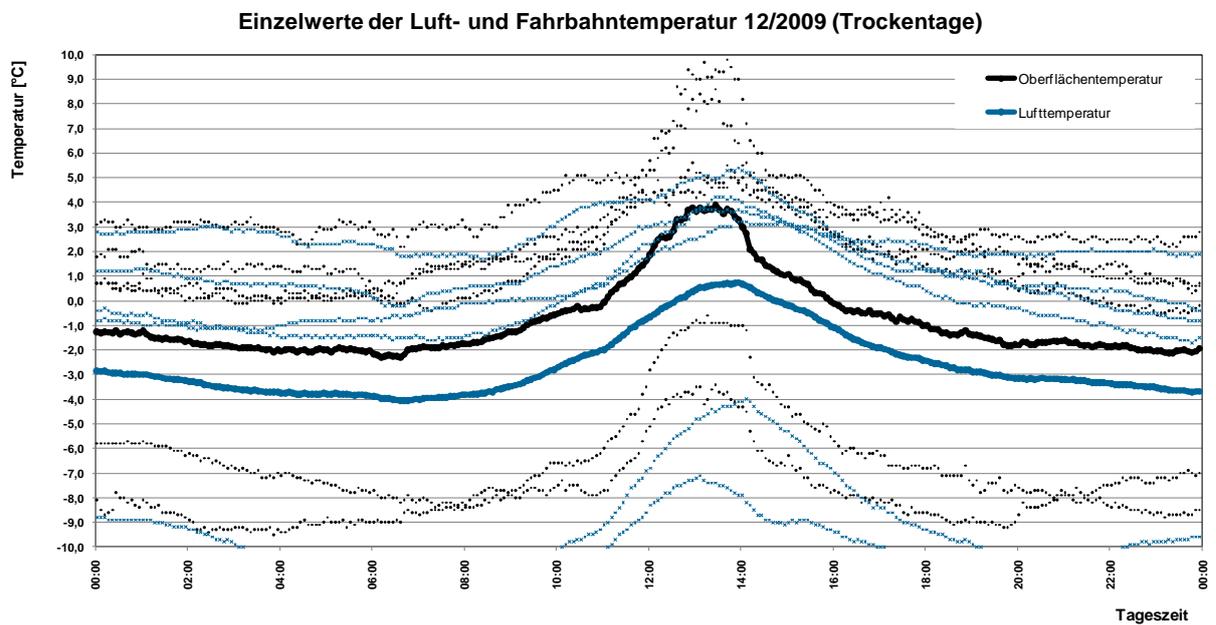
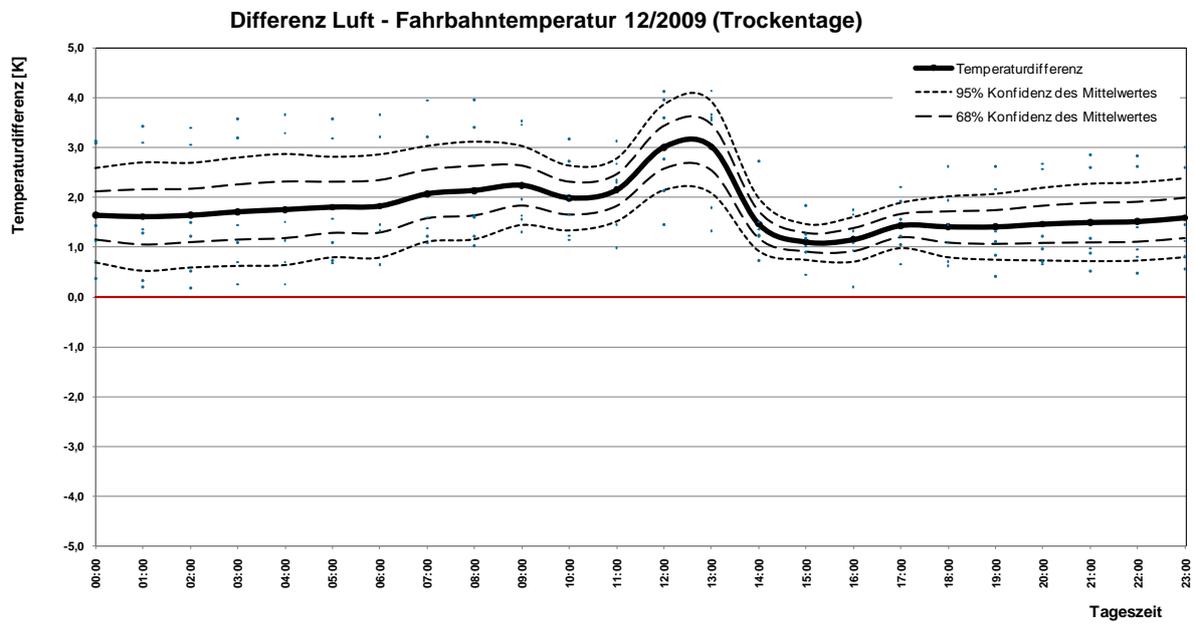
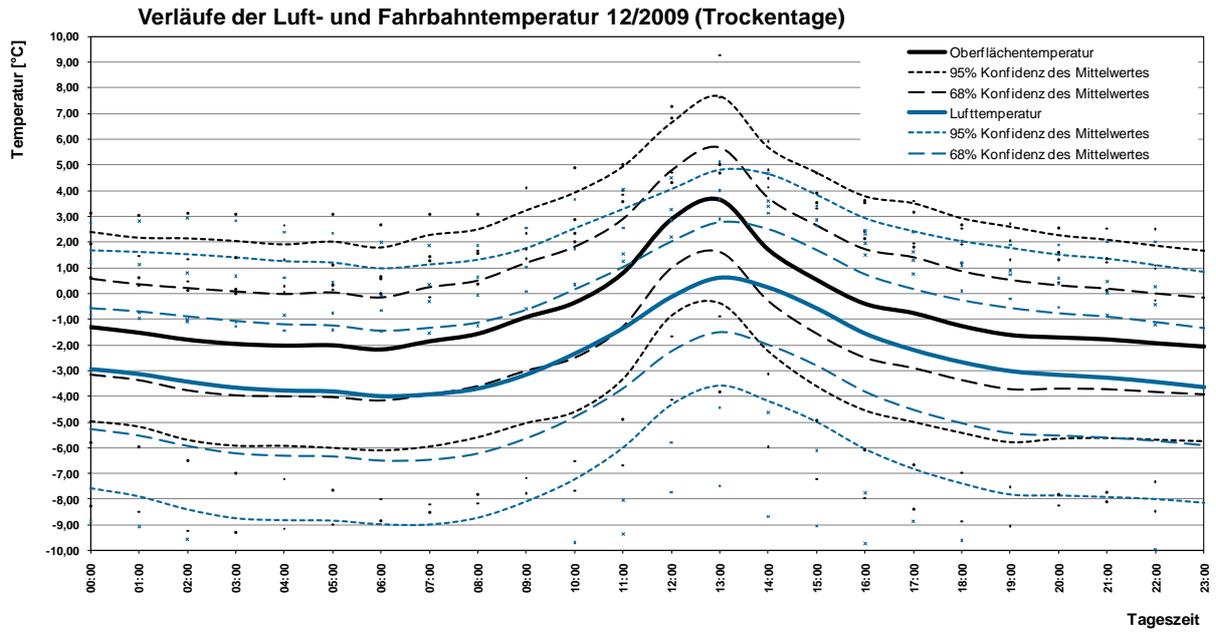


Differenz Luft - Fahrbahntemperatur 11/2009 (Niederschlagstage)

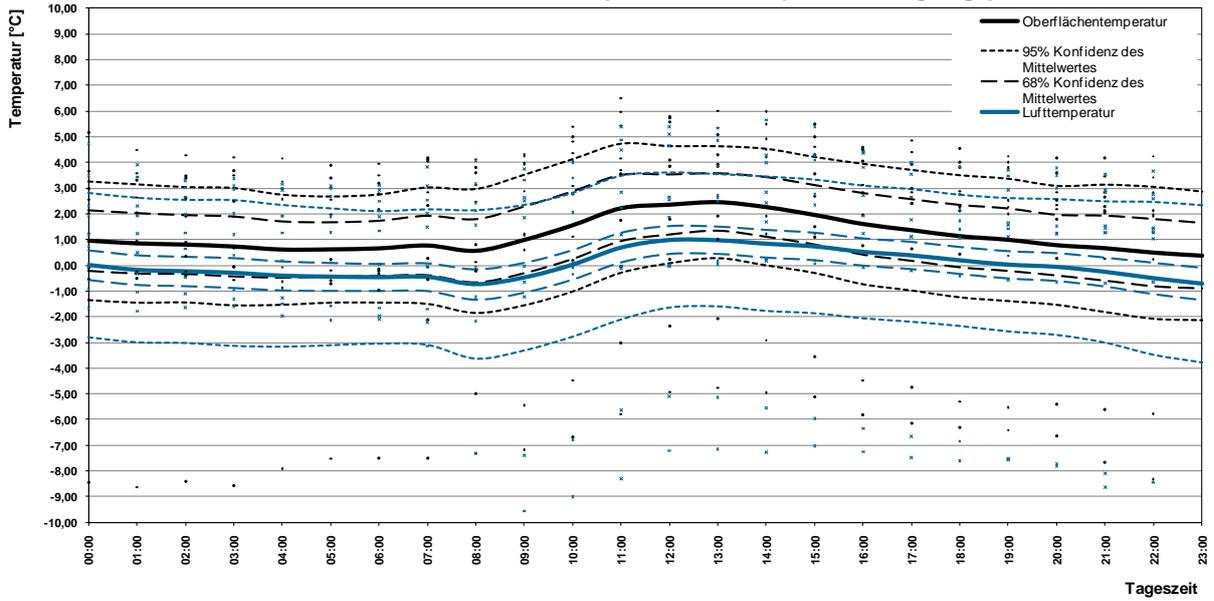


Einzelwerte der Luft- und Fahrbahntemperatur 11/2009 (Niederschlagstage)

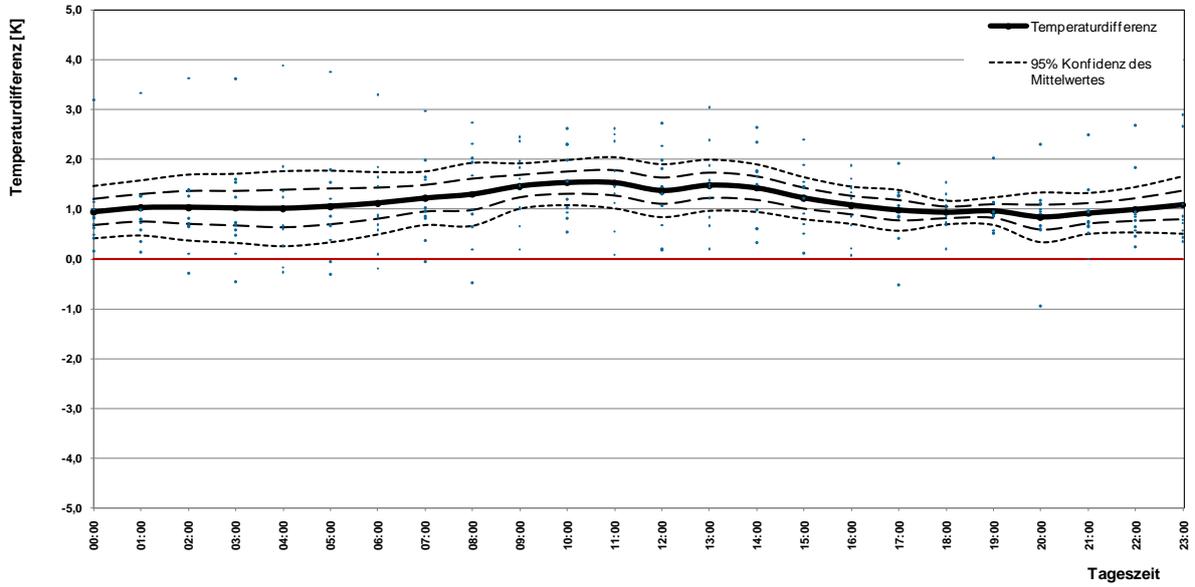




Verläufe der Luft- und Fahrbahntemperatur 12/2009 (Niederschlagstage)



Differenz Luft - Fahrbahntemperatur 12/2009 (Niederschlagstage)



Einzelwerte der Luft- und Fahrbahntemperatur 12/2009 (Niederschlagstage)

