

Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 180

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page, partially overlapping a vertical white line that runs down the right side of the cover.

Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn

von

Günter Hausmann

KOMMZEPT
Ingenieurbüro Hausmann
Bannewitz

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 180

bast

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 03.404/2005/HRB:
Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn

Projektbetreuung
Horst Badelt

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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

ISSN 0943-9331
ISBN 978-3-86509-908-2

Bergisch Gladbach, Mai 2009

Kurzfassung – Abstract

Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn

Genauere Kenntnisse über die Verteilung von Streustoffen auf der Fahrbahn und deren Wirkungszeiten sind Voraussetzungen für einen sparsamen Streustoffeinsatz.

Die Kenntnis des zeitlichen Verlaufes der Wirkung von Tausalzen auf der Fahrbahn schafft die Möglichkeit, Wiederholungsstreuungen erst dann durchzuführen, wenn das aus Sicht der Verkehrssicherheit notwendig ist. Dabei ist besonders wichtig, die Zusammenhänge mit der Zahl der Fahrzeugüberfahrten und Niederschlagsereignisse zu erkennen.

In einigen Ländern wurden dazu in der Vergangenheit Untersuchungen durchgeführt. Problematisch war dabei immer, dass die Salzmengenmessungen nur während Sperrungen der Fahrbahn durchgeführt werden konnten. Der Aufwand der manuellen Messungen beschränkte die Zahl der Messtage erheblich.

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die auf der Fahrbahn wirksamen Salzmengen über zwei Winterperioden auf dem kompletten Querschnitt einer zweistreifigen Autobahn zu erfassen.

Dazu wurden Fahrbahnsensoren eingesetzt, die durch Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der Wasserfilmdicke die Salzmenge auf der Fahrbahn ermitteln können.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden umfangreiche Labortests an zwei Sensorfabrikaten durchgeführt, um deren Messgenauigkeit festzustellen.

Nach Auswahl des Fabrikates wurden insgesamt 12 Sensoren bei Kilometer 29,8 der Autobahn A 4 Richtung Görlitz eingebaut. Das Messfeld wurde von Dezember 2006 bis April 2008 betrieben und lieferte während der Winterperioden etwa 8 Millionen Daten über den Fahrbahnzustand. Parallel dazu wurden die Aufzeichnungen von ca. 210 Streuungen ausgewertet, die im Rahmen des planmäßigen Streudienstes im Bereich des Messfeldes durchgeführt wurden. Diese Daten wurden außerdem mit den Wetterdaten und den Daten einer nahe liegenden Verkehrszählstation kombiniert.

Ergänzend zu den Messungen mit den Fahrbahnsensoren wurden einzelne Analysen mit dem Streustoff-Aufnahmegerät der Firma ESG durchgeführt. Dabei werden auf der Fahrbahn vorhandene Restsalzmengen komplett aufgenommen und analysiert.

Aus den Analysen konnten folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Der Streustoff wird aus den Rollspuren sehr schnell verdrängt. Eine geringe, verbleibende Salzmenge ist jedoch zumeist ausreichend, um gefährliche Glätte zu verhindern.
- Bei präventiver Feuchtsalzstreuung auf trockene oder leicht feuchte Fahrbahn kommt nur ein geringer Teil des ausgestreuten Salzes zur Wirkung, soweit nicht innerhalb kurzer Zeit Niederschlag fällt.
- Präventive Streuungen müssen sehr zeitgenau, möglichst nicht mehr als 60 Minuten vor einem erwarteten Glätteereignis, durchgeführt werden.
- Bei Feuchtsalzstreuung auf feuchte Fahrbahn gehen in Abhängigkeit von der Streudichte und weiteren Faktoren nur ca. 25 bis 50 % des ausgebrachten Salzes in Lösung. Der restliche Teil des Salzes wird in Randbereiche verfrachtet, ohne zur Glättebekämpfung beizutragen.
- Die durch Niederschläge reaktivierten Restsalzmengen liegen 24 Stunden nach der Streuung bei 0,5 bis 1,5 g/m².
- Salzanteile aus einer reinen Solestreuung werden deutlich langsamer von der Fahrbahn verdrängt.
- Mit Solestreuung könnten bei erwarteter Reifglätte und überfrierender Nässe erhebliche Salzeinsparungen erzielt werden.
- Fahrbahnsensoren haben bei der Feststellung der Restsalzmengen und der Gefriertemperatur bei dem derzeitigen technischen Entwicklungsstand unter Praxisbedingungen erhebliche Unsicherheitsfaktoren.
- Unter dem Aspekt, dass Fahrbahnsensoren an den jeweils kritischen Stellen angeordnet wer-

den sollten, sprechen die Erkenntnisse der Untersuchung dafür, die Fahrbahnfeuchte und die Gefriertemperatur in der Rollspur festzustellen. Zusätzlich ist noch eine Messung der Fahrbahn-temperatur außerhalb der Rollspuren zu empfehlen. Es muss jedoch noch untersucht werden, welcher Fahrstreifen bei 3-streifigen Fahrbahnen mit Sensoren bestückt werden sollte.

Distribution of spreading agents on the road surface

Detailed knowledge of the distribution of spreading agents on the road surface and their effective times are prerequisites for the economical use of applying spreading agents.

Knowledge of the temporary course of effect of melting salts on road surfaces allows to repeat spreading only as soon as any necessity arises from the point of view of road safety. Thereby it is especially important to recognize the correlation between the number of vehicles passing over and further precipitation events.

In this respect, some investigative work was carried out in some countries in the past. In this context it was always problematic to be able to measure salt quantities during road blocks only. The expense of manual measuring considerably reduced the number of days of measurement.

The objective of the research project was to register the effective quantities of salt on the road surface over two winter periods across the total cross-section of a dual-lane highway.

For this purpose road sensors were applied that were able to establish salt quantities on the road by measuring the electrical conductivity and the thickness of the water film.

As part of the research project, two extensive laboratory tests were performed on two sensor models in order to establish their measuring precision.

After having selected the sensor make, a total of twelve sensors was installed at Kilometer 29.8 on the Highway A 4 in the direction of Goerlitz. The measuring field was operated from December 2006 through April 2008 and supplied approximately 8 million pieces of data regarding road conditions during the winter seasons. Parallel to that, about 210 spreading actions that were performed by the

regular spreading service in the range of the measuring field were evaluated. These data were also correlated with the weather data and the data of a nearby traffic counting facility.

Additionally to the measurements by road sensors, individual analyses were made by means of the ESG device, whereby quantities of residual salt remaining on the road were completely recorded and analyzed.

The following findings were derived from these analyses:

- The spreading agent gets pushed out of the wheel track very quickly. However, in most cases a small quantity of residual salt is sufficient to prevent dangerous slipperiness.
- With preventive spreading of pre-wetted salt on dry or slightly moist road surfaces only a small part of the applied salt becomes effective if there is no precipitation within a short time.
- Preventive spreading must be applied with timely precision; if possible not longer than 60 minutes before an expected icing event occurs.
- In the case of spreading pre-wetted salt onto the moist road surface, only about 25 to 50% of the salt applied is dissolved depending on the spread rate and other factors. The remaining part of the salt is passed to marginal areas without contributing to de-icing.
- After spreading, the quantities of residual salt activated by precipitation range between 0.5 and 1.5 g/m².
- Salt portions from purely spreading brine are pushed from the road much more slowly.
- By means of spreading brine, there could be considerable savings in salt in the event of rime ice and black ice to be expected.
- When establishing residual salt quantities and the freezing temperature, road surface sensors cannot securely be relied on at the current state-of-the-art technology.
- Regarding the aspect that road sensors should be placed in the respectively critical spots, the findings of the investigation call for identification of road humidity and freezing temperature in the wheel tracks. In addition, measuring of the road temperature outside the wheel tracks is recommended. However, it still has to be investigated which lane of a three-lane road should be equipped with sensors.

Inhalt

1	Problem und Zielstellung	7	6	Einbau der Fahrbahnsensoren	23
2	Nationaler und internationaler Stand der Forschung	7	7	Umfang der Datenerhebung	25
2.1	Deutschland, Österreich	7	7.1	Messwerte der eigenen Messstelle	25
2.2	Schweiz	8	7.2	Daten der GMA des Autobahn- amtes	25
2.3	Dänemark	9	7.3	Aufzeichnungen des Fahr- personals	26
2.4	Großbritannien	10	7.4	Aufzeichnungen zur Verkehrs- stärke	26
2.5	Norwegen	10	8	Messwertvergleich zwischen Sensoren gleicher Einbaulage	26
2.6	Schweden	11	8.1	Allgemeines	26
2.7	USA	11	8.2	Vergleich von Sensoren gleicher Bauart	26
2.8	Zusammenfassung	12	8.3	Vergleich von Sensoren unter- schiedlicher Bauart	28
3	Auswahl der Ausrüstung	12	9	Auswertung der Messdaten	29
3.1	Ausschreibung	12	9.1	Auswertungsaspekte	29
3.2	Labortests der Sensoren	12	9.2	Auswertungsformen	29
3.2.1	Sensor Fa. Lufft	13	9.3	Messergebnisse	30
3.2.2	Sensor Fa. Vaisala	15	9.3.1	Fahrbahnoberflächentemperatur	30
3.3	Vergabeentscheidung	17	9.3.2	Streustoffmenge	31
3.4	Werksabnahme der Sensoren	17	9.3.3	Wasserfilmdicke	32
4	Vorbetrachtungen	17	9.3.4	Windrichtung und -geschwindigkeit ...	33
4.1	Einflussfaktoren auf die Verweil- dauer von Tausalzen auf der Fahrbahn	17	9.3.5	Kombinierte Betrachtung des zeit- lichen Verlaufes von Streustoff- menge, Gefriertemperatur und Fahr- bahnoberflächentemperatur	34
4.1.1	Fahrzeugverkehr	17	9.4	Charakteristische Winterdienst- situationen	34
4.1.2	Fahrbahnoberfläche	18	9.5	Bedeckung der Sensoroberfläche unter winterlichen Bedingungen	37
4.1.3	Salzart und -konsistenz	19	10	Auswertung der Streuvorgänge	38
4.1.4	Meteorologische Faktoren	19	10.1	Untersuchte Vorgänge	38
4.2	Einfluss der Flüssigkeitsmengen auf der Fahrbahn	20	10.2	Zusammenfassende Auswertung der Messergebnisse	43
4.2.1	Typisierung der Flüssigkeitsmengen unter Winterdienstaspekten	20			
4.2.2	Wirkung des Salzeinsatzes bei ge- ringen Flüssigkeitsfilmdicken	21			
5	Untersuchungsmethodik	22			
5.1	Anlagenkonfiguration	22			
5.2	Standortauswahl	22			
5.3	Anordnung der Fahrbahnsensoren	23			

10.2.1. Charakteristik der untersuchten Winterdienstsituationen	43
10.2.2 Streustoffeinsatz	44
10.2.3 Maximal gelöste Streustoffmenge ...	44
10.2.4 Abnahme der Streustoffmenge nach der Streuung	46
11 Parallelmessungen mit dem ESG-Gerät	48
12 Betriebsfestigkeit und Anordnung der Sensoren	50
13 Zusammenfassung und Ausblick ...	51
Literatur	53

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Maßeinheit
Anf	Anfangswert	
AR	Außerhalb der Rollspur	
End	Endwert	
FB	Fahstreifenbegrenzung	
FM	Fahstreifenmitte	
FS	Trennlinie zwischen den Fahstreifen	
FT	Fahrbahnoberflächentemperatur	°C
FTAR/FT _{AR}	Fahrbahnoberflächentemperatur außerhalb Rollspur	°C
FTRS/FT _{RS}	Fahrbahnoberflächentemperatur innerhalb Rollspur	°C
GMA	Glättemeldeanlage	
GT	Gefriertemperatur	°C
GTAR/GT _{AR}	Gefriertemperatur außerhalb Rollspur	°C
GTRS/GT _{RS}	Gefriertemperatur innerhalb Rollspur	°C
KO	Konzentration	g/l
R ²	Bestimmtheitsmaß	
RL	Rollspur links	
RR	Rollspur rechts	
RS	Rollspur	
SM (TSQ)	Streustoffmenge	g/m ²
SMAR/SM _{AR}	Streustoffmenge außerhalb Rollspur	g/m ²
SM _{AR} End	Streustoffmenge außerhalb Rollspur am Ende des Analysezeitraumes	g/m ²
SMRS/SM _{RS}	Streustoffmenge innerhalb Rollspur	g/m ²
SM _{RS} End	Streustoffmenge innerhalb Rollspur am Ende des Analysezeitraumes	g/m ²
t _{Ges}	Gesamtzeit der Analyse	min
Typ PR	Typisierter Einsatzanlass Präventivstreuung	
Typ SF	Typisierter Einsatzanlass Schneefall	
Typ SR	Typisierter Einsatzanlass Schneeregen	
Typ SM	Typisierter Einsatzanlass Schneematsch	
WD (WFD)	Wasserfilmdicke	mm

1 Problem und Zielstellung

Ziel der Forschungsarbeit ist der effizientere Einsatz von Tausalzen im Straßenwinterdienst und die Ausschöpfung der vorhandenen Einsparpotenziale. Zur Erreichung dieses Zieles trägt diese Forschungsarbeit folgende Komponenten bei:

- Qualifizierung der Empfehlungen für die Ausbringung von Tausalz,
- Hinweise zur Handhabung und zur Wirksamkeit präventiver Streuungen,
- Anregungen zur differenzierten und alternativen Anwendung von Taustoffen als Feuchtsalz oder Sole in Abhängigkeit von der Glättesituation,
- Erkenntnisse zur Messgenauigkeit von Bodensonden und deren Betriebsfestigkeit,
- Empfehlungen für die optimale Anordnung von Glättemeldesensoren.

Zukünftige Fortschritte bei der wirtschaftlichen und wirksamen Durchführung des Winterdienstes werden ganz wesentlich durch die Anwendung von Informationstechnologien bestimmt.

Parallel dazu haben auch weiterhin klare Handlungsanweisungen für das Einsatzpersonal eine entscheidende Bedeutung. Insbesondere bezüglich der Vorgaben für eine effiziente Streuung sind noch wesentliche Fortschritte möglich.

Die optimale Quer- und Längsverteilung von Streugut ist wesentliche Voraussetzung für einen wirkungsvollen Winterdienst bei sparsamster Streustoffverwendung. Die Anordnung der Glättesensoren ermöglicht die detaillierte Analyse der Streustoffverteilung unter Praxisbedingungen und erschließt Zusammenhänge mit Gerätetechnik und Windeinflüssen.

Die genaue Kenntnis des zeitlichen Verlaufes der Wirkung von Tausalzen auf der Fahrbahn schafft die Möglichkeit, Wiederholungsstreuungen erst dann durchzuführen, wenn das aus Sicht der Verkehrssicherheit notwendig ist. Dabei ist besonders wichtig, die Zusammenhänge zu der Zahl der Fahrzeugüberfahrten und weiteren Niederschlagsereignissen zu erkennen.

Kostenintensive Sensorik optimal zu platzieren ist eine wesentliche Voraussetzung für den nutzbringenden Einsatz von Glättemeldestationen. Die Untersuchung der optimalen Lage von Glättemel-

desensoren leistet einen wesentlichen Betrag dafür.

Praktische Erfahrungen haben in der Vergangenheit häufig gezeigt, dass die Genauigkeit der Ermittlung von Glättedaten oft nicht ausreicht und damit Entscheidungsunsicherheiten entstehen, die zu vermeidbaren, zusätzlichen Einsätzen führen. Die Doppelanordnung und zusätzliche Kalibrierungen führen zu Erkenntnissen über die Zuverlässigkeit der aktuellen Sensorgeneration unter Praxisbedingungen.

2 Nationaler und internationaler Stand der Forschung

2.1 Deutschland, Österreich

Erste tiefgründige Untersuchungen zur Messung von Tausalzen auf der Fahrbahn und zur Wirkungs-dauer von Tausalzen wurden von DIRNBÖCK, MORITZ, POHLE und KUTTER Anfang der 80er Jahre durchgeführt und publiziert.

Für die Messungen wurde das „SOBO 20“ Restsalzmessgerät von Boschung verwendet. Bei den Messungen muss die Fahrbahn gesperrt werden, wodurch erhebliche Aufwendungen entstehen. Eine durchgängige Beurteilung der Restsalzabnahme über eine Winterdienstsaison und allen denkbaren äußeren Bedingungen ist damit nicht möglich. Es wurden jedoch grundsätzliche Erkenntnisse über die Restsalzabnahme in Abhängigkeit von Fahrzeugüberfahrten gewonnen.

Erkenntnisse aus den Untersuchungen und praktische Erfahrungen gingen auch in die Merkblätter für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen, Teil Winterdienst der Ausgabejahre 1984, 1985 und 1997 ein.

Im Rahmen der Dosiergenauigkeitsprüfungen nach TLG-B3 wurde von der Prüfstelle der BASt in Inzell eine Reihe von Streumaschinen überprüft. Dabei wurden unter Laborbedingungen auch Erkenntnisse über die Quer- und Längsverteilung von Tausalz gewonnen.

Im Rahmen der Unterarbeitsgruppe „Optimierung der Streumengen-Dosierung und Ausbringung“ des Arbeitskreises Winterdienst der FGSV wurden beginnend mit dem Jahr 1998 bisherige Erkenntnisse zusammengestellt.

Mitte der 80er Jahre wurde in den Straßenbauverwaltungen damit begonnen, punktuell an repräsentativen und neuralgischen Punkten des Netzes Wetterstationen aufzustellen und deren Messdaten speziell für die operative Einsatzsteuerung im Winterdienst zu nutzen. Der Ausrüstungsstand ist heute dadurch gekennzeichnet, dass hauptsächlich an den Autobahnen und teilweise an Bundesstraßen und im Bereich größerer Kommunen Glättemeldeanlagen (GMA) installiert wurden. An den meisten GMA wird die Möglichkeit genutzt, die Gefriertemperatur zu ermitteln und in Einsatzentscheidungen einzubeziehen. Dazu werden Fahrbahnsensoren verschiedener Hersteller eingesetzt, mit denen die Wasserfilmdicke und die Leitfähigkeit der Salzlösung gemessen werden. Die an einem Punkt der Fahrbahn gewonnenen Messwerte werden in Einsatzentscheidungen einbezogen. Eine systematische Auswertung bezüglich der Restsalzabnahme in Abhängigkeit von Faktoren wie Verkehrsbelastung, Liegezeit und Niederschlagsereignissen erfolgt jedoch nicht. Aus der Praxis ist auch bekannt, dass die Anzeige der Gefriertemperatur mit spürbaren Unsicherheiten behaftet ist.

Zur Minimierung von Messungenauigkeiten wurde von der BASt ein „Verfahren zur Prüfung von Sensoren für die Gefriertemperatur“ entwickelt. Das Verfahren kann zur Prüfung und Kalibrierung von Fahrbahnsensoren unter Laborbedingungen und im eingebauten Zustand eingesetzt werden.

Die Kenntnis der Restsalzkonzentration zum Zeitpunkt des folgenden Streuüberganges würde die Reduzierung der Streudichte um die auf der Fahrbahn verbliebene Salzmenge ermöglichen. Zu diesem Zweck wurde von der Infralytic GmbH (www.infralytic.de) in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Münster und dem Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen im Jahr 2002 ein Projekt zur Entwicklung eines mobilen Streusalzsensors begonnen. Das Projekt wird im Moment nicht weiter verfolgt.

Eine ähnliche Entwicklung wurde in den 90er Jahren bei der Faru GmbH Dresden (www.faru-dresden.de) durchgeführt. Das Gerät hat jedoch keine Serienreife erreicht.

2.2 Schweiz

Bei Voruntersuchungen zur Wirksamkeit der Feuchtsalztechnologie wurden 1965 und in den Folgejahren vom kantonalen Straßenbaulabor Chur

durch ZULAUF umfangreiche Untersuchungen zur Verweildauer von Salzen und Salzlösungen auf der Fahrbahn durchgeführt. Nach Auskunft des derzeitigen Leiters des Straßenbaulabors in Chur, Herrn Züger, wurden die Messungen nach folgendem Prinzip durchgeführt:

- Mit einer Streumaschine wurde eine definierte Menge Salz auf die Straße aufgebracht.
- Auf die Straßenoberfläche wurde ein Rahmen mit Gummidichtung (Fläche von ca. 0,15 m²) gelegt
- Der Rahmen wurde mit Wasser gefüllt und somit Salze von der Straßenoberfläche gelöst.
- Nach bestimmter Zeit wurde die elektrische Leitfähigkeit der Salzlösung gemessen.

Bei den Untersuchungen wurden folgende Einflussfaktoren auf die Verweildauer von Salzen auf der Fahrbahn berücksichtigt:

- Verkehrsstärke,
- Fahrgeschwindigkeit,
- Oberflächentextur der Fahrbahn,
- Salzart,
- Salzkörnung,
- Zustandsform der Salze (trocken, befeuchtet, gelöst).

Die Untersuchungen kamen zu folgenden Ergebnissen:

Die Verkehrsstärke hat einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Verweildauer. Nach 1.000 Fahrzeugüberfahrten befindet sich bei befeuchtetem Salz nur noch etwa 20 % der ausgestreuten Menge auf der Fahrbahn (Bild 1).

Bei geringen Fahrgeschwindigkeiten (Stadtverkehr) ist die Verweildauer deutlich länger als bei hohen Fahrgeschwindigkeiten (Autobahn).

Auf Fahrbahnen mit offenen Texturen (bituminöse Deckschichten – nicht OPA) ist die Verweildauer höher als auf geschlossenen Texturen (Betondecke).

Salze mit hygroskopischen Eigenschaften bei geringen relativen Luftfeuchten (MgCl₂, CaCl₂) haften länger auf der Fahrbahn.

Korngrößen von 0,4 bis 0,7 mm haften besser auf der Fahrbahn als größere und kleinere Körnungen.

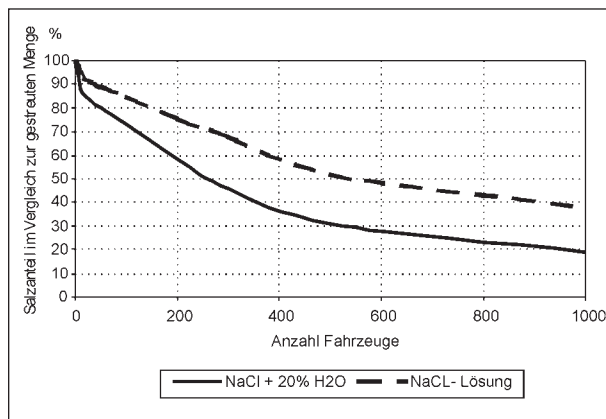


Bild 1: Abnahme der Salzmenge auf der Fahrbahn in Abhängigkeit von Fahrzeugüberfahrten nach ZULAUF

Die Verweildauer von Salzen auf der Straßenoberfläche erhöht sich durch Befeuchtung deutlich. Es wurde auch festgestellt, dass als Salzlösung ausgebrachtes Salz noch länger auf der Fahrbahn verbleibt.

2.3 Dänemark

In Dänemark werden seit dem Ende der 90er Jahre intensive Überlegungen und Untersuchungen angestellt, die sich mit der Optimierung des Einsatzes von Taustoffen beschäftigen. Dabei steht der Vergleich der Wirkungen von Feuchtsalz und reiner Salzlösung im Mittelpunkt. In dem Bericht von SPLIID wird beschrieben, dass 2, 5 und 10 Stunden nach der Streustoffausbringung (Feuchtsalz, Sole) Restsalzmessungen vorgenommen wurden. Dabei wurde die Verkehrsabhängigkeit der Restsalzabnahme bestätigt. Sehr deutlich zeigte sich, dass die Restsalzabnahme bei Soleanwendung deutlich langsamer erfolgt als bei der Anwendung von Feuchtsalz. Auf Basis der gewonnenen Daten wurde ein erstes Rechenmodell entwickelt, welches die Restsalzabnahme in Abhängigkeit von Verkehrsaufkommen, Zeit und Streumedium beschreibt. Durch GLUE wurde eine Gleichung entwickelt, welche die relative Restsalzabnahme nach Soleanwendung und Feuchtsalzeinsatz in Abhängigkeit von der Verkehrsintensität beschreibt. Die Messungen basieren auf ausgebrachten Streustoffmengen von 20 g/m^2 Sole bzw. 10 g/m^3 Feuchtsalz. Der reine Salzgehalt betrug $4,6 \text{ g/m}^2$ (Sole) und $7,6 \text{ g/m}^2$ (Feuchtsalz).

Weitere Restsalzmessungen im Vergleich zwischen Sole und Feuchtsalz wurden von FONNESBECH im Jahr 2000 publiziert (Bild 2).

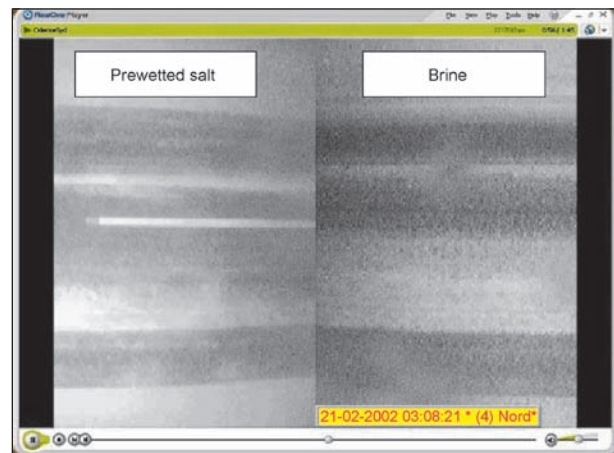


Bild 2: Direkter Vergleich der Wirkung von Feuchtsalz (Prewetted salt) und Sole (Brine) bei gleichen Auftragsmengen von reinem Salz und gleicher Einwirkungszeit auf nebeneinander liegenden, durch Mittelstreifen getrennten Richtungsfahrbahnen



Bild 3: Videomast auf der E 20 in Dänemark

In den Winterperioden 2000/01 und 2001/02 wurde auf der E 20 zwischen Nyborg und Middelfart (zwei zweistreifige Richtungsfahrbahnen) ein Messfeld eingerichtet, welches mit 24 doppelreihig über den gesamten Fahrbahnquerschnitt angeordneten Fahrbahnsensoren ausgestattet war. Die beiden Sensorreihen waren 60 m voneinander entfernt. Außerdem wurde auf dem Mittelstreifen ein Videomast errichtet, von dem aus die Veränderungen des Fahrbahnzustandes dokumentiert wurden (Bild 3).

Ziel der Messungen war ebenfalls der Vergleich der Wirkungen von Salzlösung und Feuchtsalz. Im Zuge der Versuchsdurchführung erwiesen sich die Messungen der Gefriertemperatur als zu ungenau und widersprüchlich, sodass dieser Teil des Messfeldes nicht für die Auswertung genutzt werden

konnte und keine quantitativen Aussagen über die Restsalzabnahme getroffen wurden. Die Videoaufzeichnungen zeigen, dass mit Feuchtsalz unter identischen äußeren Bedingungen eine gründlichere Beseitigung der Glätteschicht erzielt wird.

Es wurde weiterhin festgestellt, dass auf dem Fahrstreifen mit dem größeren und schwereren Verkehrsaufkommen weniger Streustoff benötigt wird als auf dem Überholstreifen, um den gleichen Effekt zu erzielen. Daraus wird die Schlussfolgerung gezogen, dass zukünftig nach Fahrstreifen differenziert dosiert wird. Die Möglichkeit dafür besteht mit speziellen Solesprühmaschinen.

Weitere Untersuchungen zur Salzausbringung durch Feuchtsalzstreumaschinen und Solesprühfahrzeuge werden von der dänischen Straßenbauverwaltung regelmäßig im Internet publiziert. Dabei wird die Restsalzmenge bei Feuchtsalzstreumaschinen in einem Zeitraum von zwei bis vier Stunden nach der Streuung mit SOBO-20-Geräten gemessen. Die Messpunkte sind über den Fahrbahnquerschnitt 0,5 m voneinander entfernt. Jede Messung wird 5fach von unterschiedlichen Personen mit unterschiedlichen Geräten durchgeführt. Im dokumentierten Beispiel (Bild 4) wurden 10 g/m² Feuchtsalz mit 6 m Streubreite bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h ausgebracht.

Aus den Messungen lässt sich ablesen, dass bei der Feuchtsalzstreuung nur noch etwa 70 % des ausgebrachten Salzes auf der Fahrbahn verblieben sind. Bei großen Streubreiten (7 m) und hohen Streudichten (15g/m²) verringert sich dieser Wert bis auf 60 %. Es ist auch erkennbar, dass der Streustoff nach dieser Zeit sehr ungleichmäßig über den Fahrbahnquerschnitt verteilt ist.

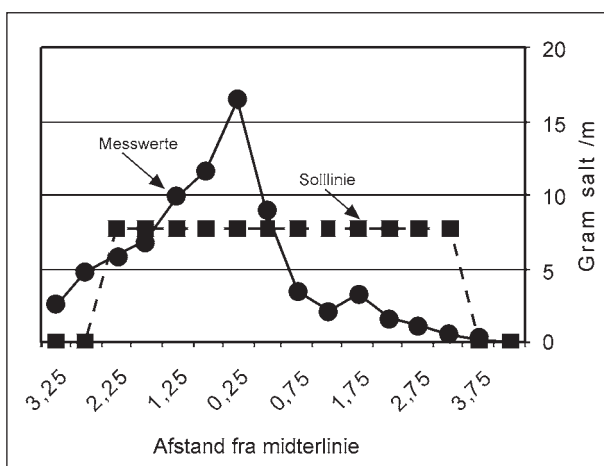


Bild 4: Beispiel für eine Querverteilung; Streugeschwindigkeit: 60 km/h; Streudichte: 10 g/m² FS30

2.4 Großbritannien

In Großbritannien wurden von der Transportation Research Laboratory Limited in der Wintersaison 2003/04 Feldversuche zum Vergleich der Effekte von Trocken- und Feuchtsalz durchgeführt. Dabei wurde auch die Restsalzabnahme zeitbezogen ermittelt. Die Aufnahme des Streustoffes von der Fahrbahn wurde mit Sauggeräten auf einer Länge von 10 m durchgeführt. Die aufgenommene Salz- und Solemenge wurde anschließend gewogen. Gemessen wurde unmittelbar nach der Streuung auf dem mittleren Fahrstreifen einer dreistreifigen Richtungsfahrbahn. Angaben über die Zahl der Fahrzeugüberfahrten nach der Streuung liegen nicht vor. Das Restsalz wurde nach diesen Messungen nach Feuchtsalzstreuung innerhalb einer Stunde um 60 % reduziert. Das Messverfahren lässt jedoch keine genauen Werte zu. Die Zahl der Messungen war sehr gering (es standen nur zwei Nächte zur Verfügung). Die Ergebnisse der Untersuchung sind daher als unsicher anzusehen (Bild 5).

2.5 Norwegen

Bei der norwegischen Straßenbauverwaltung (www.vegvesen.no) wurde von STOTTERUD in der Wintersaison 2003/04 eine Studie zur Befeuchtung von Streusalz mit warmem Wasser begonnen. Zur Überprüfung der Wirkung dieser Methode wurden unter Einbeziehung der normalen Feuchtsalzstreuung vergleichende Restsalzmessungen durchgeführt. Die Messungen wurden mit dem SOBO-20-Gerät und einem Handrefraktometer durchgeführt. Auf dem Querschnitt einer 2-streifigen Fahrbahn wurden jeweils 8 Messpunkte gesetzt (Bild 6).

Auf Abschnitten von jeweils 1,5 km einer Straße wurden mehrfach wechselnd beide Streutechnologien eingesetzt. Anschließend wurde in unregelmäßigen Zeitabständen bis zu 3 Stunden nach der Streuung der Restsalzgehalt auf der Straße gemessen (Bild 7).

In ähnlicher Form wurden Restsalzmessungen innerhalb eines Projektes zur Überprüfung der Einsatztauglichkeit von Magnesiumchloridlösung durchgeführt [STOTTERUD, LYSBAKKEN].

In einer Studie von LYSBAKEN und NOREM aus dem Jahr 2008 werden die Mechanismen und Zusammenhänge des Salztransportes von der Fahrbahn untersucht.

2.6 Schweden

Beim Nationalen Schwedischen Straßen- und Verkehrsforschungsinstitut (VTI) wird an einem Winterdienstmanagement-System (WMMS oder Vintermodel) gearbeitet, in das auch Rechenmodelle mit Regressionsgleichungen eingehen sollen, welche

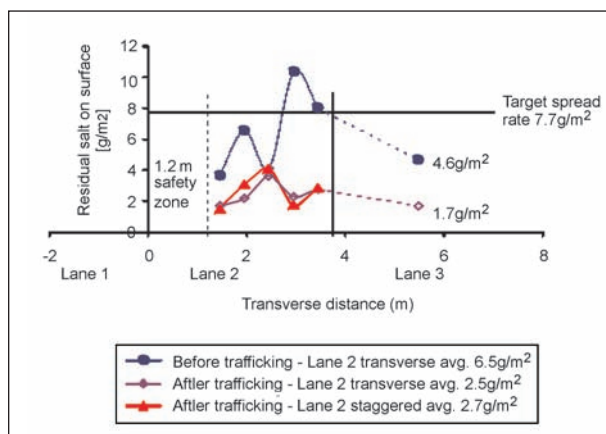


Bild 5: Durchschnittliche Restsalzkonzentration über den Querschnitt des mittleren Fahrstreifens (Lane 2)

Blau: Vor Verkehrsbelastung Messung quer zum Fahrstreifen – durchschnittlich 6,5 g/m²

Violett: Nach Verkehrsbelastung – Messung quer zum Fahrstreifen – durchschnittlich 2,5 g/m²

Rot: Nach Verkehrsbelastung – Messung auf versetzten Messfeldern – durchschnittlich 2,7 g/m²

Quelle: [BURTWELL]

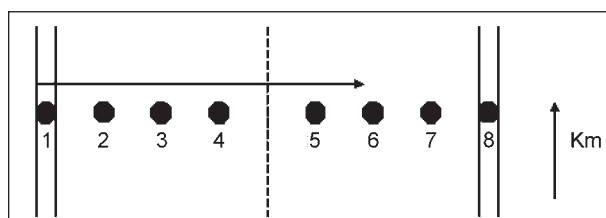


Bild 6: Verteilung der Messpunkte für Restsalzmessungen auf einer 2-streifigen Richtungsfahrbahn

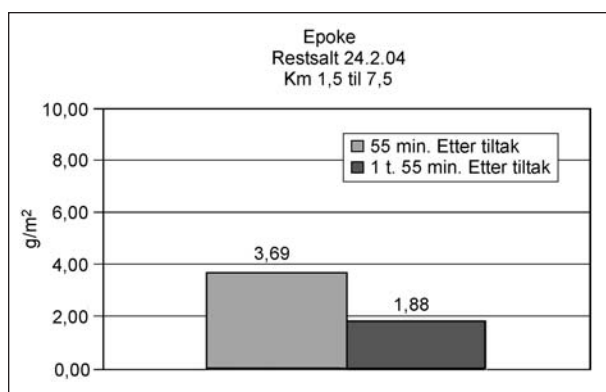


Bild 7: Beispiel einer Restsalzmessung 55 Min. und 1 h 55 Min. nach Streuung mit FS-30-Dosierung 10 g/m² (reiner Salzanteil 7,5 g/m²), Verkehrsbelegung ca. 50 Fz./h

die Abnahme des Restsalzes auf der Fahrbahn beschreiben (BLOMQVIST 2004, WALLMANN 2005).

In diesem Zusammenhang wurden mit Hilfe von SOBO-20-Geräten an zwei Fahrbahnabschnitten über mehrere Tage Restsalzmessungen durchgeführt und daraus ein mathematisches Modell für die Restsalzverringerung entwickelt. Dabei blieb jedoch bisher offen, welchen Einfluss Wetterfaktoren und die unterschiedlichen Arten des Fahrzeugverkehrs auf die Restsalzabnahme haben. Nachteil der Messungen mit dem SOBO-20-Gerät ist die Tatsache, dass die Fahrbahn für jeden Messvorgang gesperrt werden muss und somit nur relativ große Messintervalle von zumeist mehreren Stunden realisiert werden können.

2.7 USA

An der Ohio University wurden durch HUNT, MITCHEL und RICHARDSON im Jahr 2004 umfangreiche Vergleichsmessungen mit Fahrbahnsensoren durchgeführt, um Aussagen über die Genauigkeit von Sensoren zu gewinnen (Bild 8).

Darüber hinaus wurden im Jahr 2005 von HUNT, MITCHEL und RICHARDSON Feldversuche mit NaCl-Lösung zur Feststellung von Gesetzmäßigkeiten der Restsalzabnahme durchgeführt. Dabei wurde auch auf unterschiedlichen Straßenbelägen gearbeitet. Auch in diesem Fall kam das SOBO-20-Gerät zum Einsatz. Dabei wurde bestätigt, dass auf offenporigen Belägen eine schnellere Abnahme der Salzkonzentration zu verzeichnen ist. Aus den Messungen wurden Gleichungen für die Restsalzabnahme in Abhängigkeit von der Zeit und der Verkehrsbelegung abgeleitet. Im Ergebnis der Messungen wurde auch festgestellt, dass weitere Forschungsarbeit notwendig ist, um die empirischen Zusammenhänge zu beschreiben.

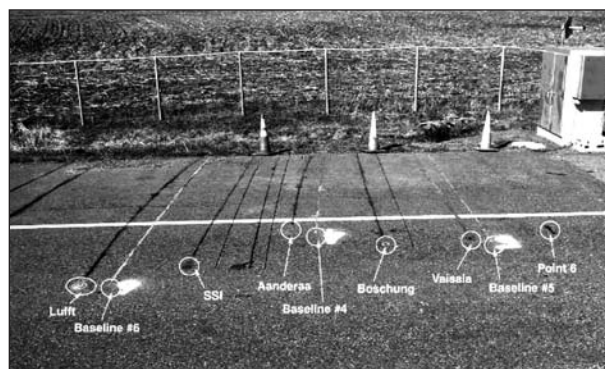


Bild 8: Feldtest in den USA

Detaillierte, aktuelle Informationen zu diesem Thema bieten auch die Veröffentlichungen des in den USA initiierten Aurora-Projekts, an dem Verwaltungen aller interessierten Staaten teilnehmen können.

Umfangreiche Forschungsarbeiten zu Straßenwetter-Informationssystemen (RWIS – Road Weather Information Systems) wurden auch von der Ohio University betrieben. An der Universität Connecticut wurden Versuche mit einem mobilen Sensor für die Salzgehaltmessungen auf Fahrbahnen durchgeführt. Dabei wurde die Funktionsfähigkeit dieses mobilen Systems grundsätzlich nachgewiesen. Der diesbezügliche Forschungsbericht wurde von GARRICK, NIKOLAIDIS und LUO 2002 publiziert. Bis zur Serientauglichkeit des Systems muss jedoch noch intensive Entwicklungsarbeit geleistet werden.

2.8 Zusammenfassung

Die Gesetzmäßigkeiten der Restsalzabnahme werden in mehreren Ländern als interessant angesehen. Neben den für dieses Forschungsthema wichtigen Fragestellungen gibt es weitere Motivationen, um diesbezügliche Untersuchungen durchzuführen. Die Fragestellungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Gibt es Unterschiede bei der Restsalzabnahme zwischen verschiedenen Technologien der Salzausbringung?
- Gibt es Unterschiede zwischen verschiedenen Salzarten bei der Restsalzabnahme?
- Kann Restsalz kontinuierlich mit mobilen Geräten bestimmt werden?

Aus allen Veröffentlichungen geht hervor, dass noch erheblicher Forschungsbedarf besteht, um die Zusammenhänge so zu klären, dass Schlussfolgerungen für die Praxis abgeleitet werden können.

Ein Defizit fast aller bisherigen Untersuchungen besteht insbesondere darin, dass sie mit dem SOBO-20-Gerät durchgeführt wurden, das nur auf gesperrten Fahrbahnen eingesetzt werden kann. Demgemäß ist die Zahl der Messungen relativ gering. Wetterfaktoren wurden nur teilweise berücksichtigt.

Das laufende Forschungsthema ermöglicht eine ungleich höhere zeitliche Messdichte (mindestens 1.000fach) als bei allen bisherigen Untersuchungen. Da die Messungen ununterbrochen bei allen

Witterungssituationen während der gesamten Winterdienstsaison durchgeführt werden, ist auch eine statistisch gesicherte Datenbasis für die Auswirkungen unterschiedlichster Witterung und Verkehrsbelastung zu erwarten.

Dabei werden auch die Möglichkeiten der Sensorkalibrierung genutzt, die erst seit kurzem durch den Sprühkastentest der BAST bestehen (BADELTA 2005).

3 Auswahl der Ausrüstung

3.1 Ausschreibung

Die modifizierte Glättemeldeanlage wurde nach den Grundsätzen der VOL/B beschränkt ausgeschrieben. Die Leistungsbeschreibung basiert auf den speziellen Anforderungen für das Forschungsprojekt und den von der BAST definierten Anforderungen an die Messung der einzelnen Parameter. Die Toleranzgrenzen für die Sensormesswerte wurden aus dem deutschen Entwurf der „Technischen Lieferbedingungen für Glättemeldeanlagen“ (TLGMA) übernommen (BADELTA et al. 2006). Zentrale Bedeutung für die im Forschungsprojekt vorgesehenen Restsalzmessungen hat die Messung der Gefriertemperatur und der Wasserfilmdicke, da aus diesen beiden Messwerten die Taumittelmenge pro Quadratmeter (TMQ) ermittelt wird, die auf der Fahrbahn der so genannten „Restsalzkonzentration“ gleichzusetzen ist.

Als Entscheidungskriterien für die Auftragserteilung wurden in der Ausschreibung der Preis und ein bestandener BAST-Eignungstest für Fahrbahnsensoren festgelegt.

In die Bewertung wurden die Angebote der Firmen Luftt und Vaisala einbezogen.

3.2 Labortests der Sensoren

Die Sensoren beider Hersteller wurden in einer Klimakammer der BAST bei Umgebungstemperaturen von +3 bis -2 °C hinsichtlich der Messgenauigkeit getestet.

Die für das Forschungsprojekt maßgebliche Information über die Taumittelmenge pro Quadratmeter (TMQ in g/m²) wird aus den Messgrößen Wasserfilmdicke (WFD) und Taustoffkonzentration (TSK) errechnet.

$$\text{TMQ (g/m}^2\text{)} = \text{WFD (mm)} \times \text{TSK (g/l)}$$

Zwischen Taustoffkonzentration und Gefrieretemperatur besteht ein taustoffspezifischer Zusammenhang.

Folgende Testmethoden wurden für beide Sensoren angewandt:

- Manueller Auftrag von Wasser oder Sole in definierter Konzentration auf den Sensor. Schrittweise manuelle Reduzierung des Flüssigkeitsfilms durch Abstreichen bis zur geringsten stabilen Filmdicke. Feststellung der Anzeigewerte für Filmdicke und Gefrieretemperatur. Stichprobenartige Überprüfung der gemessenen Filmdicke mit dem Messkamm. Soll-Ist-Vergleich zwischen der aufgetragenen Sole mit definierter Gefrieretemperatur und der gemessenen Gefrieretemperatur. Feststellung der Auswirkungen von äußeren Einflüssen auf das Messergebnis durch Aufstreuen bzw. Auflegen von Salz- und Gesteinskörnern auf die Sensorik.
- Maschineller Auftrag von Wasser oder Sole in definierter Filmdicke und Konzentration. Der Flüssigkeitsauftrag erfolgte in Minutenabständen mit Schritten von 0,01 mm bis zu etwa 0,4 mm. Zu Beginn des Flüssigkeitsauftrages war der Sensor trocken. Während des Flüssigkeitsauftrages wurden die Daten für die angezeigte Filmdicke und die Gefrieretemperatur laufend no-

tiert und aufgezeichnet. Stichprobenartige Überprüfung der gemessenen Filmdicke mit dem Messkamm und durch Wägung der mit Papier aufgesaugten Flüssigkeit. Durchführung eines Soll – Ist Vergleiches zwischen aufgetragener und angezeigter Filmdicke. Soll-Ist-Vergleich zwischen der aufgetragenen Sole mit bekannter Gefrieretemperatur und der gemessenen Gefrieretemperatur.

3.2.1 Sensor Fa. Lufft

Filmdickenmessung

Die gemessenen und angezeigten Filmdicken weichen bei fünf der sechs Messreihen erheblich von den Sollwerten ab.

Der weit überwiegende Teil der Messwerte befindet sich nicht im Toleranzbereich. Die besten Ergebnisse wurden bei einer Wiederholungsprüfung am 26.6.2006 erzielt, bei der darauf verzichtet wurde, die Sensoren mit den bisher verwendeten Tüchern trocken zu wischen. Es gab Hinweise darauf, dass die Tücher Stoffe enthalten, die das Messergebnis verfälschen. Bei der besten Messreihe befanden sich die Messungen im Bereich von 0,05 bis 0,23 mm Filmdicke im Toleranzbereich. Bei allen anderen Messreihen wurden punktuell im Bereich unter 0,1 mm Filmdicke Messergebnisse im Toleranzbereich erzielt (Bild 9).

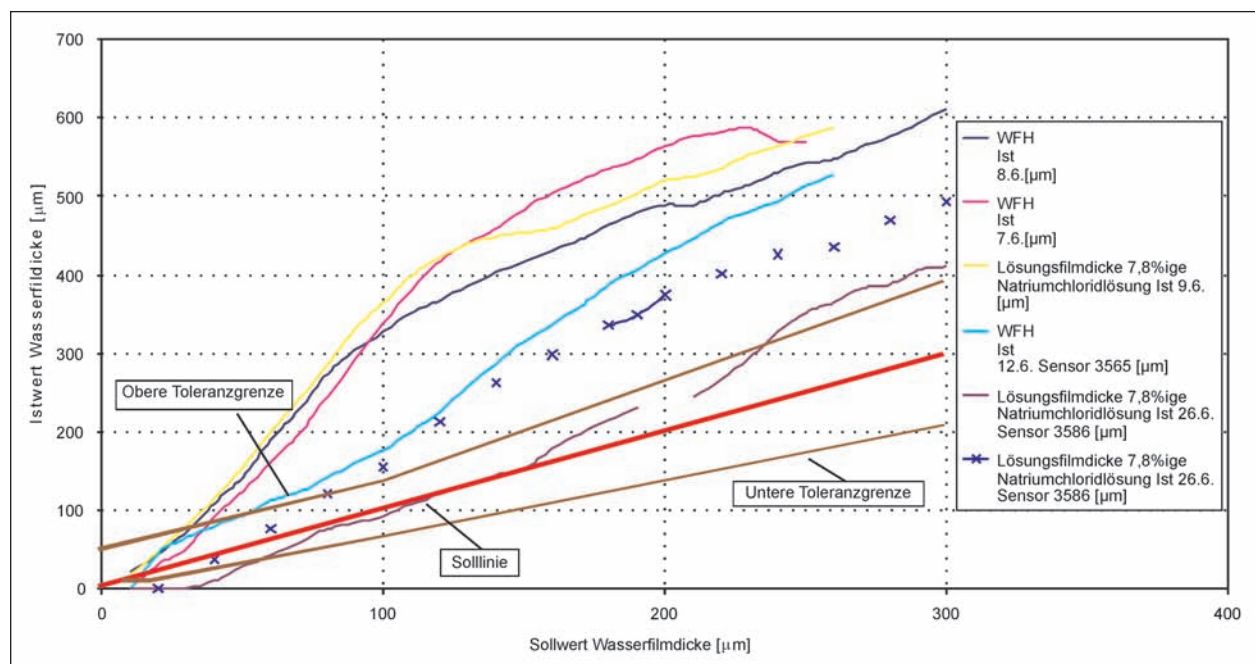


Bild 9: Testergebnisse bei der Messung der Flüssigkeitsfilmdicke (Sensor Fa. Lufft)

Gefriertemperaturmessung

Die Gefriertemperatur wird über die Messung des elektrischen Leitwertes der Taumittellösung bestimmt. Es besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen Taustoffkonzentration und elektrischem Leitwert der Sole. Beim Sensor der Firma Luftt befinden sich die Elektroden für die Leitwertmessung in einer kleinen Mulde an der Oberfläche des Sensors. Der Hersteller geht davon aus, dass die Mulde bei feuchter Fahrbahn ständig komplett mit

Flüssigkeit gefüllt ist. Darüber bestehen jedoch keine gesicherten Erkenntnisse. Bei den Versuchen mit manuellem Auftrag wurden daher Messungen mit unterschiedlichen Füllungsgraden gemacht. Das trifft auch auf den Sprühkastentest zu, da die Mulde dabei nur teilweise gefüllt wird.

In Abhängigkeit vom Füllungsgrad der Mulde wurden stark abweichende Werte festgestellt. Auch bei kompletter Füllung der Mulde wird der Sollwert oft nicht annähernd erreicht (Bilder 10, 11).

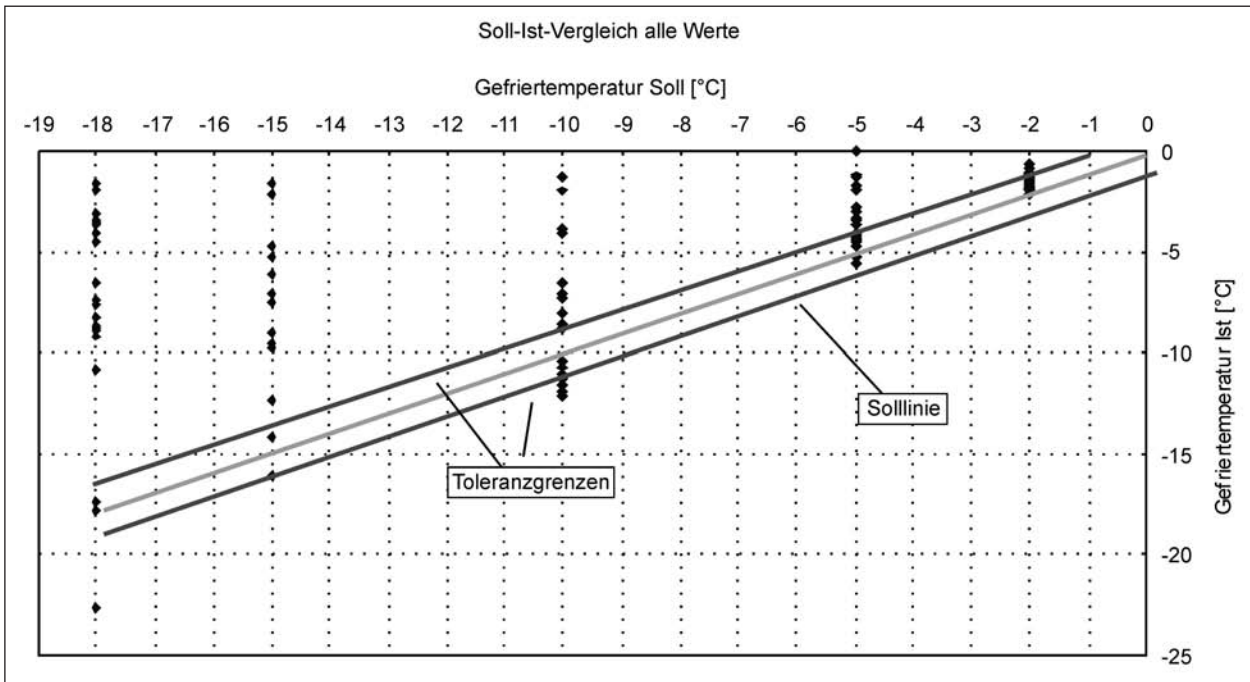


Bild 10: Testergebnisse Gefriertemperaturmessung (Sensor Fa. Luftt)

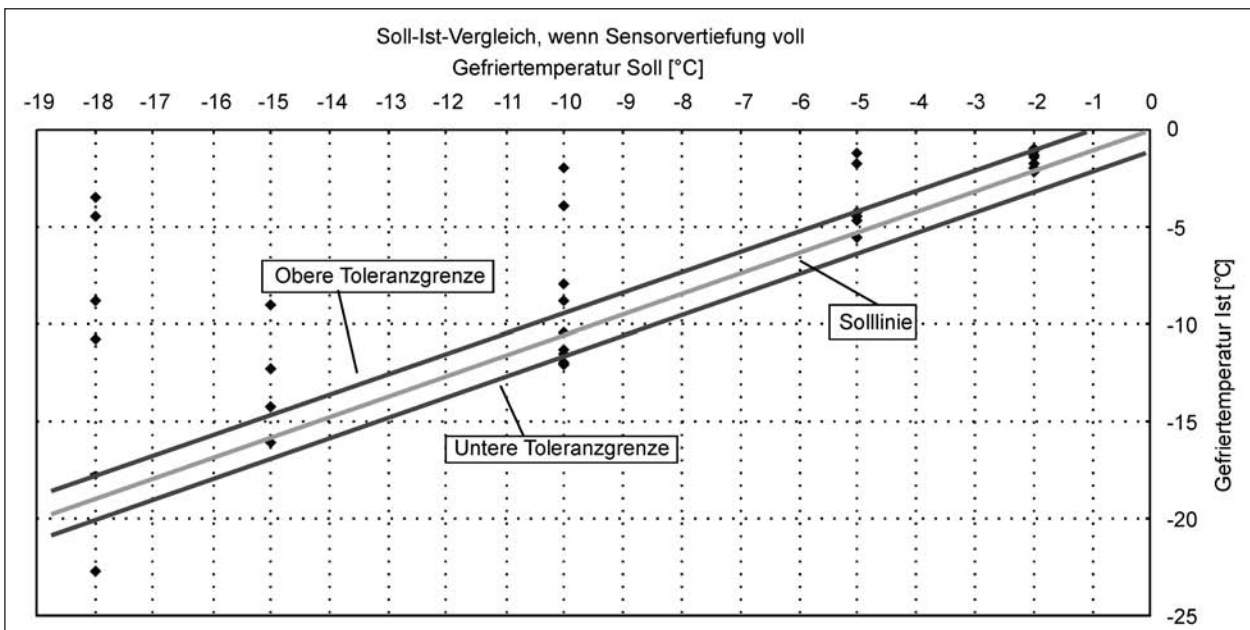


Bild 11: Testergebnisse Gefriertemperaturmessung – nur Werte bei gefüllter Vertiefung (Sensor Fa. Luftt)



Bild 12: Sensor Fa. Luftt beim Labortest



Bild 13: Sensor Fa. Vaisala mit aufgetragenem Salzlösungsfilm beim Labortest

3.2.2 Sensor Fa. Vaisala

Filmdickenmessung

Bei allen sechs Messreihen wurde festgestellt, dass erst ab Filmdicken von etwa 0,1 mm Werte innerhalb des Toleranzbereiches gemessen werden. Im Bereich unterhalb 0,1 mm werden entweder zu geringe oder keine Flüssigkeitsfilmdicken angezeigt. Im Bereich oberhalb 0,1 mm befinden sich die Werte weitgehend innerhalb des Toleranzbereiches (Bild 14).

Gefriertemperaturmessung

Beim Soll-Ist-Vergleich der Werte gibt es erhebliche Abweichungen. Es befinden sich nur 54 der insgesamt 126 Messwerte innerhalb der Toleranzgrenzen. Das entspricht einem Prozentsatz von 43 % (Bild 15).

Taustoff pro Quadratmeter

Die Software der Firma Vaisala enthält einen Anzeigewert mit der internen Daten-Nr. 40 und der Bezeichnung „Amount of chemical“ mit der Einheit g/m^2 , der den Taustoffgehalt pro Quadratmeter (TMQ) angibt. Dieser Wert kann nach bisherigen Erkenntnissen nur mit der unter 2.1 angegebenen Formel errechnet werden. Bei Vaisala wird jedoch auch dann ein Wert ermittelt, wenn die Filmdicke

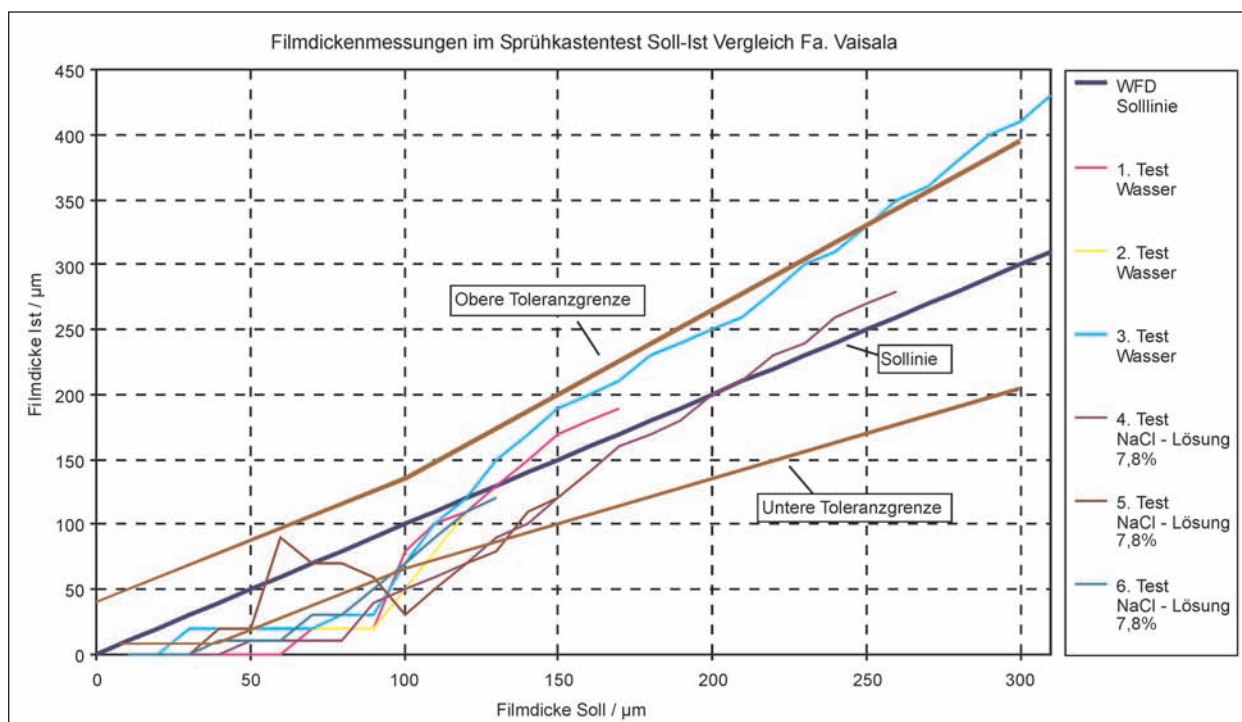


Bild 14: Testergebnisse bei der Messung der Flüssigkeitsfilmdicke (Fa. Vaisala)

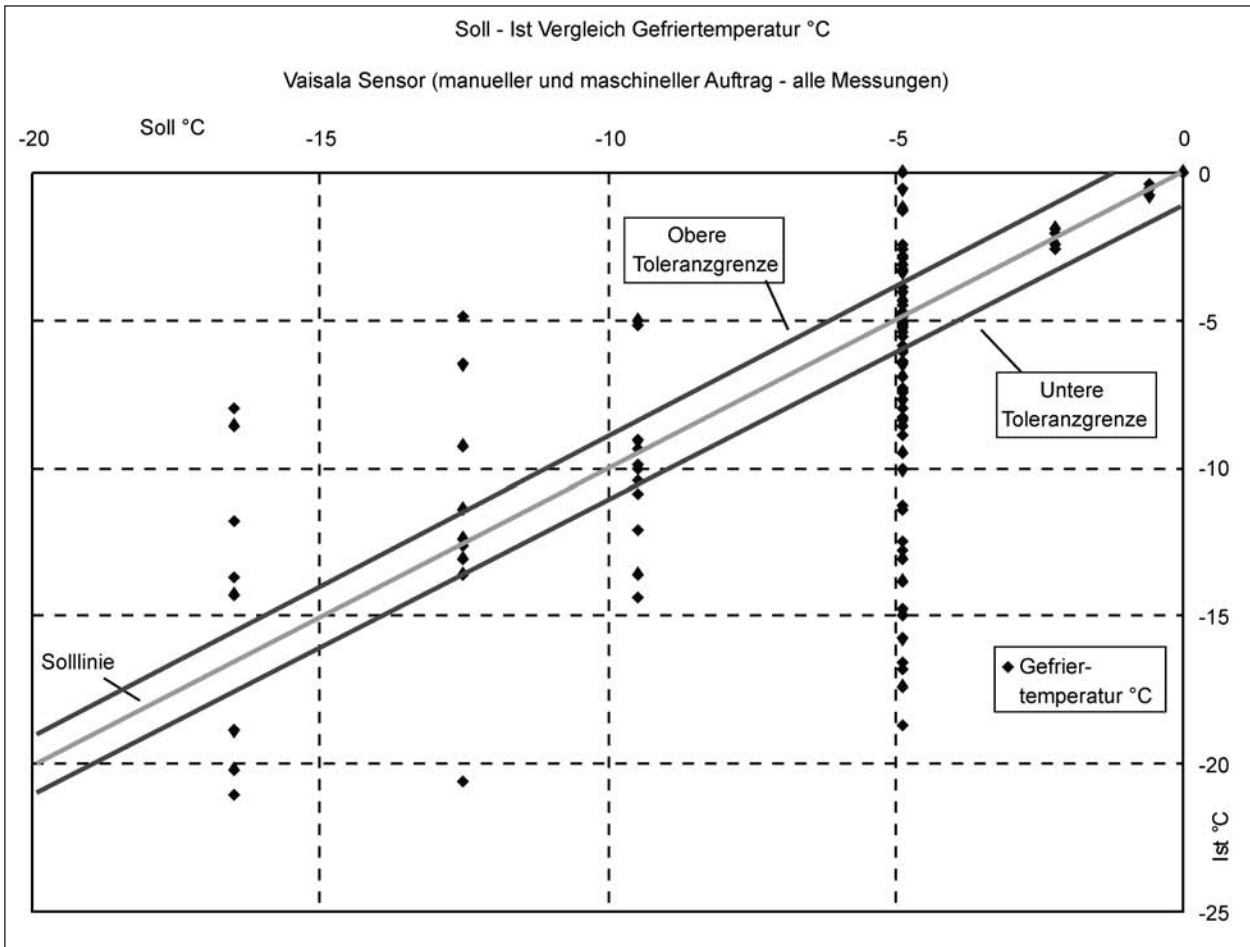


Bild 15: Testergebnisse Gefriertemperaturmessung (Sensor Fa. Vaisala)

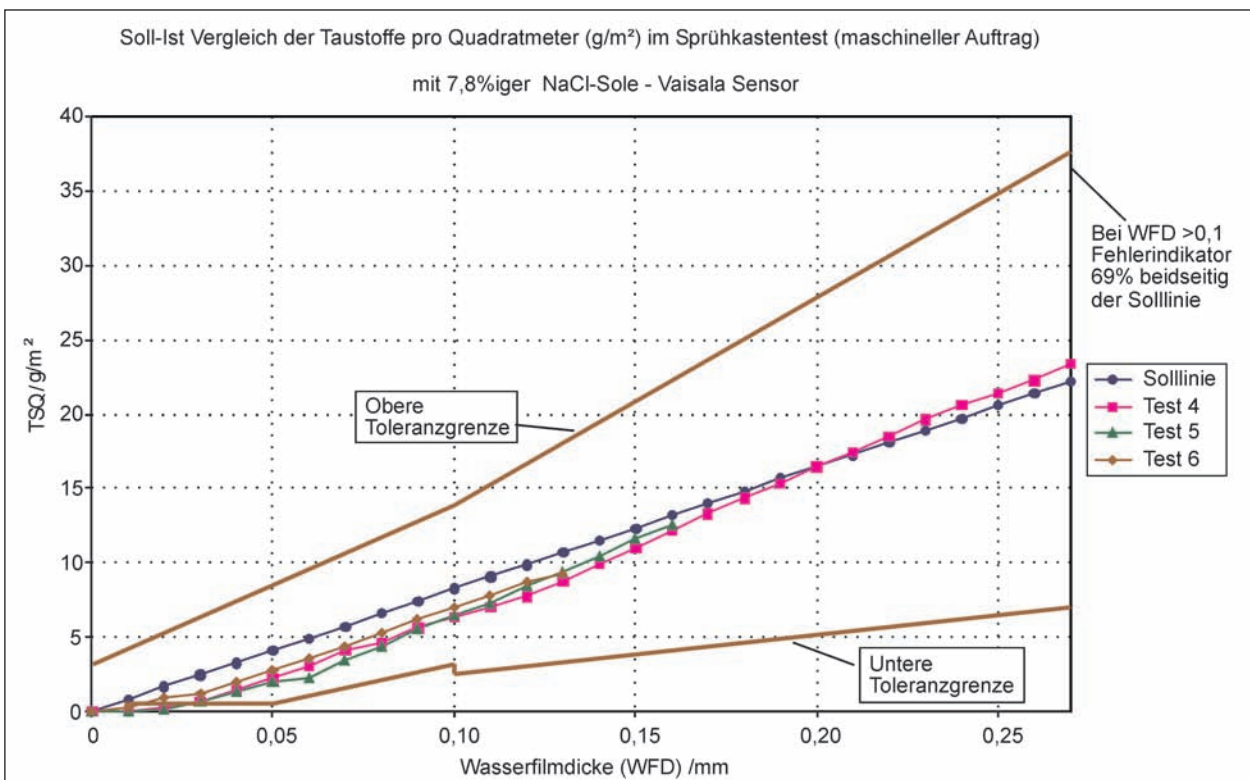


Bild 16: Testergebnis – Messung der Taustoffe pro Quadratmeter (Restsalz)

null ist und damit auch das Produkt null sein müsste. Der Soll-Ist-Wertvergleich bringt fast ausschließlich Ergebnisse, die sehr nahe an der Solllinie liegen. Das heißt, entweder aus zwei teilweise sehr weit vom Soll abweichenden Werten wird ein Wert erzeugt, der deutlich innerhalb der Toleranzgrenzen liegt, oder es werden andere physikalische Zusammenhänge genutzt (Bild 16).

Auf mehrfache Nachfrage wurde von der Firma Vaisala erläutert, dass es durch langjährige Forschungsarbeit gelungen ist, allein über die Messung der „Konduktivität“ (Leitfähigkeit) ohne Kenntnis der Wasserfilmdicke Rückschlüsse auf die Taustoffmenge pro Quadratmeter zu ziehen. Die physikalischen Zusammenhänge wolle man nicht erläutern, da die Nutzung der Erkenntnisse als Betriebsgeheimnis angesehen wird.

Die Toleranzgrenzen für TMQ sind sehr weit gefasst, da sie sich rechnerisch als Produkt der Toleranzgrenzen von WFD und TSK darstellen. Die Versuche im Sprühkasten wurden mit einer konstanten Taustoffkonzentration von 7,8 % NaCl (82,2 g/l) durchgeführt. Aus Gründen der übersichtlicheren Darstellung wurde TSQ in Abhängigkeit von WFD aufgetragen. TSQ ist bei konstanter Lösungskonzentration (TSK) dem Sollwert von WFD direkt proportional. In der Darstellung ist deutlich zu erkennen, dass sich die Werte von allen drei Messungen sehr deutlich in der Nähe der Solllinie befinden. Lediglich im Bereich von Schichtdicken unterhalb von 0,03 mm liegen einzelne Werte außerhalb der Toleranzgrenzen.

3.3 Vergabeentscheidung

Die Sensoren beider Hersteller haben die Anforderungen an die Messgenauigkeit für die Wasserfilmdicke und die Gefriertemperatur nicht durchgängig für alle Messbereiche erfüllt. Bei der Wasserfilmdickenmessung hat der Sensor der Firma Vaisala deutlich bessere Werte geliefert als der Sensor der Firma Lufft.

Bei der Gefriertemperaturmessung sind die Werte des Sensors von Vaisala geringfügig besser als die des Lufft-Sensors.

Die mit dem Vaisala-Sensor ermittelten Werte für die Taumittelmenge pro Quadratmeter weisen dagegen nur geringfügige Abweichungen von den Sollwerten auf. Mit der Qualität dieser Daten kann eine Untersuchung über die Entwicklung der „Rest-

salzkonzentration“ auf Straßen durchgeführt werden, wenn sich die Laborgenauigkeit im Praxiseinsatz bestätigt.

Trotz der erkannten Einschränkungen wird ein Aufbau des Messfeldes mit der Sensortechnik der Firma Vaisala als sinnvoll angesehen. Die im Labortest nachgewiesene Genauigkeit der Bestimmung der Taumittelmenge pro Quadratmeter ist gut geeignet, das angestrebte Forschungsziel zu erreichen.

3.4 Werksabnahme der Sensoren

Die für den Einbau vorgesehenen Sensoren wurden beim Hersteller Vaisala in Finnland einer Werksabnahme unterzogen. Dabei wurde der bereits durchgeführte werksinterne Kalibrierungstest unter Aufsicht wiederholt.

Die Genauigkeit folgender Messwerte wurde kontrolliert:

- Wasserfilmdicke in mm,
- Salzkonzentration in g/l,
- Gefriertemperatur in °C,
- Salzmenge in g/m².

Für die Kontrolle der Wasserfilmdicke wird reines Wasser verwendet. Alle anderen Werte werden mit Salzlösung in einer Konzentration von 20 g/l getestet.

Darüber hinaus sind alle Sensoren beim Hersteller einem Blindtest unterzogen worden. Das heißt, die Sensoren wurden mit Salzlösungen in fünf unterschiedlichen Konzentrationen in wechselnder Reihenfolge beaufschlagt, die dem Sensorhersteller nicht bekannt waren. Mit Ausnahme eines Sensors, der dann ausgetauscht wurde, haben alle Sensoren den Test bestanden, da die Anzeigewerte innerhalb der Toleranzgrenzen lagen.

4 Vorbetrachtungen

4.1 Einflussfaktoren auf die Verweildauer von Tausalzen auf der Fahrbahn

4.1.1 Fahrzeugverkehr

Durch den Fahrzeugverkehr wird gelöstes Salz von den Reifen aus der Rollspur verdrängt und wegge-

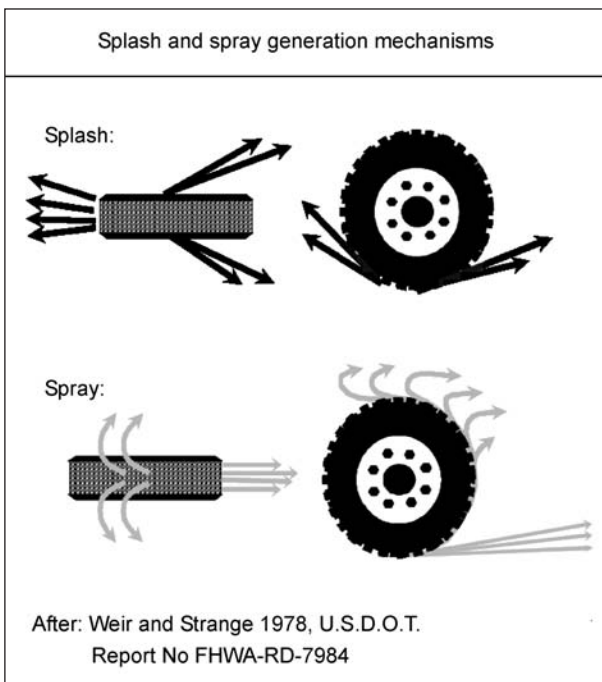


Bild 17: Schematische Darstellung der Flüssigkeitsverdrängung und der Sprühnebelbildung

spritzt. Außerdem entsteht bei Fahrzeugüberfahrten Sprühnebel, durch die Zentrifugalwirkung der Reifen und die Luftverwirbelung hinter dem Fahrzeug. Durch die Verwirbelungen wird auch getrockneter Salzstaub von der Fahrbahn verfrachtet (Bild 17).

Folgende Faktoren sind von Bedeutung:

- Verkehrsstärke,
- Zusammensetzung des Verkehrs (Pkw, Lkw),
- Fahrgeschwindigkeit,
- Windgeschwindigkeit quer zur Straße.

Bei BLOMQUIST wird zur Normierung der Verkehrszahlen ein Pkw-Äquivalent eingeführt. Die Verkehrszahlen größerer Fahrzeuge, von denen stärkere Sprühnebelbildung zu erwarten ist, werden mit Koeffizienten aufgewertet (siehe Tabelle 1).

Bei der Bildung der Koeffizienten wurde davon ausgegangen, dass die Turbulenz mit dem Energieverbrauch korreliert. Der wiederum ist eine Funktion des Luftwiderstandskoeffizienten, der Frontfläche des Fahrzeuges und der Fahrgeschwindigkeit.

Die Verwirbelung von Fahrbahnflüssigkeit ist aber auch von der Breite und Profilierung der Reifen ab-

Fahrzeugart	Koeffizient
Lkw	6
Lkw mit Anhänger/Sattelzug	8

Tab. 1: Koeffizienten zur Berechnung des Pkw-Äquivalentes

hängig. Auch die Art des Spritzschutzes hat Einfluss darauf.

Im Ergebnis von Feldmessungen wurde von BLOMQUIST folgende Formel zur Berechnung der Wassermenge in der Fahrspur aufgestellt:

$$Y = V * e^{-x * (0,005 + 0,001 * w)}$$

Dabei gilt:

Y – Wassermenge in der Radspur, nach Durchfahrt von x Pkw (g/m^2),

V – ursprüngliche Wassermenge in der Fahrbahn (g/m^2),

x – Anzahl der durchgefahrenen Pkw (Pkw-Äquivalent),

WS – Windgeschwindigkeit quer zur Fahrbahn (m/s).

Die Wassermengen in den vier Radspuren haben sich bei den eigenen Messungen als sehr unterschiedlich erwiesen. Sie schienen daher nicht als Ausgangswert weiterer Berechnungen geeignet.

4.1.2 Fahrbahnoberfläche

Die Textur der Fahrbahnoberfläche hat Einfluss auf die Verweildauer, da sich Salzteilchen, soweit es sich nicht um offenporigen Asphalt handelt, in Vertiefungen besser halten können. Einfluss hat auch die Fahrbahnneigung, da sie bei Niederschlägen das Abfließen von Salzlösung begünstigt. Die Deckschicht der Fahrbahn an der Messstelle besteht aus einem Splittmastixasphalt 0/11S. Der Hohlraumgehalt des Bohrkerns betrug 2,5 %.

Der Sensor ist mit einem Mörtel befestigt, der sehr dichte, betonähnliche Strukturen aufweist (Bild 18). Die Sensoroberfläche hat keine fahrbahntypischen Strukturen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Verhältnisse an der Oberfläche der umliegenden Fahrbahn (Wasserfilmdicke, Salzkonzentration) durch die abrollenden Reifen immer wieder reproduziert werden. Von einem Wasserhaltevermögen durch die Oberflächenstruktur kann beim Fahrbahnsensor aber nicht ausgegangen werden. Die Oberfläche wird durch den Einfluss der Fahrzeugüberfahrten poliert.



Bild 18: Struktur der Fahrbahnoberfläche in der Umgebung des Sensors

Die Fahrbahnlängsneigung beträgt 3,5 %. Bei mittleren und starken Niederschlägen ist ein Abfließen von Salzlösung unvermeidbar. Gleichzeitig fließt jedoch auch Salzlösung zu. Nach Herstellervorschrift muss der Straßensensor so installiert werden, dass die Sensoroberfläche zwischen 1 und 3 mm unterhalb der umgebenden Oberfläche liegt. Im Anwen-derhandbuch heißt es dazu: „Hierdurch kann ausreichend Feuchtigkeit angesammelt werden, um die für die Straße benötigte Salzlösungskonzentration zu bestimmen. Andererseits sollte der Sensor nicht so tief installiert werden, dass er übermäßig Wasser aus der Umgebung auffängt. Der Sensor sollte immer exakt horizontal installiert werden.“ Die Empfehlung, den Sensor 1 bis 3 mm vertieft zu installieren, erscheint etwas fragwürdig, da die Salzmenge unter Verwendung des Messwertes für die Flüssigkeitsfilmdicke kalkuliert wird, die unter diesen Bedingungen nicht repräsentativ sein kann. Für die Versuchsanlage wurde ein Maß von 0,50 mm gewählt. Die absolut horizontale Einbaulage konnte wegen Längs- und Querneigung der Fahrbahn nicht gewährleistet werden.

Es scheint überhaupt fraglich, ob das eine unter Praxisbedingungen realisierbare Forderung ist, da zumindest eine Querneigung der Fahrbahnoberfläche für die Entwässerung notwendig ist.

4.1.3 Salzart und -konsistenz

Die üblicherweise im Winterdienst verwendeten Salze weisen Unterschiede in den chemisch-physikalischen Eigenschaften auf. Insbesondere die hygroskopischen Eigenschaften und die Körnung haben Einfluss auf die Verweildauer von Salzen auf der Fahrbahn.

Lagerort Herkunft	Maschenweite Prüfsieb/mm Durchgang durch Prüfsieb/%			
	0,16	0,8	1,6	3,15
AM Hellerau	2,9	8,1	24,0	80,0
AM Weißenberg	3,4	18,8	37,3	99,5
Steinsalz Heilbronn	1,9	45,7	98,4	100

Tab. 2: Kornverteilung der eingesetzten Salze

Regulär wird im Bereich der Messstelle FS 30 eingesetzt. Als Trockensalzkomponente wird NaCl verwendet. Als Befeuchtungsmedium wurde in der ersten Saison (2006/2007) $MgCl_2$ -Lösung eingesetzt. In der zweiten Saison (2007/2008) arbeitete eine der beiden beteiligten Autobahnmeistereien nur noch mit NaCl-Lösung.

NaCl nimmt bei einer relativen Luftfeuchte von > 75 % Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf. Feuchtigkeitsaufnahme aus der Umgebungsluft ist bei $MgCl_2$ schon ab relativen Luftfeuchten > 33 % zu erwarten. Das heißt, $MgCl_2$ nimmt im Winter fast immer Feuchtigkeit aus der Luft auf.

Die verwendeten Salze entsprachen hinsichtlich der Korngrößenverteilung den Vorgaben der TL-Streu (siehe Tabelle 2).

In zwei Versuchen wurde auch sehr feines Siedesalz aus Bad Reichenhall eingesetzt. Bei diesem Salz waren 99,3 % der Körnung kleiner 0,8 mm.

4.1.4 Meteorologische Faktoren

Als meteorologische Faktoren haben Niederschlagsmenge und -art, Windrichtung und -stärke, Sonneneinstrahlung, Temperaturen und die relative Luftfeuchtigkeit Einfluss auf die Verweildauer von Tausalzen.

Niederschläge führen zur Verminderung der Taustoffkonzentration auf der Fahrbahn und bewirken außerdem, dass sich ein Flüssigkeitsfilm auf der Fahrbahn befindet, der durch die vom Fahrzeugverkehr verursachte Verwirbelung und Sprühnebelbildung relativ schnell von der Fahrbahn entfernt wird. Verdünnungseffekte lassen sich bei modellhaften Annahmen berechnen.

Bei der Berechnung der Verdünnung wird davon ausgegangen, dass über den Berechnungszeitraum eine konstante Niederschlagsmenge fällt, sich eine konstante Wasserfilmdicke einstellt und damit die gleiche Menge Flüssigkeit abfließt wie durch den Niederschlag hinzukommt.

Dabei gilt folgende Formel:

$$SM = SM_{Anf/WD} * e^{-(N/WD) * t}$$

mit

SM – Salzmenge im Flüssigkeitsfilm (g/m²),

SM_{Anf} – Salzmenge am Anfang des Verdünnungsvorganges (g/m²),

WD – Flüssigkeitsfilmdicke (mm),

N – Niederschlagsmenge (mm/h),

t – Zeit seit Beginn des Niederschlages (min).

Abgeleitet aus dieser Formel kann die relative Abnahme der Salzmenge durch Verdünnung berechnet werden. Das Ergebnis ist in Bild 19 dargestellt

Windstärke und Windrichtung haben Einfluss darauf, in welchem Maße aufgewirbelte Salzlösung oder Salzstaub von der Fahrbahn transportiert werden.

Sonneneinstrahlung beeinflusst die Abtrocknungsgeschwindigkeit und damit die Rekristallisation der Salzanteile.

Die Umgebungstemperatur und die Fahrbahntemperatur sind für die Art der Niederschläge auf der

Fahrbahn von Bedeutung, die einen Einfluss auf die Sprühnebelbildung und die Wirksamkeit von Verwirbelungen hat.

Die relative Luftfeuchte hat Einfluss auf die Abtrocknungsgeschwindigkeit der Fahrbahn und somit auf die Bindung des Taustoffes an die Fahrbahn.

4.2 Einfluss der Flüssigkeitsmengen auf der Fahrbahn

4.2.1 Typisierung der Flüssigkeitsmengen unter Winterdienstaspekten

Die für die Glättebekämpfung erforderlichen Taumittelmengen sind im Wesentlichen von zwei Faktoren abhängig:

1. Fahrbahnoberflächentemperatur,
2. Flüssigkeitsmenge auf der Fahrbahn (Wasserfilmdicke, Schichtdicke von Vereisungen oder Reif, Schneemenge).

Bezüglich der Flüssigkeitsmenge auf der Fahrbahn gibt es zwei Zustände, die sich ganz grundsätzlich unterscheiden.

Das sind zum einen vorhandene oder vorhersehbare Glättezustände, die bei sehr geringen Flüssigkeitsmengen entstehen (Reifglätte, überfrorene

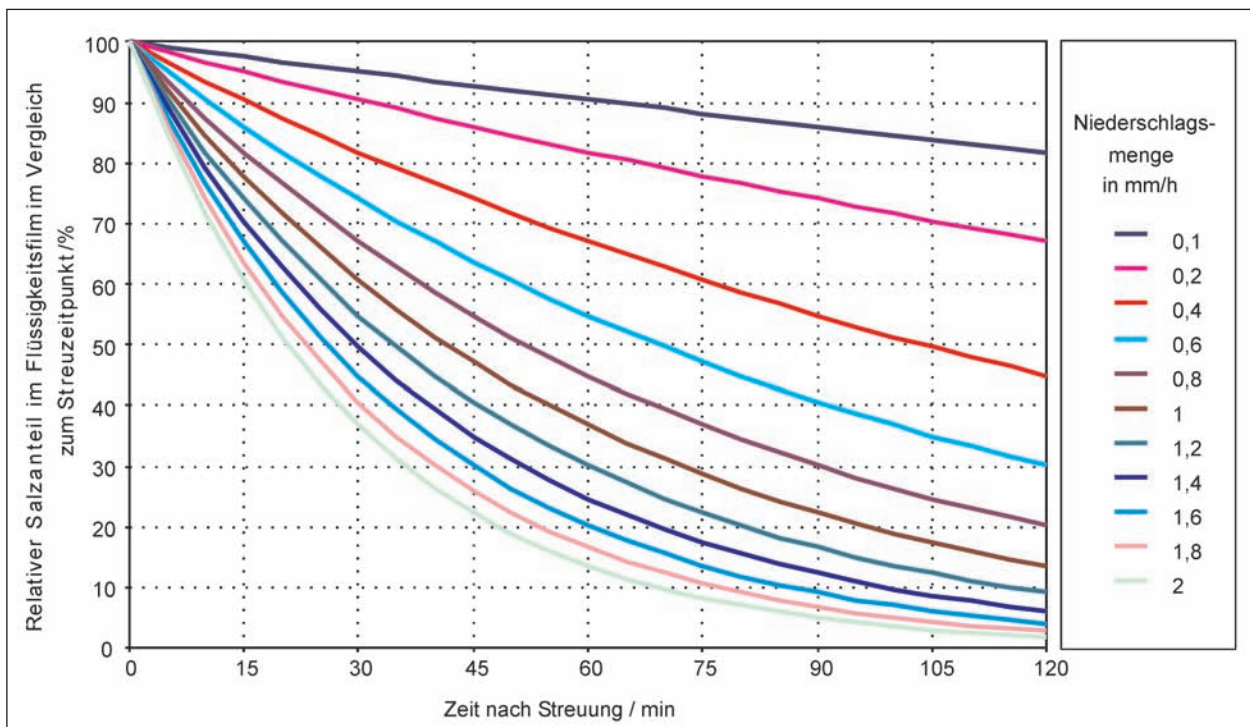


Bild 19: Verdünnung der Salzlösung auf der Fahrbahnoberfläche in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge – Wasserfilmdicke 1 mm

Nässe, geringfügiger Niederschlag bei Fahrbahntemperaturen $< 0\text{ °C}$). Gefährliche Glättezustände entstehen nach BADEL 2005 und NICOLAS 1996 bereits bei überfrorenen Wasserfilmdicken ab 0,02 mm.

Bei MÖLLER wird eine modifizierte Formel eingeführt, die von KNOLLHOFF entwickelt wurde. Mit dieser Formel können die Zuwachsraten bei der Reifbildung in Abhängigkeit von meteorologischen und straßenbezogenen Randbedingungen bestimmt werden.

Die Formel lautet:

$$SR = 2,16 \times 10^{-6} \times WS \times D/TA$$

mit

$$D = 611 \times e^{(22,2 - 6061/TD) - (22,2 - 6061/TS)}$$

Es gelten:

SR – Resublimationsrate (Zuwachsgeschwindigkeit von gefrorenem Wasser oder Raureif – $\text{kg/m}^2/\text{s}$). 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 2 m Höhe und dem Sättigungsdampfdruck auf der Straßenoberfläche,

T – Lufttemperatur in 2 m Höhe (K),

TD – Taupunkttemperatur der Luft (K),

TS – Temperatur der Straßenoberfläche (K).

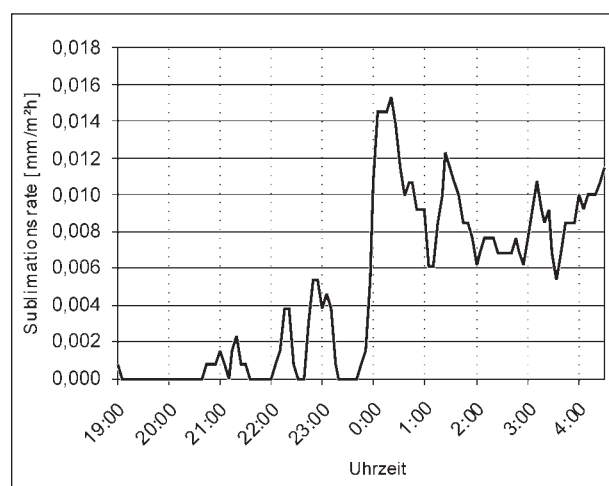


Bild 20: Berechnete Resublimationsrate (Beispiel)

Die Berechnungsmethode kann auch für die Bestimmung von Kondensationsmengen angewandt werden. Unter Verwendung von Daten des Messfeldes wurden für die Nacht vom 13.01.2008 zum 14.01.2008, in der es zur Reifbildung kam, die in Bild 20 dargestellten Werte errechnet. Der dort erreichte Maximalwert betrug 0,015 $\text{mm/m}^2\text{h}$.

Nach NIEBRÜGGE betragen die Flüssigkeitsabtragungen bei Reifbildung im Mittel 20 bis 30 $\text{g/m}^2\text{h}$. Das entspricht Flüssigkeitsfilmdicken von 0,02 bis 0,03 $\text{mm/m}^2\text{h}$.

Zum anderen entsteht gefährliche Glätte durch Schneeniederschläge und gefrierenden Regen mit Flüssigkeitsmengen, die sehr variabel sind, aber eher im Bereich von $> 0,5\text{ mm}$ bis 10 $\text{mm/m}^2\text{h}$ liegen.

Für die Taumitteldosierung unter Einsatzbedingungen ist es von entscheidender Bedeutung welche Flüssigkeitsmengen auf der Fahrbahn vorhanden sind bzw. in den Folgestunden sein werden.

4.2.2 Wirkung des Salzeinsatzes bei geringen Flüssigkeitsfilmdicken

Bei Glättesituationen mit geringen Wasserfilmdicken wird, soweit keine weiteren Niederschläge zu erwarten sind, mit geringen Streudichten von 5 bis 10 g/m^2 gearbeitet. Als FS 30 ausgebracht bedeutet das 3,5 bis 7 g/m^2 Trockensalz und 1,5 bis 3 g/m^2 Sole.

In dieser Situation mit geringen Wasserfilmdicken, bei denen auch kein wesentlicher Zuwachs zu erwarten ist, stellt sich die Frage, welche Streustoffmenge benötigt wird, um Glätte zu verhindern oder zu beseitigen. Welche Gefriertemperaturen mit geringen Streudichten bei verschiedenen Wasserfilmdicken erzielt werden können, ist in Tabelle 3 dargestellt.

Der Tabelle ist zu entnehmen, welche Solekonzentration auf der Straße entsteht, wenn sich das ausgestreute Trockensalz unter idealen Bedingungen in der bereits auf der Straße befindlichen Feuchtigkeit auflöst. Bei dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, dass sich kein Restsalz auf der Fahrbahn befindet. Bei einer Streudichte von 10 g/m^2 und einer Wasserfilmdicke von 0,02 g/m^2 steht mehr Salz zur Verfügung als gelöst werden kann. Das bedeutet, dass ein Teil des ausgestreuten Salzes in kristalliner Form verbleibt und damit wahrscheinlich besonders schnell von der Fahrbahn befördert wird.

Streudichte FS30	Trockensalzmenge	Wasserfilmdicke	Gewicht des Wasserfilms	Wasser in Sole	Wasser Gesamt	Salz in Sole	Salz Gesamt	Konzentration	Gefrier-temperatur
g/m ²	g/m ²	mm	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²	%	°C
5	3,5	0,02	20,0	1,20	21,2	0,30	3,80	15,2	-11,7
5	3,5	0,04	40,0	1,20	41,2	0,30	3,80	8,4	-5,6
5	3,5	0,06	60,0	1,20	61,2	0,30	3,80	5,8	-3,7
5	3,5	0,08	80,0	1,20	81,2	0,30	3,80	4,5	-2,8
10	7	0,02	20,0	2,40	22,4	0,60	7,60	25,3	-26,2
10	7	0,04	40,0	2,40	42,4	0,60	7,60	15,2	-11,7
10	7	0,06	60,0	2,40	62,4	0,60	7,60	10,9	-7,5
10	7	0,08	80,0	2,40	82,4	0,60	7,60	8,4	-5,6

Tab. 3: Streudichten und Gefriertemperaturen bei geringen Wasserfilmdicken auf der Fahrbahn

Die gleiche Situation wird dann eintreten, wenn sich noch Restsalz auf der Fahrbahn befindet und sich in der Gesamtbilanz mehr Salz auf der Fahrbahn befindet als durch die vorhandene Flüssigkeit gelöst werden kann.

Darüber hinaus ist noch ungeklärt, ob sich in der dünnen Flüssigkeitsschicht auf der Fahrbahn eine Salzlösungskonzentration entsprechend den theoretischen Berechnungen überhaupt einstellen kann.

5 Untersuchungsmethodik

5.1 Anlagenkonfiguration

Für die Untersuchungen wurde ein Messfeld mit Sensoren von Glättemeldeanlagen ortsfest aufgebaut, das aus folgenden Komponenten besteht:

- 12 Fahrbahnsonden – Vaisala DRS511 AB2 (passive Sensoren) mit den Funktionen:
 - Messung/Berechnung der Gefriertemperaturen,
 - Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur,
 - Erfassung der Restsalzmenge [g/m²],
 - Messung der Wasserfilmdicke,
 - Erfassung des Fahrbahnzustandes,
- Sensorkombination zur Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte – Vaisala HMP45D,
- Wind Set zur Messung von Windgeschwindigkeit und -richtung – Vaisala WA15 D7A,

- Sonde zur Messung der Bodentemperatur – Vaisala DTS12G3.

Das Messfeld wurde unmittelbar neben einer bestehenden Glättemeldeanlage eingerichtet, die aus folgenden Komponenten besteht:

- Sensorkombination Boschung BOSO + ARCTIS (Active-Active Management-AAM) – aktive Sensoren mit den Funktionen:
 - Messung/Berechnung der Gefriertemperatur,
 - Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur,
 - Erfassung des Belagszustandes,
 - Messung der Tiefentemperatur,
- Wettersensoren mit den Funktionen:
 - Messung der Lufttemperatur,
 - Messung der Luftfeuchtigkeit,
 - Berechnung der Taupunkttemperatur,
 - Messung der Niederschlagsart,
 - Messung der Niederschlagsintensität.

Die Messwerte dieser Glättemeldeanlage standen als Vergleichswerte zur Verfügung.

5.2 Standortauswahl

Grundsätzlich standen alle 18 Standorte von Glättemeldeanlagen an sächsischen Autobahnen zur Verfügung.

Bei der Auswahl des geeigneten Standortes waren folgende Kriterien zu berücksichtigen:



Bild 21: Lage des Messfeldes an der A 4



Bild 22: Topografie am Messfeld

- topografische Lage, die häufige Winterereignisse erwarten lässt,
- definierte Verhältnisse der Streustoffausbringung (Anlage nicht im Bereich von Spurverzweigungen),
- keine Deckenerneuerungen innerhalb drei Jahren nach Sensorbeinbau (Verlust der Sensoren),
- hinreichend ebene Fahrbahn ohne vertiefte Rollspuren,
- ausreichende Energiezuführung,
- nahe liegende Verkehrszählstelle.

Unter Berücksichtigung dieser Auswahlkriterien kam nur noch der Standort an der Autobahn A 4 – Richtungsfahrbahn Görlitz, Kilometer 29,8 (Burkauer Berg) infrage (Bilder 21, 22).

5.3 Anordnung der Fahrbahnsensoren

Zur Feststellung der Restsalzabnahme über den Fahrbahnquerschnitt werden Sensoren an den markanten Punkten des Querschnittes positioniert.

Als markante Punkte sind anzusehen:

- die Rollspuren,
- die Mitte der Fahrstreifen,
- die Ränder der Fahrstreifen.

Zur Erhöhung der Sicherheit der Messergebnisse werden die Sensoren teilweise doppelt eingesetzt. Die Anordnung der Sensoren erfolgt in drei Querschnittsebenen, damit die Zahl der Kabel pro Querschnittsebene begrenzt ist (Bild 23).

Zusätzlich stehen die Messwerte der aktiven Sensoren des linken Fahrstreifens zur Verfügung.

6 Einbau der Fahrbahnsensoren

Unmittelbar nach einer Deckenerneuerungsmaßnahme wurden die Fahrbahnsensoren am 30. August 2006 und 1. September 2006 auf der A 4, Richtungsfahrbahn Görlitz, Kilometer 29,8 eingebaut. Da wegen der frischen Fahrbahndecke mit Setzungserscheinungen zu rechnen war, wurden die Sensoren 1 mm unter Fahrbahnniveau eingebaut. Der Verguss der Sensoren erfolgte mit Epoxidharz (Bilder 24, 25, 26). Außerhalb der Fahrbahn werden die Kabel in Schutzrohren geführt und allseitig vor Nagetierverbiss abgeschirmt. Für den Einbau der Sensoren wurden insgesamt ca. 16 Arbeitsstunden benötigt.

Im Zuge der Inbetriebnahme wurde ein Teil der Sensoren durch die BASt mit der Sprühkastenmethode überprüft. Alle Sensoren wurden durch definierten Salzlösungsauftrag mit der Pipette getestet. Das gesamte Testprogramm wurde über mehrere Tage durchgeführt. Ein gleichmäßiger Flüssigkeitsauftrag wie in den Laborversuchen war nicht möglich. Das ist durch den der Fahrbahnneigung folgenden Einbau der Sensoren und durch die Adhäsionswirkung der Vergussmasse bedingt. Die Sensoren zeigten im Wesentlichen Messwerte im Rahmen der vorgegebenen Toleranzen. Die Genauigkeit der Labormessungen wurde jedoch nicht erreicht.

Ab dem 6. Dezember 2006 war die Anlage voll funktionsfähig und die Daten wurden übertragen.

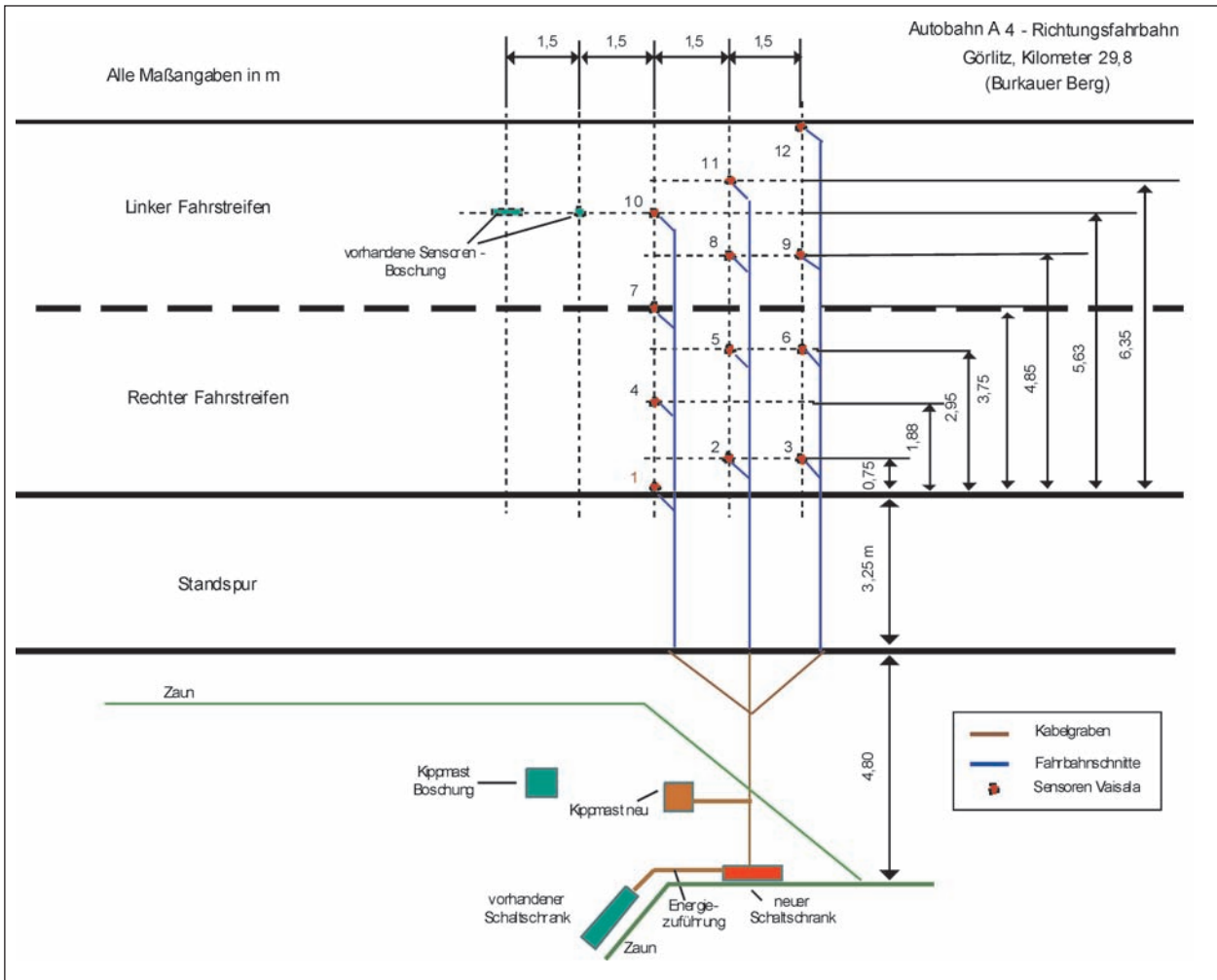


Bild 23: Anordnung der Sensoren



Bild 24: Sensor Fa. Vaisala – Einbauvorgang



Bild 25: Sensor Fa. Vaisala – Einbauzustand

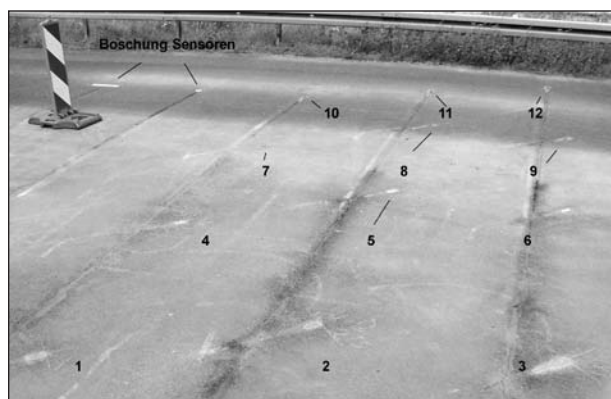


Bild 26: Sensorfeld auf der A 4, km 29,8 mit 12 Vaisala-Fahrbahnsensoren am 01.09.2006

7 Umfang der Datenerhebung

7.1 Messwerte der eigenen Messstelle

Die eingesetzten passiven Fahrbahnsonden können alle Werte im Minutenabstand messen. Erste Messungen ließen eine Kontinuität der Messwerte erkennen. Insofern erschien es als ausreichend, die Messungen im 5-Minuten-Abstand durchzuführen. Mit jeder Sonde wurden pro Messung die in Tabelle 4 dargestellten Daten ermittelt bzw. berechnet.

Bei dem Messturnus von 5 Minuten für alle 12 Sensoren wurden täglich 17.280 Daten ermittelt. Hinzu kommen ca. 4.000 meteorologische Messwerte und Verkehrsdaten.

Die von der Messstation pro Sonde und Messung als einzelne Datei verschickten Messwerte werden mit einer speziell für diese Anlage entwickelten Software ausgelesen, sortiert und anschließend ins Excel-Format transformiert. Um Übersicht und Lesbarkeit der grafischen Darstellungen zu gewährleisten werden maximal ca. 12 Stunden Messzeit zusammenhängend dargestellt. Beginn und Ende der Darstellung werden vorzugsweise ereignisbezogen gewählt. Das heißt, dass grafische Darstellungen des Verlaufes der relevanten Daten immer unmittelbar nach einem Streuvorgang oder nach der Restsalzaktivierung durch Niederschläge begonnen werden.

Zum Umfang der Messstelle gehören weitere Sensoren zur Messung von meteorologischen Daten. Dazu gehören:

- Feuchte- und Temperatursonde HMP45D,
- Sensor für Windgeschwindigkeit und -richtung.

Bezeichnung	Kurzbez.	Datennr. Vaisala	Einheit
Fahrbahnoberflächentemperatur	FT	30/45	°C
Leitfähigkeit	CS	32/47	-
Oberflächensignal	SS	33/48	-
Frequenz	BI	34/49	Hz
Gefrierpunkt	TR	35/50	°C
Oberflächenstatus	ST	36/51	-
Konzentration	KO	39/54	g/l
Streustoffmenge	SM	40/55	g/m ²
Gefriertemperatur	GT	41/56	°C
Wasserfilmdicke	WD	42/57	mm

Tab. 4: Datenelemente der Sensormessung

Bezeichnung	Kurzbez.	Datennr. Vaisala	Einheit
Lufttemperatur	T1	1	°C
Rel. Luftfeuchtigkeit	RH1	2	%
Taupunkt	TD1	3	°C
Windgeschwindigkeit	WS1	5	m/s
Windrichtung	WD1	6	Grad
Windgeschwindigkeit max. (10 Min.)		26	m/s
Windrichtung max. (10 Min.)		27	Grad

Tab. 5: Datenelemente der meteorologischen Messungen

Damit werden die in Tabelle 5 dargestellten Daten ermittelt.

Neben den Messungen wurden auch visuelle Beobachtungen durchgeführt, die fotografisch dokumentiert sind.

7.2 Daten der GMA des Autobahn-amtes

Als Ergänzung und zum Vergleich werden auch Daten der benachbarten GMA (Boschung) des Autobahn-amtes Sachsen in die Auswertung einbezogen. Die Daten folgender Sensoren stehen zur Verfügung:

- Niederschlag (Typ, Intensität),
- relative Luftfeuchtigkeit,
- Lufttemperatur,
- aktive Bodensonde Arctis,
- aktive Bodensonde Boso.

7.3 Aufzeichnungen des Fahrpersonals

Mit dem Fahrpersonal wurden Einweisungen und Informationsveranstaltungen durchgeführt. Dabei wurden die Formulare für die Handaufzeichnungen erläutert und Informationen über den Zweck des Forschungsthemas übermittelt. Folgende Daten werden für jede Streuung aufgezeichnet:

- Fahrzeugkennzeichen,
- Datum,
- Uhrzeit,
- Streubreite,
- Streudichte,
- Feuchtsalzeinsatz,
- Pflugeinsatz,
- Lage des Streubildes auf den Fahrstreifen.

7.4 Aufzeichnungen zur Verkehrsstärke

Die Verkehrsdaten stehen von einer etwa 1 km entfernten Zählstelle zur Verfügung. Die Verkehrssituation wird so eingeschätzt, dass es an der Messstelle keine wesentlichen Abweichungen der Verkehrsstärke in der Verteilung auf die Fahrstreifen im Vergleich zur Zählstelle gibt. Gezählt werden Lkw und Pkw Verkehr differenziert nach Benutzung des rechten oder linken Fahrstreifens.

8 Messwertvergleich zwischen Sensoren gleicher Einbaulage

8.1 Allgemeines

Der Vergleich der Werte von Sensoren gleicher Einbaulage bietet eine zusätzliche Möglichkeit zur Feststellung der Messgenauigkeit. Dabei wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass die gleichen Werte angezeigt werden müssten. Im Einzelfall besteht jedoch die Möglichkeit, dass die Sensoren trotz gleicher Einbaulage unterschiedlich beaufschlagt sind. Das kann zum Beispiel einen auf dem Sensor befindlichen Fremdkörper oder eine Salzanhäufung verursacht sein.

Von den insgesamt 12 Fahrbahnsensoren am Messfeld „Burkauer Berg“ wurden 6 Sensoren

paarweise im gleichen Fahrbahnquerschnitt angeordnet (Bild 10). Der Abstand zwischen den Sensoren beträgt jeweils 1,50 m. Ein weiterer Vergleich ist mit den Daten der Sensoren der benachbarten GMA möglich. Die Fahrbahnsensoren dieser Anlage befinden sich in der Mitte des linken Fahrstreifens. Der Vergleichssensor des Messfeldes ist ebenfalls in 1,50 m Entfernung davon angeordnet (Bild 23).

8.2 Vergleich von Sensoren gleicher Bauart

Die Genauigkeit der Bestimmung folgender Daten ist für die weitere Bearbeitung von besonderem Interesse:

- Streustoffmenge (gemessen wird das auf der Fahrbahn gelöste Salz) in g/m^2 ,
- Gefriertemperatur in $^{\circ}\text{C}$,
- Konzentration in g/l .

Zur Fehleranalyse wurden mindestens 1.000 Messwertpaare eines Monats in Vergleichsdiagrammen gegenübergestellt (Bilder 27 bis 31). Die Abweichung von der Idealline ($y = x$) verdeutlicht Tendenz und Größenordnung der Abweichung der Messwerte zweier Sensoren. Damit kann die Größenordnung der Messfehler grob abgeschätzt werden. Im Mittelpunkt der Fehlerbetrachtung steht die angezeigte Streustoffmenge.

Nach dem gleichen Modus wurde auch untersucht, ob sich die Abweichungen der Messwerte innerhalb des Versuchszeitraumes von Dezember 2006 bis zum Januar 2008 verändert haben.

Die Salzmenge in g/m^2 kann nicht direkt gemessen werden. In den angezeigten Wert gehen die Messwerte für die Wasserfilmdicke und die elektrische Leitfähigkeit ein. Voraussetzung für die Ermittlung der Werte ist grundsätzlich ein stabiler Flüssigkeitsfilm über dem Sensor. Die eingesetzten Sensoren ermitteln allerdings auch dann eine Salzmenge, wenn kein stabiler Flüssigkeitsfilm vorhanden ist. Das Wirkprinzip wurde vom Hersteller der Sensoren nicht offengelegt. Es ist möglich, dass in diesen Zeiträumen Werte extrapoliert werden und/oder die Leitfähigkeit der dünnen, ausgetrockneten Salzkruste in die Berechnung einbezogen wird

Die Auswertung der Wertepaare nahe liegender Sensoren zeigt, dass Abweichungen der Messwer-

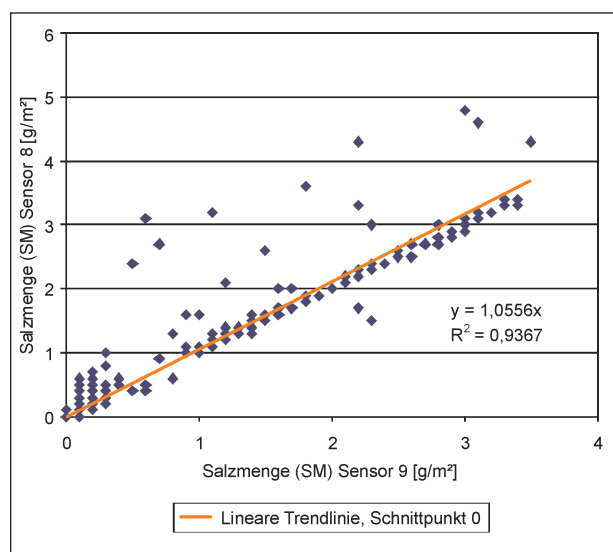


Bild 27: Zeitgleiche Messwerte des Sensorpaares 8/9 im Dezember 2006

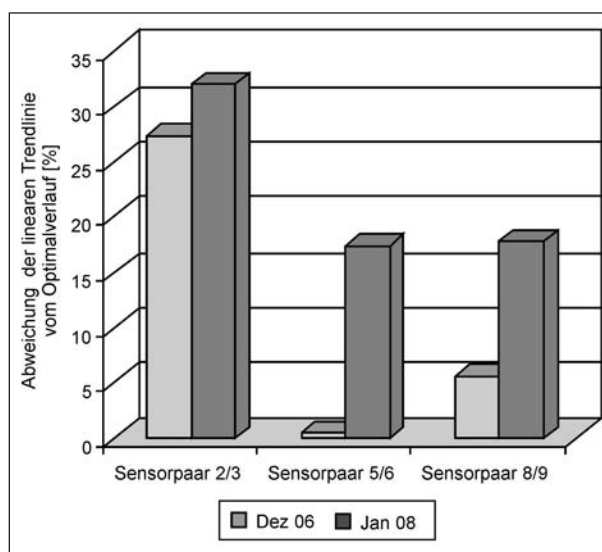


Bild 29: Abweichungen beim Vergleich nahe liegender Sensorpaare

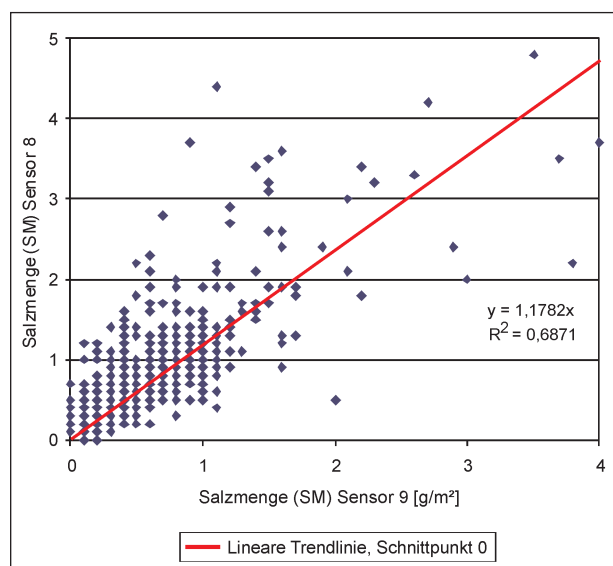


Bild 28: Zeitgleiche Messwerte des Sensorpaares 8/9 im Januar 2008

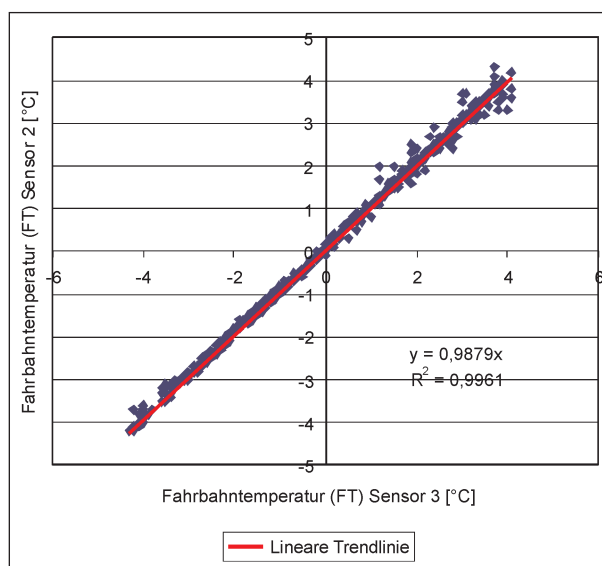


Bild 30: Vergleich der von den Sensoren 2 und 3 im Dezember 2006 gemessenen Fahrbahntemperaturen

te nahe liegender Sensoren von bis zu 32 % auftreten. Dabei ist deutlich zu sehen, dass sich die Höhe der Abweichung bei längerer Gebrauchsdauer der Sensoren vergrößert. Eine Neukalibrierung der Sensoren wurde zwischenzeitlich nicht durchgeführt. Die Häufigkeitsverteilung der Messwerte zeigt auch, dass im Januar 2008 die meisten Werte im Bereich bis 1 g/m² gemessen wurden, eine Abweichung von 32 % bedeutet bei dieser Größenordnung 0,32 g/m².

Aus diesen Werten ist auch zu entnehmen, dass unter Praxisbedingungen offenbar nicht mit gleicher Genauigkeit gemessen werden kann, wie das unter Laborbedingungen nachgewiesen wurde

Eine sehr hohe Anzeigegenauigkeit zeigt sich bei den Messwerten für die Fahrbahnoberflächentemperatur. Die Anzeigegenauigkeit hat sich in der Zeit von Dezember 2006 bis Januar 2008 nur geringfügig verändert. Die durchschnittliche Abweichung der Werte betrug im Dezember 2006 1,2 % (Bild 30) und im Januar 2008 2,7 % (Bild 31). Abweichungen der beiden Werte müssen nicht zwangsläufig durch technisch bedingte Messfehler zustande kommen, sondern können auch dadurch entstehen, dass ein Sensor kurzzeitig von der Sonne beschienen ist, während der andere Sensor im Schatten liegt.

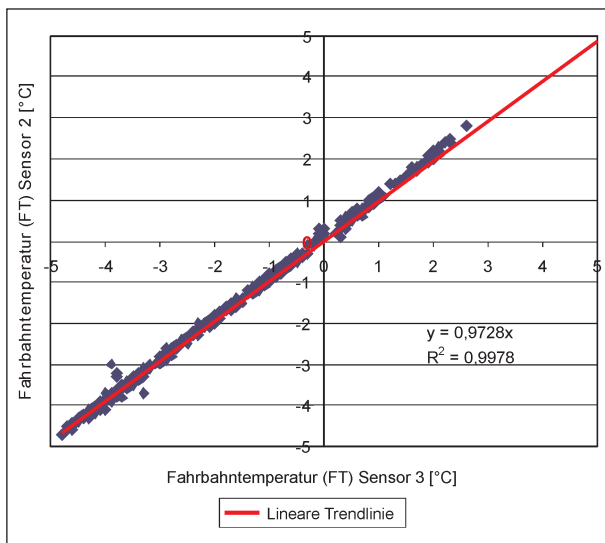


Bild 31: Vergleich der von den Sensoren 2 und 3 im Januar 2008 gemessenen Fahrbahntemperaturen

8.3 Vergleich von Sensoren unterschiedlicher Bauart

Bei den beiden Sensoren handelt es sich um unterschiedliche Fabrikate, die nach unterschiedlichen Messprinzipien arbeiten. Im Messfeld werden passive Sensoren verwendet. Der Vergleichssensor ist ein aktiver Sensor. Die wesentlichen Unterschiede der Messprinzipien sind bei BADEL 2005 beschrieben. Ein wesentlicher Unterschied für die Auswertung sind die Messzyklen der Sensoren, die voneinander abweichen. Die Mindestlänge eines Messturnus bei den eingesetzten aktiven Sensoren beträgt 8 Minuten. Passive Sensoren können im Minutenabstand neue Werte liefern. Im Vergleichszeitraum war der Messturnus auf 5 Minuten eingestellt. Ein weiterer wesentlicher Unterschied besteht darin, dass bei den aktiven Sensoren der Firma Boschung die Gefriertemperatur dadurch festgestellt wird, dass die Veränderung der physikalischen Eigenschaften des Flüssigkeitsfilms ermittelt wird. Das ist ein anderer, durchaus praxisgerechter Weg, Glättebildung festzustellen. Ein Vergleich mit den über Leitfähigkeitsmessungen ermittelten Werten, die der Gefrierkurve (Liquiduslinie) folgen, wird jedoch zwangsläufig zu unterschiedlichen Werten führen. Zur Information sind die Messwerte zweier Sensoren, die im gleichen Fahrbahnquerschnitt nur 1,50 m voneinander eingebaut sind, im Diagramm dargestellt (Bild 32).

Bei dem Vergleich der gemessenen Fahrbahnoberflächentemperaturen im Januar 2008, 14 Monate nach Inbetriebnahme der Anlagen, zeigt sich, dass zwischen den Werten der beiden Sensorfabrikate

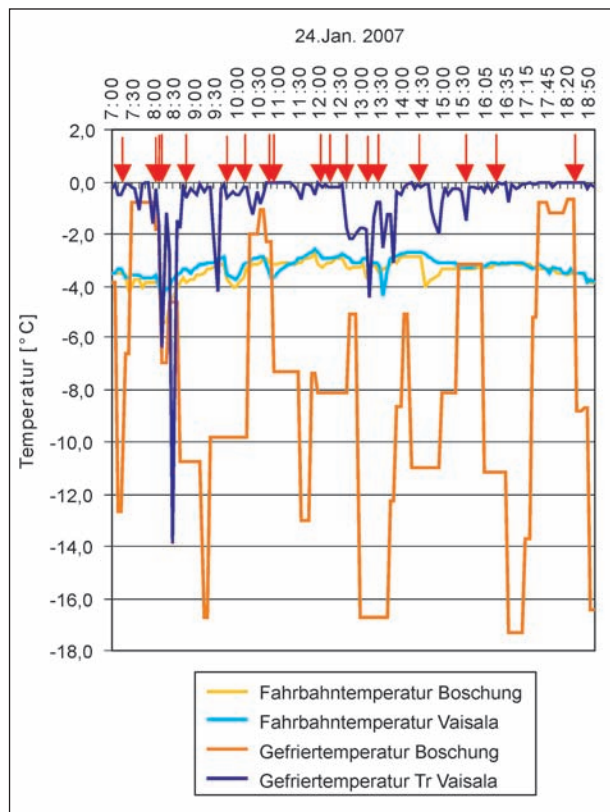


Bild 32: Verlauf der Messdaten für die Fahrbahnoberflächentemperatur und die Gefriertemperatur von Sensoren unterschiedlicher Bauart

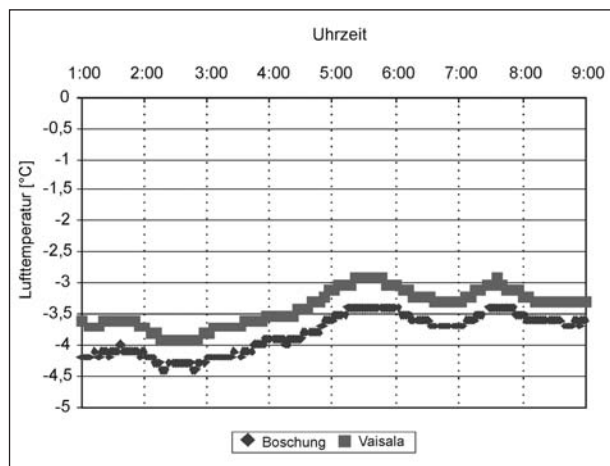


Bild 33: Ganglinien der Lufttemperatur am 6.1.2008

nur eine Differenz von 0,02 K besteht. In der Zeit zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr weichen die Werte stärker voneinander ab (Bild 34). Das kann durch Fremdkörper auf einem Sensor verursacht sein.

Bei der Messung der Lufttemperatur trat im Vergleichszeitraum eine durchschnittliche Abweichung von 0,43 K auf. Die Sensoren für die Lufttemperatur sind im Abstand von 40 cm nebeneinander angeordnet (Bilder 33, 35).

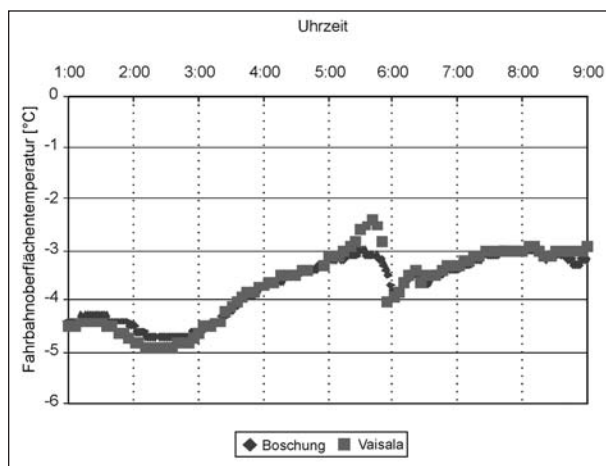


Bild 34: Ganglinien der Fahrbahnoberflächentemperatur am 6.1.2008

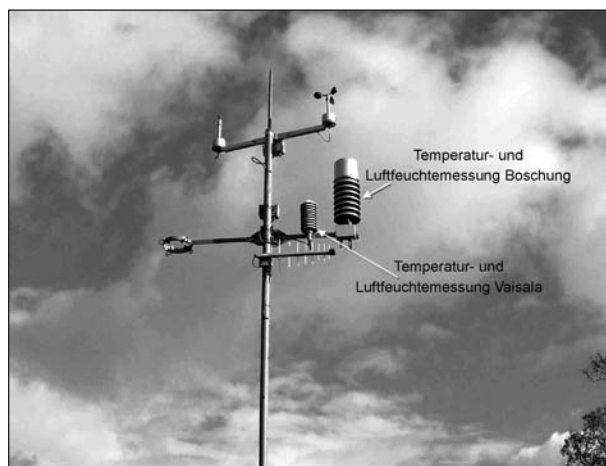


Bild 35: Temperatur- und Luftfeuchtemessung

9 Auswertung der Messdaten

9.1 Auswertungsaspekte

Die Verteilung der Streustoffe auf der Fahrbahn unmittelbar nach dem Streuvorgang wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst.

Ganz wesentliche Faktoren sind Einwirkung der Fahrzeugreifen auf die Fahrbahnoberfläche und Niederschlagsereignisse.

Die direkte Einwirkung der Fahrzeugreifen kann durch die spezielle Anordnung der Sensoren auf der Fahrbahn messtechnisch erfasst werden. Dazu sind auf dem rechten Fahrstreifen die Sensoren 2 und 3 auf der rechten Rollspur und die Sensoren 5 und 6 auf der linken Rollspur angeordnet. Da auf dem rechten Fahrstreifen der Lkw Verkehr die entscheidenden Auswirkungen auf die Streustoffverteilung haben wird, sind die Sensoren so positioniert,

dass sie im Bereich der Lkwrollspuren liegen. Auf dem linken Fahrstreifen befinden sich die Sensoren 8 und 9 auf der rechten Rollspur und der Sensor 11 auf der linken Rollspur. Auf dem linken Fahrstreifen ist vorwiegend mit Pkwverkehr zu rechnen. Die Lage der Sensoren ist deshalb auf Pkwspurbreite angepasst.

Eine getrennte Betrachtung der Messwerte der Sensoren, die sich in den Rollspuren befinden, im Vergleich zu den Sensoren, die sich außerhalb der Rollspuren befinden, gibt Aufschlüsse darüber, welche Wirkungen von dem Verkehr auf die Salzverteilung ausgehen und in welchem Umfang Streustoff in die Bereiche verfrachtet wird, die nicht oder nur selten von Reifen befahren werden. Diese Betrachtungsweise berücksichtigt auch Sicherheitsaspekte, da der Fahrbahnzustand in den Rollspuren von besonderem Interesse ist.

Weitere Aspekte sollen bei der weiteren Bearbeitung des Themas durch die Auswertung der Sensordaten in anderen Gruppierungen berücksichtigt werden.

Eine getrennte Auswertung von Daten des rechten und linken Fahrstreifens gibt weiteren Aufschluss über die Auswirkungen der Verkehrsstärke.

Ein Vergleich des zeitlichen Verlaufes der Werte der „inneren Sensoren“ 2-11 mit den Werten der Sensoren 1 und 12 kann Aufschluss über den Taustofftransport in die Randbereiche geben.

Für die Auswertung sind auch Art und Intensität von Niederschlägen von Bedeutung. Diese Informationen wurden aus den Messwerten der benachbarten GMA im Abgleich mit einer nahe liegenden Wetterstation gewonnen und in die Auswertungen eingefügt. Parallel dazu wird die Fahrbahnfeuchtigkeit auch mit den Fahrbahnsensoren ermittelt. Angezeigt werden die Wasserfilmdicke (WD) in mm und der Oberflächenstatus (ST) mit der Differenzierung Trocken, Feucht, Nass, Nass und Enteisungsmittel, Frostig, Schneefall, Gefrierend, Feucht und Enteisungsmittel.

9.2 Auswertungsformen

Aus den Rohdaten wurden mittels speziell entwickelter Software Excetabellen erstellt, in denen für jeden Messzeitpunkt alle erhobenen Daten enthalten sind. Aus den relevanten Messwerten der doppelt angelegten Sensoren 2-3, 5-6 und 8-9 wurden Mittelwerte gebildet.

Damit lassen sich für alle Einzelereignisse 3D Diagramme erstellen, aus denen der zeitliche Verlauf von Salzmenge (SM), Gefriertemperatur (GT), Fahrbahnoberflächentemperatur (FT) oder Wasserfilmdicke (WD) über den gesamten Fahrbahnquerschnitt ersichtlich ist.

Eine weitere Zusammenfassung der Daten erfolgt durch Mittelwertbildung mit der Differenzierung „innerhalb der Rollspur“ (RS) und „außerhalb der Rollspur“ (AR). Aus den so gewonnenen Werten wurden für alle Vorgänge aussagekräftige Diagramme zum Verlauf der Streustoffmenge, der Gefriertemperatur und der Oberflächentemperatur mit der Differenzierung RS und AR erstellt. Diese Diagramme sind besonders dazu geeignet, die Auswirkung einzelner Streuvorgänge und Niederschlagsereignisse zu dokumentieren.

Aus der großen Zahl von Daten aus Einzelereignissen können nur dann verallgemeinerungswürdige Schlussfolgerungen gezogen werden, wenn aus jedem Einzelereignis charakteristische Einzeldaten herausgefiltert werden, welche die Zusammenfassung und den Vergleich ermöglichen.

Für jeden Streuvorgang und dessen Wirkung wurden aus dem Datenbestand folgende Werte ermittelt:

- Datum,
- Uhrzeit,
- Streudichte [g/m²],
- Trocken-/Feuchtsalzeinsatz,
- Pflugeinsatz,
- Niederschlagsintensität zum Streuzeitpunkt [mm/h],
- vor Streuung gelöste Salzmenge außerhalb Rollspur [g/m²],
- vor Streuung gelöste Salzmenge innerhalb Rollspur [g/m²],
- maximal gelöste Salzmenge außerhalb Rollspur [g/m²],
- maximal gelöste Salzmenge innerhalb Rollspur [g/m²],
- gelöste Salzmenge außerhalb Rollspur am Ende des Analysezeitraumes [g/m²],
- gelöste Salzmenge innerhalb Rollspur am Ende des Analysezeitraumes [g/m²],

- Reaktionszeit (erste an Messwerten erkennbare Wirkung der Streuung) [min],
- Zeit bis Wirkungsmaximum außerhalb Rollspur [min],
- Zeit bis Wirkungsmaximum innerhalb Rollspur [min],
- Zeit bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes (Folgestreuung oder Ende der Wirkung) [min],
- Gefriertemperatur außerhalb Rollspur vor Streuung [°C],
- Gefriertemperatur innerhalb Rollspur vor Streuung [°C],
- minimale Gefriertemperatur außerhalb Rollspur nach der Streuung [°C],
- minimale Gefriertemperatur innerhalb Rollspur nach der Streuung [°C],
- mittlere Fahrbahntemperatur während der Wirkungszeit des Streustoffes [°C].

9.3 Messergebnisse

9.3.1 Fahrbahnoberflächentemperatur

Das Temperaturprofil quer zur Fahrbahn zeigt bei dem für Wochentage typischen Verkehrsaufkommen in allen Fällen zwei Wölbungen über den Fahrstreifen. Der Wärmeeintrag durch die Reifen und die Abstrahlung der Motoren sind deutlich zu erkennen. Die Temperaturdifferenz vom Rand bis zur Fahrbahnmitte kann bis zu 1 K betragen. Sie fällt auf dem rechten Fahrstreifen mit dem starken Lkwverkehr deutlich größer aus (Bild 36). In Zeiträumen mit sehr geringem Verkehrsaufkommen ist diese charakteristische Temperaturverteilung nicht zu erkennen. Der Einfluss von Streuungen zeigt sich während des Lösevorganges in einer Absenkung der Oberflächentemperatur bis zu 1 K. Voraussetzung dafür ist jedoch ausreichend Feuchtigkeit auf der Fahrbahn. Die durch Löseprozesse bedingten Temperaturabsenkungen können indirekt Aufschluss über die Verteilung von Taustoff auf der Fahrbahn geben.

In Bild 37 ist die Temperaturverteilung auf der Fahrbahn in der Draufsicht auf eine 3D-Darstellung zu sehen. Es handelt sich um Messwerte vom 24.01.2007. An diesem Tag fiel fast kontinuierlich 1 cm Schnee/Stunde. Dabei blieb die Lufttempera-

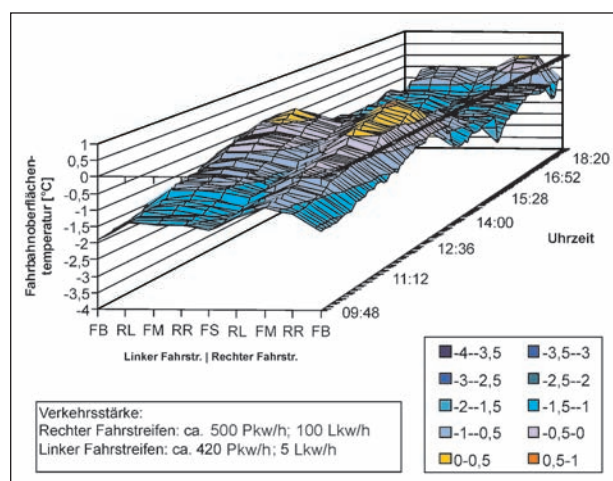


Bild 36: Charakteristische Temperaturverteilung über den Fahrbahnquerschnitt am 28. Dezember 2006 im zeitlichen Verlauf

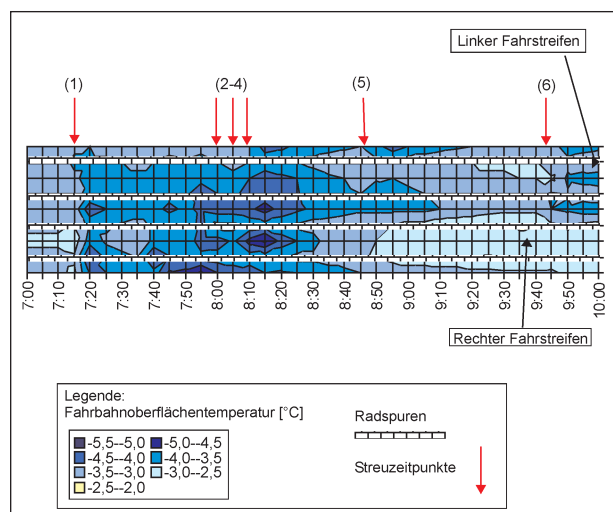


Bild 37: Verteilung der Fahrbahnoberflächentemperatur am 24.01.2007 mit dem sichtbaren Einfluss von Streuungen

tur mit $-4,7\text{ °C}$ um 7:00 Uhr bis $-4,3\text{ °C}$ um 10:00 Uhr relativ stabil. Die Sonne war durch dichte Wolken verdeckt. Insofern hatten die Umgebungsbedingungen nur begrenzten Einfluss auf die Fahrbahntemperatur. Innerhalb des dargestellten Zeitraumes wurden mehrere Streuungen durchgeführt, deren Einfluss auf die Fahrbahntemperatur erkennbar ist. Bei allen Streuungen wurde mit FS 30 gearbeitet. Wegen des Schneefalls ist bei jeder Streuung auch geräumt worden (siehe Tabelle 6).

Nach Streuung (1) ist eine Absenkung der Fahrbahntemperatur über den gesamten Fahrbahnquerschnitt deutlich zu erkennen (Bild 37). Es ist auch zu erkennen, dass der Löseprozess unmittelbar nach der Streuung beginnt und bereits nach 10 bis 15 Minuten weitgehend abgeschlossen ist. Der

Streuung	Streudichte g/m ²	Streubreite m	Lage des Streubildes
(1)	20	8	Mitte
(2)	40	7	Mitte
(3)	8	5	Mitte
(4)	20	7	Mitte
(5)	20	7	Mitte
(6)	12,5	4	Links

Tab. 6: Streudaten am 24.01.2007

massive Salzaustrag mit den Streuungen (2 bis 4) führt zu einer entsprechend größeren Temperaturabsenkung. In den Rollspuren des rechten Fahrstreifens wird die Temperaturabsenkung etwas gedämpft. Ursache dafür kann der Wärmeeintrag über die Reifen sein. Möglich ist aber auch, dass wegen der geringeren Wasserfilmdicke in diesem Bereich weniger Salz gelöst wird und somit die Temperaturabsenkung geringer ausfällt. Die Temperaturabsenkung nach Streuung (5) fällt ohne erkennbaren Grund weniger deutlich aus und ist im Wesentlichen auf den linken Fahrstreifen beschränkt. Streuung (6) wurde auf dem linken Fahrstreifen durchgeführt. Das ist auch deutlich aus der Temperaturverteilung nach der Streuung zu erkennen.

9.3.2 Streustoffmenge

Mit der eingebauten Sensorik wird die Streugutmenge ermittelt, die pro Quadratmeter gelöst ist. Mit dem eingesetzten Messverfahren wird im Unterschied zu den Messungen mit dem SOBO-20-Gerät nicht die auf der Fahrbahn vorhandene Salzmenge gemessen, sondern die Salzmenge, die sich auf der Fahrbahn gelöst hat. Für die Wirkung des Taumittels ist das der entscheidende Wert. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass zwischen der ausgebrachten Streustoffmenge und der gelösten Salzmenge eine erhebliche Differenz besteht. Wie viel Salz in Lösung geht, ist ganz wesentlich davon abhängig, wie viel Flüssigkeit sich auf der Fahrbahn befindet.

Bild 38 zeigt beispielhaft die Wirkung aller Streuungen am 24.01.2007. Allerdings ist die Verteilung des gelösten Salzes über den Fahrbahnquerschnitt sehr inhomogen.

Es ist zu erkennen, dass der Streustoff zumeist sehr schnell aus den Rollspuren in Bereiche außerhalb der Rollspuren verdrängt wird. Dieser Effekt ist auf dem rechten Fahrstreifen mit Lkwverkehr deutlicher

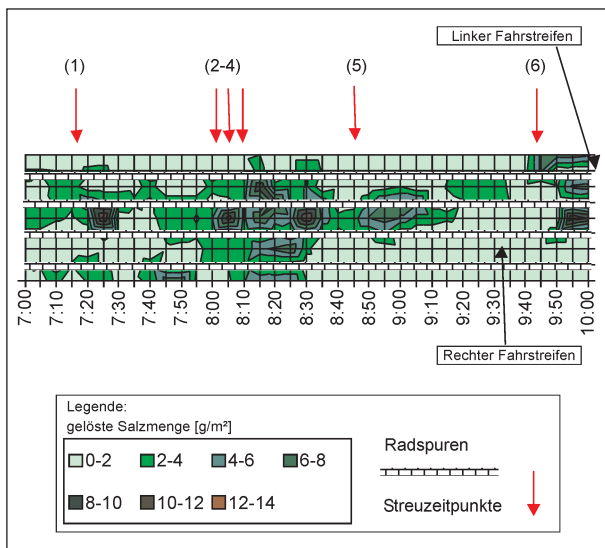


Bild 38: Verteilung der gelösten Streustoffmenge am 24.01.2007 unter dem Einfluss von Streuungen

als auf dem linken Fahrstreifen. Die Streuung (6) auf dem linken Fahrstreifen zeichnet sich ebenfalls sehr deutlich ab.

Es ist deutlich festzustellen, dass sich die Salz-mengen nach der Streuung bei Niederschlag sehr schnell verringern. Im hier betrachteten Zeitraum kommt hinzu, dass generell mit Schneeflug gefahren wurde und auch dadurch Streustoff in die Randbereiche verfrachtet wurde. Die Messungen am 24.01.2007 wurden durch visuelle Beobachtungen ergänzt. Soweit das zu beurteilen war, trat zu keinem Zeitpunkt gefährliche Glätte auf.

9.3.3 Wasserfilmdicke

Die Wasserfilmdicke hat einen wesentlichen Einfluss darauf, wie viel Salz gelöst werden kann. Unter Verkehrseinwirkung wird die Flüssigkeit aber auch von der Fahrbahn transportiert, und mit ihr das gelöste Salz. Im Unterschied dazu kristallisiert das Salz bei Abtrocknungsvorgängen wieder aus und verbleibt teilweise auf der Fahrbahn.

Aus den visuellen Beobachtungen ist zu schließen, dass auf Autobahnen durch die schnell fahrenden Fahrzeuge große Mengen der Fahr-bahnflüssigkeit sehr schnell wegtransportiert werden. Das äußert sich auch darin, dass die Fahrbahnen nach Niederschlagsende sehr schnell abtrocknen. Die Wirkung des Fahrzeugverkehrs ist auch daran zu erkennen, dass die Flüssigkeit aus den Rollspuren immer etwas schneller verdrängt wird. Das ließ sich auch messtechnisch nachweisen und ist in den nachfolgenden Bildern dargestellt. Bild 39

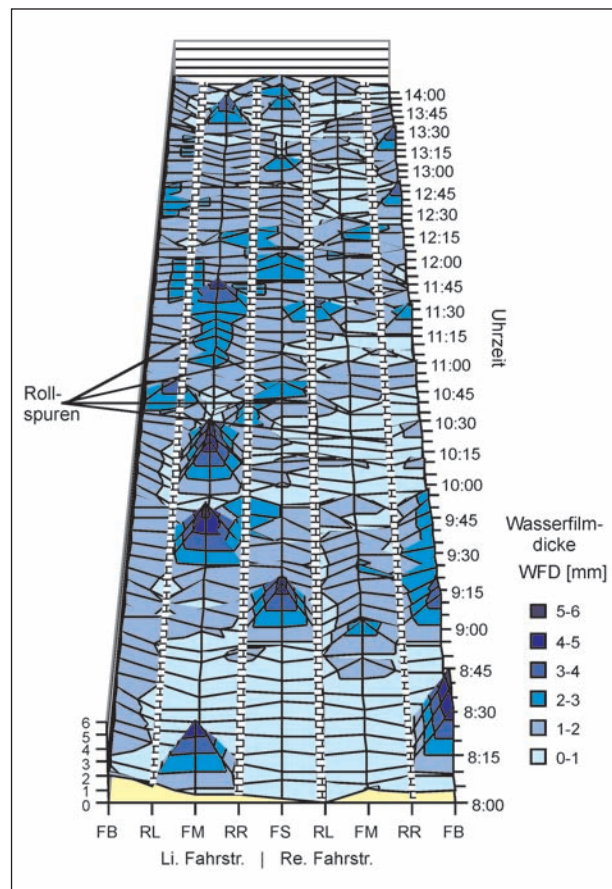


Bild 39: Einfluss des Fahrzeugverkehrs auf die Wasserfilmdicke (24.01.2007)

zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Wasserfilmdicke in 3D-Darstellung. Während des dargestellten Zeitraumes gab es ununterbrochenen Schneefall von etwa 1 cm/h, was einer Wassermenge von 1 mm/h entspricht. Mehrfach wurde in diesem Zeitraum geräumt und gestreut. Im Diagramm ist deutlich sichtbar, dass sich in den Rollspuren auch „Täler“ der Wasserfilmdicke befinden. Es ist auch deutlich erkennbar, dass sich die „Gipfel“ der Wasserfilmdicke an den Rändern der Fahrstreifen und zwischen den Rollspuren befinden. Absolute Beträge der Wasserfilmdicke in der Größenordnung bis 6 mm wurden nur gemessen, wenn Schnee- oder Schneematsch auf der Fahrbahn vorhanden war. Die dargestellten Größenordnungen können daher nicht als reine Flüssigkeit angesehen werden. In Bild 40 sind die Mittelwerte der Wasserfilmdicke getrennt nach „Rollspur“ und „Außerhalb Rollspur“ für denselben Zeitraum dargestellt. Grundsätzlich werden außerhalb der Rollspuren die höheren Werte gemessen. Während einzelner Zeiträume war es allerdings auch umgekehrt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht immer spurtreu gefahren wird.

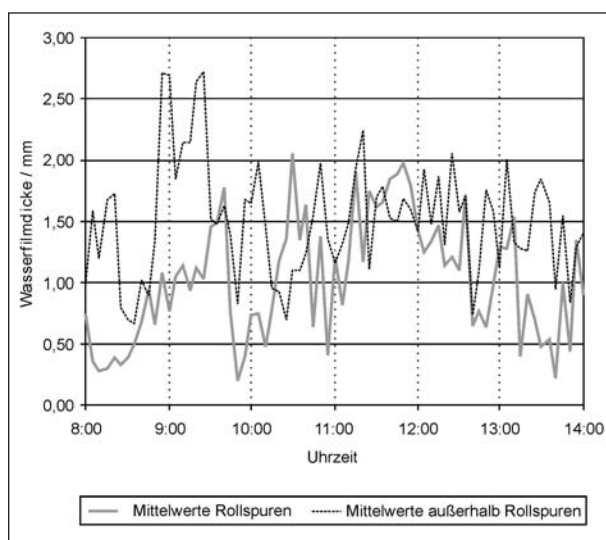


Bild 40: Mittelwerte der Wasserfilmdicke innerhalb und außerhalb der Rollspuren – Beispiel 24.01.2006

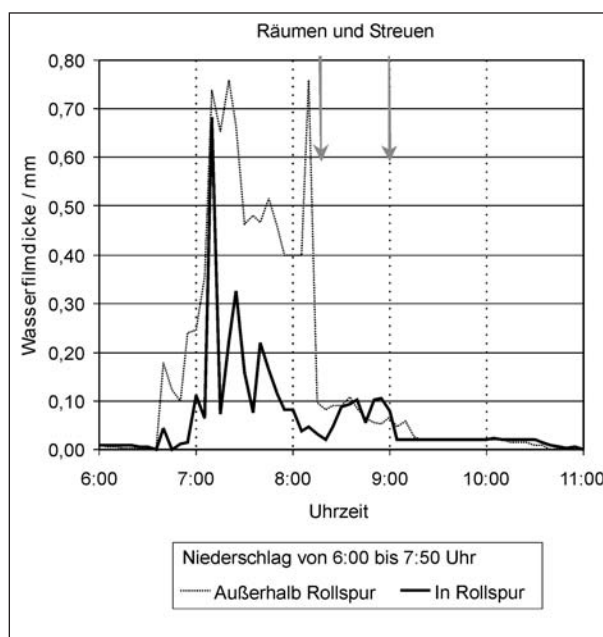


Bild 42: Einfluss von Räumvorgängen auf die Wasserfilmdicke – spurbezogene Mittelwerte (20.03.2008)

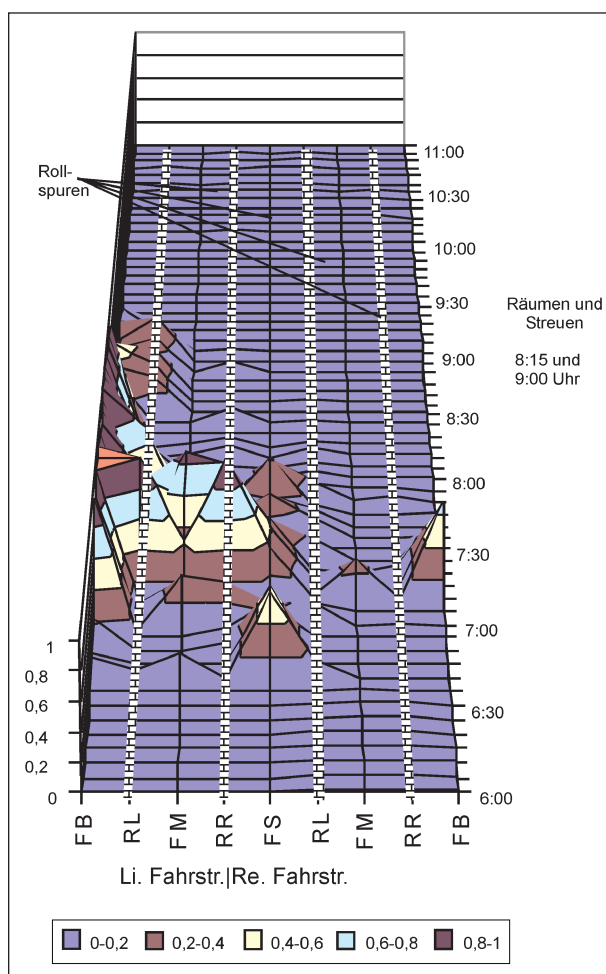


Bild 41: Einfluss von Niederschlag und Räumvorgängen auf die Wasserfilmdicke – 3D-Darstellung (20.03.2008)

Interessant ist auch das Abtrocknungsverhalten der Fahrbahn nach Niederschlägen. In der ersten Phase mit Wasserfilmdicken über 0,02 mm wird

Flüssigkeit in relativ kurzer Zeit (ca. 30-40 Minuten) vor allem als Sprühnebel von der Fahrbahn transportiert. In dieser Flüssigkeit befindet sich die gelöste Salzmenge, aber auch nicht gelöstes Salz. Ein realistischer Wert, der sich aus den Messungen ergibt, ist zum Beispiel, dass sich die Wasserfilmdicke von 0,5 mm unmittelbar nach Niederschlagsende innerhalb 60 Minuten auf 0,02 mm reduziert hat, ohne dass nennenswerte Verdunstungseffekte auftreten. Damit verschwinden 96 % der Flüssigkeit, aber auch das darin gelöste Salz von der Fahrbahn.

Auch durch die Schneeräumung werden erhebliche Salzmenge von der Fahrbahn transportiert. Bild 41 und 42 zeigen den Verlauf der Wasserfilmdicke nach Räumereinsätzen. Durch die Räumereinsätze wird die Wasserfilmdicke deutlich reduziert. Anschließend trocknet die Fahrbahn innerhalb von 20 Minuten ab. Das wird an diesem Tag durch Sonneneinstrahlung und steigende Lufttemperatur unterstützt.

9.3.4 Windrichtung und -geschwindigkeit

Die kontinuierlichen Messungen ergaben, dass die Windrichtung West (270°) dominiert. Diese Windrichtung entspricht der Ausrichtung der Autobahn. Auch bedingt durch den hohen Waldsaum beiderseits der Autobahn wurden nennenswerte Querwinde nicht gemessen.

9.3.5 Kombinierte Betrachtung des zeitlichen Verlaufes von Streustoffmenge, Gefrier-temperatur und Fahrbahnoberflächen-temperatur

Zur Verdeutlichung der komplexen Zusammenhänge wurden für alle Zeiträume der Winterdienstsaison 2006/07, in denen Taumittel auf der Fahrbahn gelöst war, aus dem vorhandenen Datenbestand Diagramme erstellt. Dabei wurde zwischen Messwerten in den Rollspuren und außerhalb der Rollspuren unterschieden. Zu den relevanten Zeiträumen gehörten auch die Fälle, bei denen auf der Fahrbahn aufgetrocknetes Salz durch Niederschläge reaktiviert wurde. Bei den insgesamt 117 analysierten Einzelereignissen wurden fast ausschließlich in sich schlüssige Messergebnisse erzielt.

Grundsätzlich wurden folgende Zusammenhänge durch Messwerte belegt:

- Die Erhöhung der gemessenen Salzmenge und die Gefrierpunktniedrigung treten grundsätzlich bereits innerhalb der ersten 5 Minuten ein.
- Synchron dazu ist eine Erniedrigung der Fahrbahnoberflächentemperatur zu verzeichnen, wenn ausreichend Flüssigkeit auf der Fahrbahn vorhanden ist.
- Der Lösevorgang ist zumeist schon nach 10-15 Minuten weitgehend beendet.
- In einigen Fällen wird aus bisher ungeklärten Gründen das Maximum der gemessenen Salzmenge erst nach längerer Zeit erreicht (bis 120 Min.).
- Die Fahrbahnoberflächentemperatur in der Rollspur ist immer höher als außerhalb der Rollspur.
- Die Höhe der Temperaturdifferenz hängt maßgeblich von der Verkehrsstärke ab.
- Bei trockener Fahrbahn kommt bei präventiven Streuungen nur ein kleiner Teil des ausgebrachten Streustoffes zur Wirkung.
- Auch bei feuchter Fahrbahn und Niederschlägen geht weniger als 50 % des Streustoffes in Lösung.
- Auch dann, wenn die ermittelte Gefriertemperatur auf der Fahrbahn deutlich höher ist als die Fahrbahnoberflächentemperatur, entsteht nicht zwangsläufig Fahrbahnglätte.

9.4 Charakteristische Winterdienst-situationen

Mit dem Messfeld konnten charakteristische Situationen im Detail erfasst und ausgewertet werden, die während der beiden Winterdienstperioden aufgetreten sind. Dazu gehörten:

- anhaltender Schneefall,
- präventive Streuung in Erwartung von Reifglätte oder überfrierender Nässe,
- Reaktivierung von Restsalz durch Niederschläge.

Die Bilder 38 und 43 zeigen Messwerte eines Tages mit ununterbrochenem Schneefall bei Temperaturen um $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es wurde in relativ kurzen Abständen geräumt und gestreut. Die ermittelte gelöste Salzmenge stieg trotzdem nur kurzzeitig auf Werte über 4 g/m^2 . Die errechnete Gefriertemperatur blieb deutlich über der Fahrbahnoberflächentemperatur. Die durch den Niederschlag bedingten Verdünnungseffekte sind deutlich zu erkennen. Außerhalb der Rollspuren blieb der Schnee zeitweise liegen. Die Rollspuren waren bei vermindertem Reibwert immer frei, es bestand jedoch zu keinem Zeitpunkt gefährliche Glätte. Lediglich kurz vor der Streuung um 12:00 Uhr waren visuell erste Ansätze von Glättebildung in den Rollspuren zu erkennen. Das war eine Stunde nach der vorangegangenen Streuung. Das bedeutet allerdings, dass die normalen Umlaufzeiten von 2-3 Stunden nach MK 6a unter den an diesem Tag herrschenden Bedingungen nicht ausreichend gewesen wären. Wegen der exponierten Lage in einem schneereichen Gebiet wird der Streckenabschnitt von zwei Autobahnmeistereien betreut. Daraus resultiert die hohe Einsatzdichte.

Am 24. Januar 2007 wurden parallel zu den Messungen auch visuelle Beobachtungen durchgeführt und fotografisch dokumentiert. Die Beobachtungen galten einerseits den Sensoroberflächen und deren Bedeckung (Bilder 51, 52 in Kapitel 9.5) und andererseits dem Fahrbahnzustand während des anhaltenden Schneefalls (Bilder 44 bis 46).

Die Sensoren waren am 24. Januar insbesondere außerhalb der Rollspuren meist mit Schneematsch bedeckt. Inwieweit die Messwerte dadurch verfälscht werden, ist nicht bekannt.

Es kann jedoch festgestellt werden, dass auch während dieses Tages keine unplausiblen Messwertsprünge auftraten.

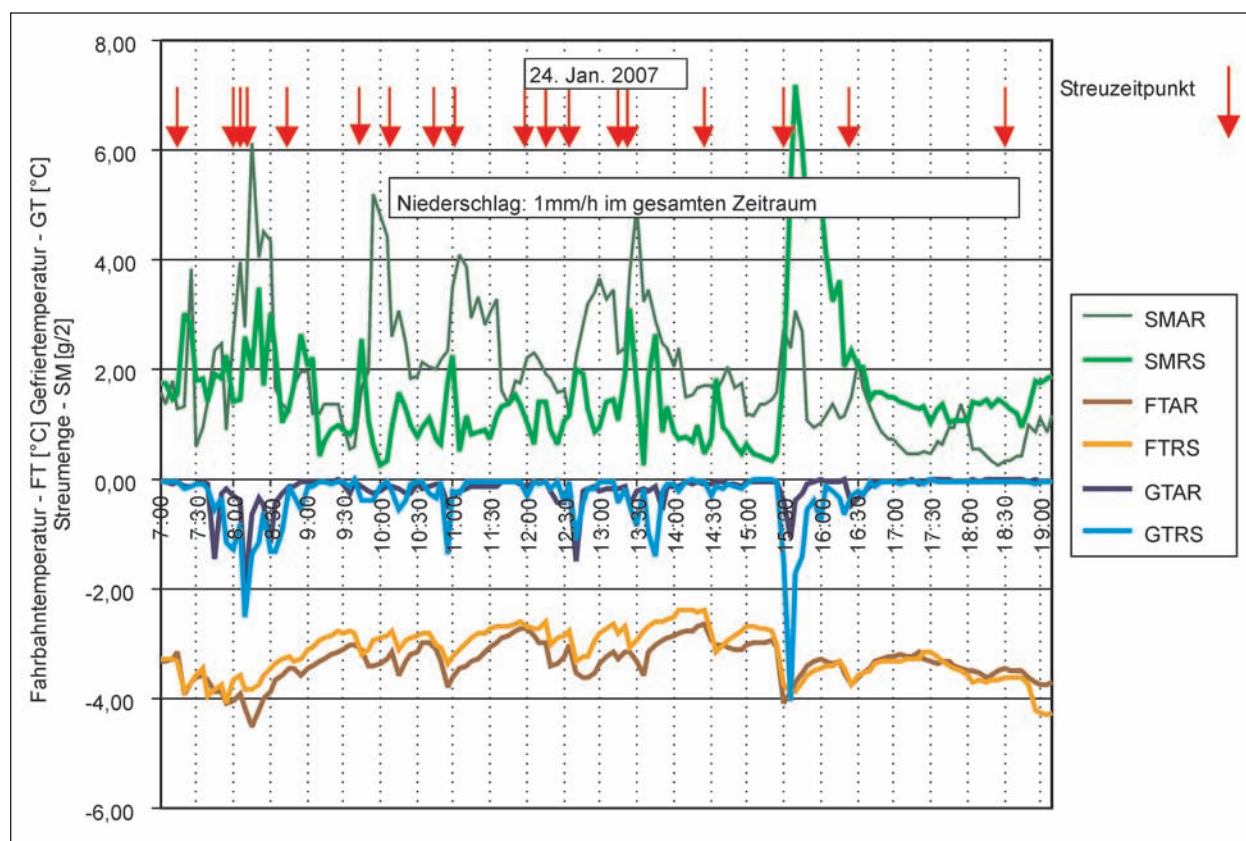


Bild 43: Messwerte am 24.01.2007 bei stetigem Schneefall und intensivem Räum- und Streueinsatz



Bild 44: Fahrstreifen mit verstärkter Spurbildung am 24.01.2007; 9:40 Uhr

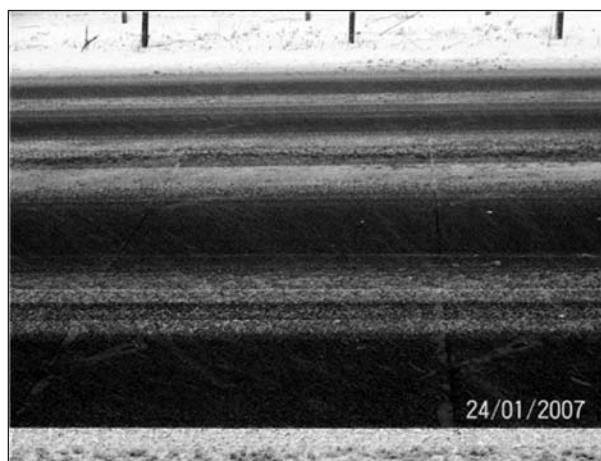


Bild 45: Sensorfeld nach Räumvorgang am 24.01.2007; 9:50 Uhr

Ein typischer Fall für präventive Streuung in Erwartung von Reifglätte sind die in Bild 47 dargestellten Messwerte einer kalten Nacht ohne Niederschlag. Die Wasserfilmdicke wurde fast durchgängig mit 0 mm gemessen. Lediglich nach den Streuungen und auf den Randmarkierungen waren kurzzeitig geringe Wasserfilmdicken messbar.

Demgemäß wurden auch nur Salzmengen von 0,3 bis maximal 0,5 g/m² dedektiert. Das ist genau der Anteil, der in der für die Befeuchtung verwendeten

Sole enthalten ist. größere Salzmengen können nicht gelöst werden, da dafür kein Lösewasser vorhanden ist. Das bedeutet, dass der überwiegende Teil des ausgestreuten Salzes wirkungslos bleibt und innerhalb kurzer Zeit von der Fahrbahn verfrachtet wird.

Alle gängigen Sensormessverfahren können nur das Salz dedektieren, dass gelöst ist. Insofern sind die Salzmengen, die aufgebracht wurden, in den Anzeigen der Glättemeldestationen nicht sichtbar.

Das führt regelmäßig zur Verunsicherung und löst weitere Streueinsätze aus.

Eine Nacht mit intensiver Reif- bzw. Taubildung wurde vom 13. zum 14.1. 2008 beobachtet. In der ersten Phase der Reifbildung war Restsalz aktiv, das am 13.1., 18:20 Uhr ausgestreut wurde. Zwei Wiederholungsstreuungen am 14.1. um 0:30 und 4.15 Uhr erhöhten die Menge des gelösten Salzes von 0,4 g/m² auf 1,1 g/m². Bezeichnend ist auch hier, dass sich nur ein Bruchteil des ausgebrachten Salzes in gelöster Form auf der Fahrbahn wieder-



Bild 46: Fahrbahnzustand am 24. Jan. 2007; 10:34 Uhr

findet. Dieser Anteil ist allerdings unter den gegebenen Bedingungen ausreichend, obwohl durch Kondensation bzw. Resublimation weitere Flüssigkeit oder Reif hinzukommen.

Die Resublimationsrate (auch Kondensationsrate) in Bild 20 wurde mit den gemessenen Eingangsdaten anhand der unter 3.2.1 eingeführten Formel berechnet.

Interessant ist auch die Aktivierung, d. h. Lösung von Salz, das sich noch in kristalliner Form auf der Fahrbahn befindet. Bei Niederschlagsbeginn wird das noch vorhandene Restsalz aktiviert. Bild 48 zeigt die Aktivierung von Restsalz am 28. Dezember 2006, 13:48 Uhr. Die vorhergehende Streuung mit einer Streudichte von 5 g/m² wurde um 4:10 Uhr durchgeführt. Nach dem Niederschlagsbeginn geht 1 g/m² Salz wieder in Lösung. Das war in diesem Fall ausreichend, um bis zur ersten Streuung Glätte zu verhindern. Die folgenden Streuungen erhöhen die gelöste Salzmenge auf etwa 3 g/m². Während die erste Streuung ohne Pflugeinsatz erfolgte, wurde bei der zweiten Streuung auch geräumt. Das ist als Messwert in der deutlich erhöhten Salzmenge (6 g/m²) außerhalb der Rollspuren zu erkennen.

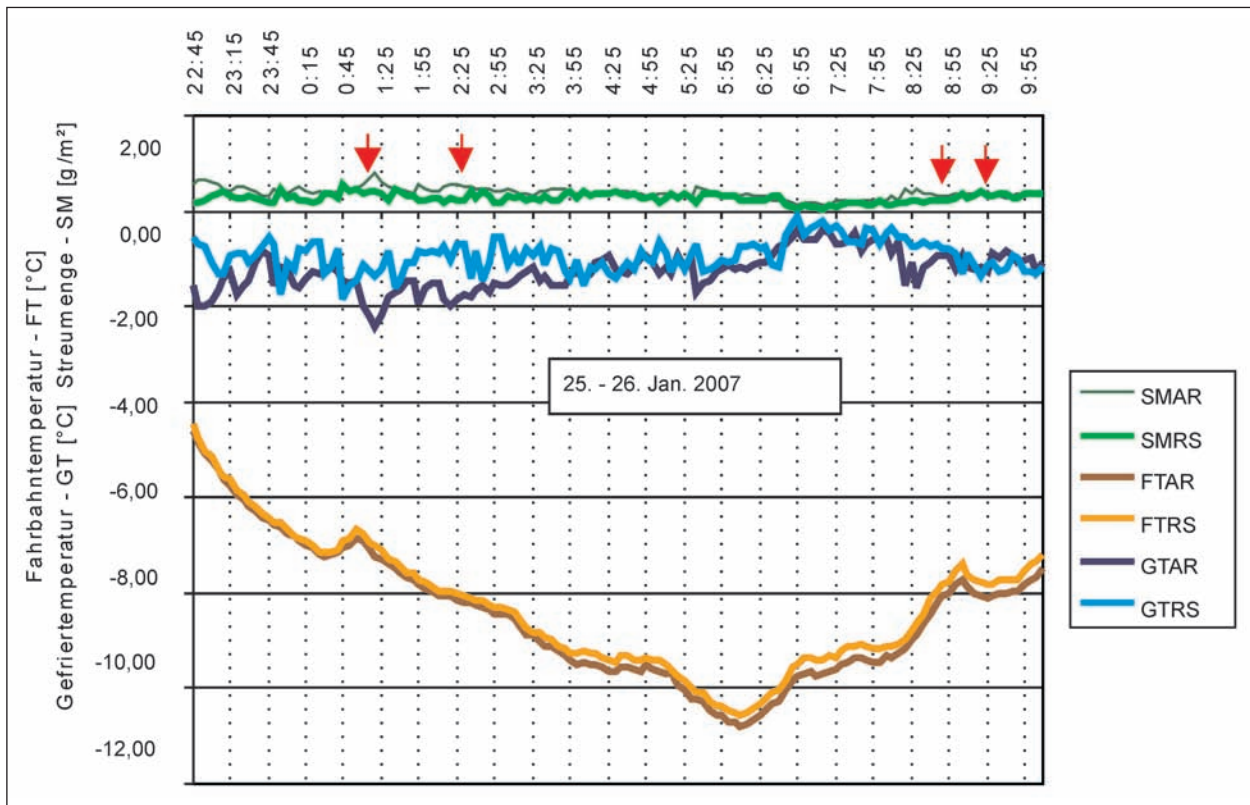


Bild 47: Kalte Nacht ohne Niederschläge – erste Streuung 10 g/m², weitere Streuungen mit je 5 g/m²

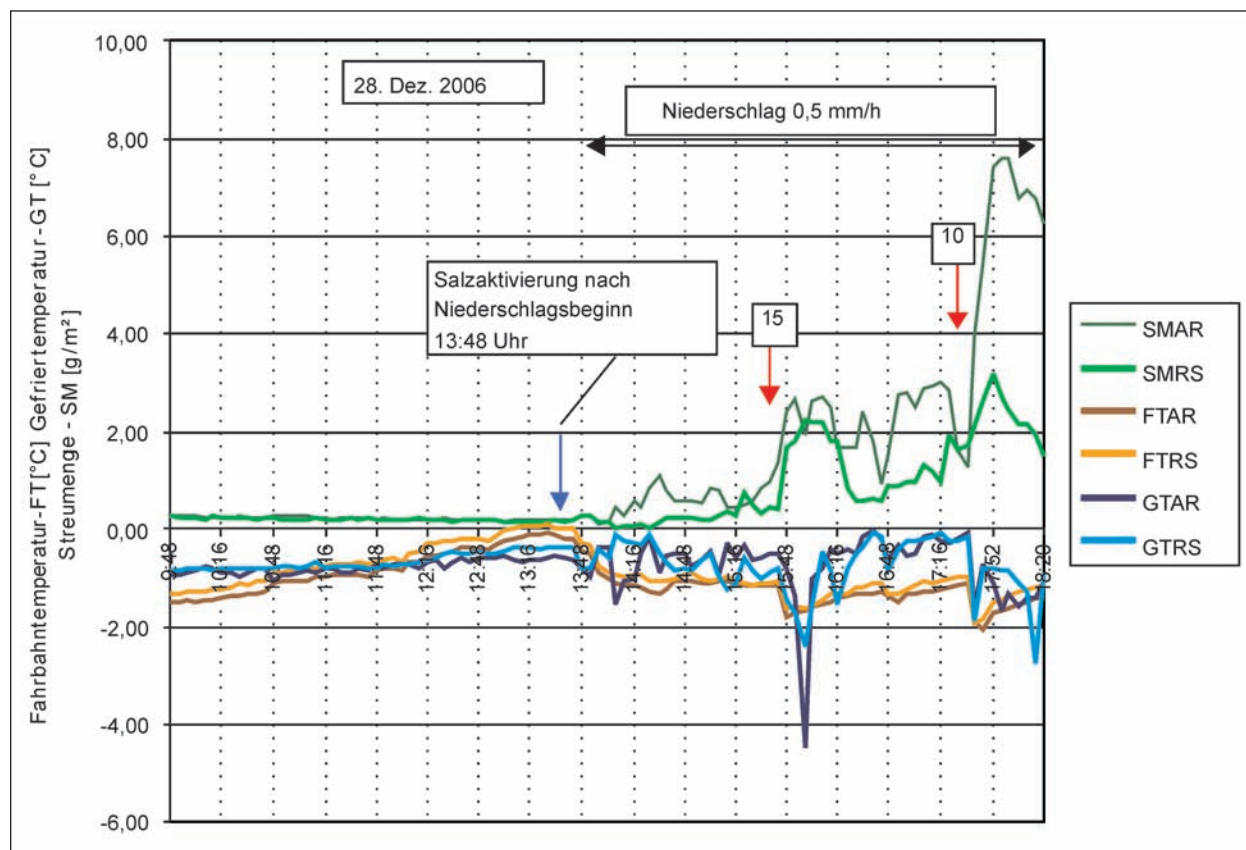


Bild 48: Salzaktivierung nach Niederschlagsbeginn und die Wirkung anschließender Streuungen

9.5 Bedeckung der Sensoroberfläche unter winterlichen Bedingungen

Bei Labormessungen zur Feststellung der Messgenauigkeit werden Bedingungen geschaffen, die sich unter Praxisbedingungen nicht wiederholen. Insbesondere ein homogener Flüssigkeitsfilm ist oft nicht vorhanden.

Die Sensoroberfläche wird durch die Reifen nach kurzer Zeit sehr glatt gefahren. man kann von einer polierten Oberfläche sprechen. Das führt dazu, dass Flüssigkeit auf der Sensoroberfläche zur Perlenbildung neigt (Bild 49). Damit entsteht bei geringem Flüssigkeitsaufkommen kein homogener Flüssigkeitsfilm. Die exakte Messung der Wasserfilmdicke und der Leitfähigkeit ist bei diesem Zustand nicht möglich. Diese Feststellung beruht auf sporadischen Beobachtungen.

Durch Fahrzeugüberfahrten wird der Flüssigkeitsfilm ver gleichmäßig. Allerdings wird gleichzeitig sofort Flüssigkeit vom Sensor entfernt. Die Auswirkungen auf die Dauermessungen können nicht abgeschätzt werden.



Bild 49: Inhomogene Benetzung mit Sole

Streumaterial wird auf der Sensoroberfläche ungleichmäßig verteilt und bei geringer Feuchte entsteht kein geschlossener Film über den Elektroden des Sensors (Bild 50).

Auch bei Schneematsch ist mit einer gleichmäßigen Überdeckung der Sensoren nicht in jedem Fall zu rechnen (Bilder 51, 52).

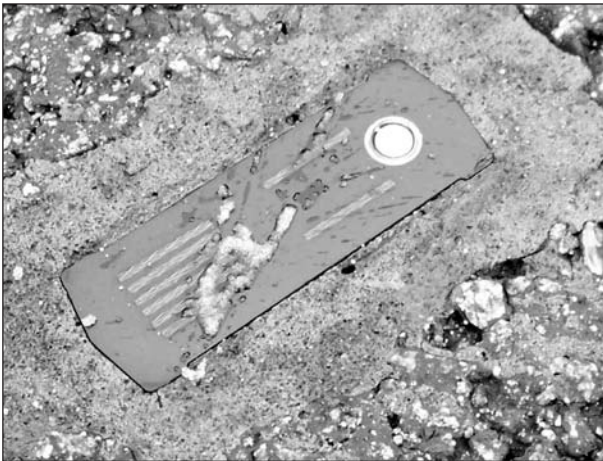


Bild 50: Siedesalz als FS 30 direkt nach Streuung



Bild 51: Leichte Matschbedeckung am 24.01.2007, 8:31 Uhr



Bild 52: Matschüberdeckung am 24.01.2007, 9.14 Uhr

10 Auswertung der Streuvorgänge

10.1 Untersuchte Vorgänge

Die für das Forschungsvorhaben ausgewerteten Streuvorgänge sind in einer Gesamtliste zusammengestellt. Für die Analyse der Verweildauer des Streusalzes auf der Fahrbahn werden die Aufzeichnungen des Fahrpersonals mit Wetterdaten, Fahrbahndaten und Verkehrsdaten kombiniert. Für eine einheitliche Analyse der Ganglinien der Salzmenge auf der Fahrbahn wurden aus dem Diagramm bzw. der tabellarischen Protokollierung jedes Streuvorganges charakteristische Daten selektiert. Damit wurde es möglich, aus der Vielzahl sehr unterschiedlicher Datenaufzeichnungen allgemeingültige Schlussfolgerungen abzuleiten. Die Daten wurden so ausgewählt, dass sie in der weiteren Verarbeitung eine Aufbereitung unter verschiedenen Aspekten ermöglichen. Wichtig erschien dabei insbesondere, dass der Einfluss der Verkehrsstärke, der Reifenkontakte mit der Fahrbahn und der Flüssigkeitsmengen auf der Fahrbahn deutlich gemacht werden kann.

Dazu wurden folgende Kennwerte definiert (Bild 53):

- Salzmenge SM in g/m^2 als Anzeigewert der Sensormessung zu den definierten Zeiten,
- Reaktionszeit t_R in min. als Zeitraum von der Streuung bis zum Zeitpunkt der ersten Steigerung der Anzeige für die Salzmenge,
- Zeit bis zum Wirkungsmaximum t_{max} als Zeitraum von der Streuung bis zum angezeigten Maximalwert der gelösten Salzmenge,
- Gesamtzeit der Analyse t_{Ges} als Zeitraum von der Streuung bis zum Ende des Analysezeitraumes. Das Ende des Analysezeitraumes ist erreicht, wenn eine Folgestreuung durchgeführt wird, wenn die Werte für die Salzmenge null erreicht haben oder wenn die angezeigte Salzmenge auf geringstem Niveau ($< 0,2 g/m^2$) stagniert.

Bei einem Teil der Kennwerte wird außerdem unterschieden, ob die Messung außerhalb (AR) oder innerhalb (RS) der Rollspur erfolgte. Damit kann ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Verteilung und die Wirkungszeit von Tausalz differenziert betrachtet und analysiert werden.

In der Gesamtliste sind die auswertbaren Streuvorgänge zusammengestellt und mit den für die Auswertung notwendigen Daten ergänzt. Zeiträume, in denen Lkw-Fahrverbot bestand, sind ausgewiesen, damit Aussagen über den Verkehrseinfluss möglich sind. Weiterhin ist die spezifische Niederschlagsmenge während des Analysezeitraumes als Mittelwert in mm/h angegeben

(Tabelle 6). Als „Typ“ ist der Einsatzanlass angegeben:

- PR – Präventivstreuung,
- SF – Schneefall,
- SR – Schneeregen,
- SM – Schneematsch.

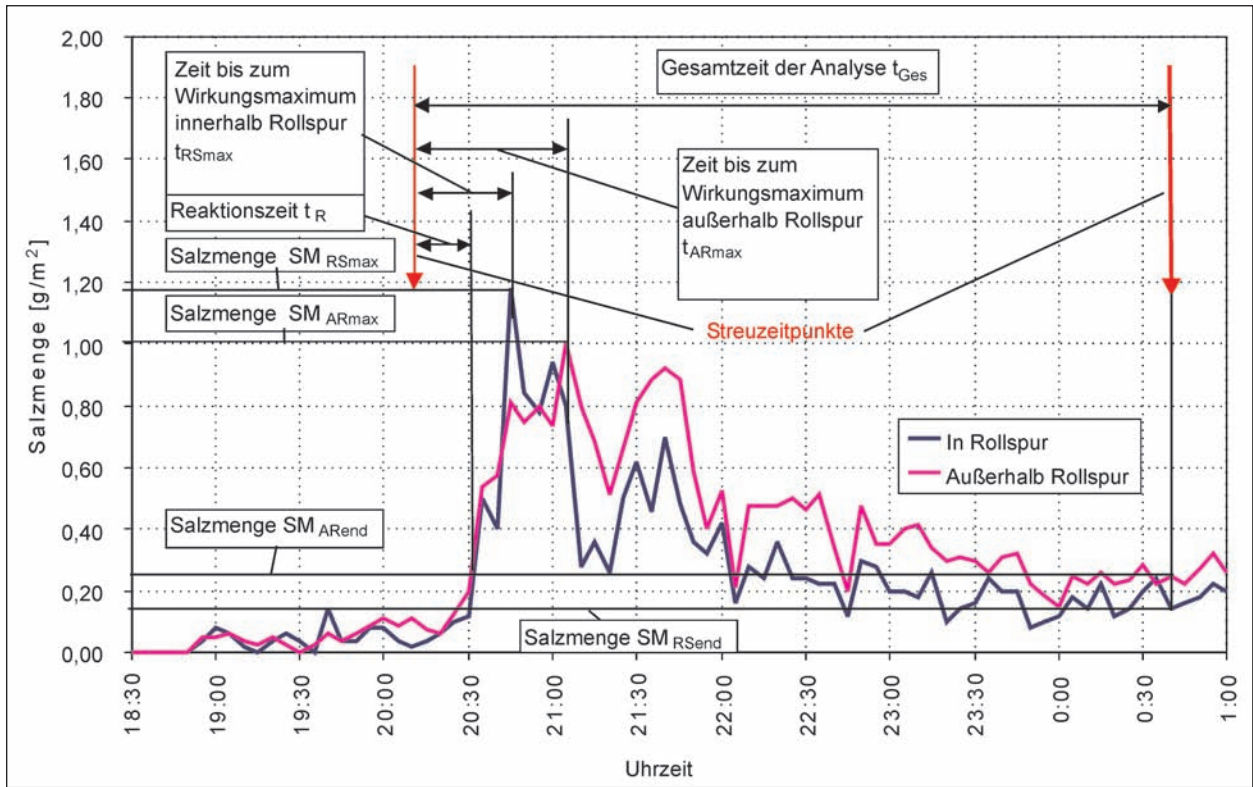


Bild 53: Auswertungsschema der Ganglinien für die auf der Fahrbahn gelöste Salzmenge

Tag	Monat	Jahr	Uhrzeit	Streuchichte	maximal gelöste Salzmenge außerhalb Radspur	maximal gelöste Salzmenge in Radspur	Zeit bis Wirkungsmaximum außerhalb Radspur	Zeit bis Wirkungsmaximum in Radspur	Salzmenge außerhalb Radspur am Ende des Analysezeitraumes	Salzmenge in Radspur am Ende des Analysezeitraumes	Dauer des Analysezeitraumes	mittl. Fahrbahntemp. außerhalb Radspur	Niederschlag	Typ	Tage mit Fahrverbot LKW
				g/m ²	SM _{ARmax} g/m ²	SM _{RSmax} g/m ²	t _{ARmax} min.	t _{RSmax} min.	SM _{AREnd} g/m ²	SM _{RSEnd} g/m ²	t _{GES} min.	FT _{AR} °C	mm/h		ja x
11	12	2006	2:15	10,0	0,1	0,0	73	81	0,0	0,0	240	-1,5	0,0	PR	x
24	12	2006	16:45	5,0	0,1	0,1	43	45	0,0	0,0	135	-0,2	0,0	PR	x
24	12	2006	20:35	5,0	0,3	0,4	77	77	0,2	0,2	230	0,9	0,1	SF	x
24	12	2006	3:35	5,0	0,1	0,1	210	13	0,0	0,0	480	0,8	0,0	PR	x
25	12	2006	21:00	5,0	0,1	0,1	12	8	0,0	0,0	475	1,5	0,0	PR	x
25	12	2006	0:55	5,0	1,3	0,5	13	13	0,3	0,1	193	-0,8	0,1	SF	x
25	12	2006	4:10	5,0	0,7	0,3	10	26	0,0	0,0	420	1,0	0,1	SF	x
26	12	2006	4:55	5,0	0,3	0,2	92	44	0,2	0,1	218	2,0	0,0	PR	x
26	12	2006	8:36	5,0	0,2	0,2	132	192	0,2	0,2	264	1,5	0,0	PR	x
27	12	2006	0:40	5,0	0,2	0,1	10	10	0,1	0,1	180	-3,2	0,0	PR	
27	12	2006	3:40	5,0	0,5	0,3	330	390	0,1	0,0	660	-3,0	0,0	PR	
27	12	2006	20:06	10,0	0,3	0,3	22	6	0,2	0,1	274	-3,5	0,0	PR	
28	12	2006	0:40	5,0	0,3	0,2	12	20	0,2	0,2	210	-2,5	0,0	PR	
28	12	2006	4:10	5,0	0,4	0,5	10	15	0,2	0,2	578	-1,6	0,0	PR	
28	12	2006	15:40	20,0	3,0	2,3	140	140	1,3	1,7	110	-1,0	0,5	SF	
28	12	2006	17:30	10,0	7,6	3,2	20	15	6,2	2,0	75	-1,0	0,5	SF	
29	12	2006	20:12	10,0	0,2	0,2	5	5	0,0	0,1	218	-1,6	0,0	PR	
29	12	2006	23:50	8,0	0,2	0,3	10	10	0,2	0,2	60	-1,8	0,0	PR	
30	12	2006	0:50	8,0	0,3	0,2	5	5	0,1	0,2	433	-2,1	0,0	PR	

Tab. 6: Gesamtliste ausgewerteter Streuvorgänge

Tag	Monat	Jahr	Uhrzeit	Streu- dichte	maximal gelöste Salzmenge außerhalb Radspur	maximal gelöste Salzmenge in Radspur	Zeit bis Wirkungs- maximum außerhalb Radspur	Zeit bis Wirkungs- maximum in Radspur	Salzmenge außerhalb Radspur am Ende des Analyse- zeitraumes	Salzmenge in Radspur am Ende des Analyse- zeitraumes	Dauer des Analyse- zeitraumes	mittl. Fahrbahn- temp. außerhalb Radspur	Nieder- schlag	Typ	Tage mit Fahr- verbot LKW
				g/m ²	SM _{AR} max	SM _{RS} max	t _{AR} max	t _{RS} max	SM _{AR} end	SM _{RS} end	t _{GES}	FT _{AR}	mm/h		ja x
30	12	2006	8:03	5,0	0,6	0,3	40	30	0,2	0,1	744	1,0	0,2	SR	
31	12	2006	1:10	5,0	0,4	0,5	10	60	0,1	0,1	530	3,0	0,1	SR	x
8	1	2007	6:46	15,0	0,3	0,3	5	7	0,3	0,1	37	1,0	0,0	PR	
15	1	2007	5:30	10,0	0,1	0,1	30	15	0,0	0,0	130	-0,1	0,0	PR	
22	1	2007	21:40	20,0	0,7	0,4	20	10	0,2	0,2	150	-1,5	0,0	PR	
22	1	2007	19:53	10,0	0,5	0,4	20	35	0,2	0,3	47	1,5	1,5	SR	
22	1	2007	20:40	10,0	0,3	0,4	30	10	0,2	0,2	60	0,4	1,5	SR	
23	1	2007	0:10	5,0	0,3	0,4	10	25	0,2	0,3	249	-3,5	0,0	PR	
23	1	2007	4:19	5,0	0,3	0,3	110	90	0,2	0,2	275	-5,0	0,0	PR	
23	1	2007	8:54	5,0	0,4	0,4	5	45	0,0	0,0	761	-2,0	0,0	PR	
23	1	2007	21:35	20,0	0,1	0,1	70	20	0,1	0,0	153	-2,6	0,0	PR	
24	1	2007	0:40	10,0	0,5	0,6	20	15	0,5	0,5	29	-2,9	0,2	SF	
24	1	2007	1:09	15,0	0,5	0,9	5	5	0,4	0,6	45	-3,0	0,2	SF	
24	1	2007	1:54	7,5	0,8	0,9	10	5	0,3	0,0	26	-3,1	0,2	SF	
24	1	2007	2:53	20,0	5,6	6,4	7	25	4,1	6,4	31	-3,7	1,0	SF	
24	1	2007	3:24	7,5	8,8	6,3	25	6	3,5	3,5	66	-3,5	1,0	SF	
24	1	2007	4:30	17,5	9,3	6,4	20	20	4,5	3,6	10	-3,6	1,0	SF	
24	1	2007	4:40	25,0	9,3	6,4	20	20	4,5	3,6	60	-3,6	1,0	SF	
24	1	2007	5:40	10,0	8,2	5,6	10	15	1,8	1,8	5	-3,5	1,0	SF	
24	1	2007	5:45	20,0	8,2	5,6	10	15	1,8	1,8	90	-3,5	1,0	SF	
24	1	2007	7:15	20,0	3,8	3,0	30	45	2,6	2,4	45	-3,8	1,0	SF	
24	1	2007	8:10	20,0	6,1	3,5	20	25	1,2	1,3	36	-3,6	1,0	SF	
24	1	2007	9:41	12,5	5,2	1,6	19	19	2,6	1,6	29	-3,1	1,0	SF	
24	1	2007	11:00	25,0	4,1	1,6	5	0	1,7	1,0	57	-3,0	1,0	SF	
24	1	2007	13:20	20,0	5,0	3,1	10	5	1,7	0,5	65	-3,0	1,0	SF	
24	1	2007	14:25	30,0	2,1	1,8	5	5	1,6	0,4	65	-2,8	1,0	SF	
24	1	2007	15:30	40,0	3,1	7,2	5	5	1,1	2,0	50	-3,4	1,0	SF	
24	1	2007	16:20	30,0	2,2	2,0	5	5	0,4	1,4	130	-3,1	1,0	SF	
24	1	2007	18:30	20,0	1,1	2,3	40	60	0,4	2,1	85	-4,0	1,0	SF	
24	1	2007	19:55	35,0	0,6	2,6	5	20	0,5	1,8	34	-4,0	1,0	SF	
24	1	2007	20:29	25,0	3,5	3,8	34	34	3,5	3,8	21	-4,2	1,0	SF	
24	1	2007	20:55	30,0	4,5	2,1	40	50	1,5	0,6	60	-4,3	1,0	SF	
24	1	2007	21:55	35,0	2,6	2,1	20	10	1,2	1,3	20	-4,4	1,0	SF	
24	1	2007	22:15	10,0	2,7	2,6	50	45	1,9	2,0	56	-4,1	1,0	SF	
24	1	2007	23:11	25,0	5,2	3,5	30	25	1,6	1,0	139	-4,0	1,0	SF	
25	1	2007	16:20	10,0	2,4	0,8	20	35	2,0	0,4	40	-2,0	0,0	PR	
25	1	2007	18:50	8,0	4,1	0,5	5	5	0,4	0,1	145	-3,2	0,0	PR	
25	1	2007	21:15	7,0	0,6	0,2	10	5	0,6	0,2	15	-3,3	0,0	SF	
25	1	2007	4:45	10,0	2,7	2,4	15	10	2,4	1,3	16	-6,0	0,0	SF	
25	1	2007	5:01	10,0	2,6	2,8	15	10	1,8	0,6	224	-5,0	0,0	SF	
25	1	2007	8:45	15,0	3,3	1,2	30	15	2,9	0,7	18	-3,0	0,0	SF	
25	1	2007	9:03	5,0	2,8	1,3	10	12	0,7	0,2	160	0,0	0,0	SF	
25	1	2007	17:00	10,0	3,1	1,1	60	10	2,7	0,3	110	-2,3	0,0	SF	
25	1	2007	21:30	15,0	1,7	0,6	30	35	0,6	0,2	55	-4,0	0,0	SF	
25	1	2007	22:25	15,0	0,7	0,6	10	140	0,6	0,4	161	-6,0	0,0	SF	
25	1	2007	1:30	20,0	3,0	2,3	20	20	3,0	2,3	31	-4,6	0,5	SF	
25	1	2007	2:01	20,0	5,9	5,7	15	10	1,8	1,1	164	-5,1	0,5	SF	
25	1	2007	12:00	10,0	3,6	2,9	30	30	2,4	0,6	260	-0,5	1,0	SF	
25	1	2007	11:43	5,0	0,7	0,5	5	5	0,5	0,4	17	1,5	1,0	SF	
26	1	2007	3:15	5,0	0,5	0,4	5	20	0,3	0,2	330	-9,0	0,0	PR	
26	1	2007	1:06	10,0	0,8	0,5	10	30	0,5	0,2	129	-8,0	0,0	SF	
26	1	2007	8:45	5,0	0,4	0,4	30	30	0,4	0,3	38	-8,0	0,0	SF	
26	1	2007	9:23	5,0	1,8	0,4	180	80	0,0	0,0	330	-4,0	0,0	SF	
26	1	2007	19:50	8,0	2,2	2,4	10	10	1,3	1,1	40	-3,5	0,1	SF	
26	1	2007	20:30	20,0	2,4	5,0	40	40	4,4	2,3	75	-3,5	0,1	SF	
26	1	2007	21:45	15,0	1,7	4,5	20	10	2,2	2,4	25	-3,5	0,1	SF	
26	1	2007	22:10	8,0	5,0	2,8	10	10	5,0	2,8	15	-3,5	0,1	SF	
26	1	2007	22:25	7,0	5,4	4,4	5	5	3,7	2,4	20	-3,5	0,1	SF	
26	1	2007	22:45	15,0	3,7	2,4	5	5	1,6	1,4	25	-3,5	0,1	SF	
26	1	2007	23:10	10,0	2,7	1,7	5	10	2,2	0,6	60	-3,6	0,2	SF	
27	1	2007	9:15	5,0	0,9	0,5	20	5	0,0	0,0	175	-0,6	0,0	PR	
27	1	2007	12:12	20,0	0,7	1,5	70	28	0,1	0,2	418	-0,5	0,0	PR	
27	1	2007	20:20	8,0	0,4	0,4	45	35	0,0	0,0	110	-2,8	0,0	PR	
27	1	2007	6:30	10,0	1,2	1,4	20	30	0,6	0,8	115	-2,1	0,0	SF	
27	1	2007	8:25	5,0	0,9	0,8	15	5	0,7	0,6	50	-1,5	0,0	SF	
27	1	2007	19:10	10,0	0,2	0,4	70	70	0,2	0,4	70	-3,5	0,0	SF	
27	1	2007	23:50	20,0	0,6	2,0	0	10	0,5	1,5	20	-1,8	0,1	SF	
27	1	2007	0:10	20,0	3,6	1,1	20	50	2,2	0,9	70	-3,5	0,4	SF	
27	1	2007	1:40	10,0	4,0	2,7	25	10	2,0	2,6	45	-3,1	0,4	SF	
27	1	2007	2:25	8,0	4,3	3,1	20	5	3,3	2,9	110	-2,9	0,4	SF	

Tab. 6: Gesamtliste ausgewerteter Streuvorgänge – Fortsetzung –

Tag	Monat	Jahr	Uhrzeit	Streu- dichte	maximal geloste Salzmengen außerhalb Radspur	maximal geloste Salzmengen in Radspur	Zeit bis Wirkungs- maximum außerhalb Radspur	Zeit bis Wirkungs- maximum in Radspur	Salzmengen außerhalb am Ende des Analyse- zeitraumes	Salzmengen in am Ende des Analyse- zeitraumes	Ende des Analyse- zeitraumes	mittl. Fahrbahn- temp. außerhalb Radspur	Nieder- schlag	Typ	Tage mit Fahr- verbot LKW
				g/m ²	SM _{AR} max g/m ²	SM _{RS} max g/m ²	t _{AR} max min.	t _{RS} max min.	SM _{AR} end g/m ²	SM _{RS} end g/m ²	t _{GES} min.	FT _{AR} °C	mm/h		ja x
27	1	2007	4:15	20,0	7,5	4,5	10	5	4,3	4,5	10	-2,5	0,4	SF	
27	1	2007	4:25	8,0	7,6	3,4	5	10	7,5	2,1	17	-2,5	0,4	SF	
27	1	2007	4:42	20,0	4,0	4,0	13	28	1,0	0,6	98	-2,2	0,4	SF	
28	1	2007	7:30	10,0	0,5	0,4	5	5	0,3	0,7	110	-0,7	0,0	PR	x
28	1	2007	20:06	8,0	0,5	0,7	35	5	0,3	0,5	43	1,0	0,0	PR	x
28	1	2007	20:49	15,0	0,7	0,7	10	10	0,1	0,2	41	1,2	0,0	PR	x
28	1	2007	21:30	8,0	0,9	0,6	5	20	0,5	0,3	35	1,3	0,0	PR	x
28	1	2007	0:10	5,0	0,9	2,3	5	10	0,1	0,3	298	-1,4	0,0	SF	x
28	1	2007	5:42	8,0	1,4	1,1	17	17	0,5	0,3	108	-1,2	0,0	SF	x
28	1	2007	5:08	8,0	2,2	3,2	5	25	1,3	1,4	34	-1,7	0,1	SF	x
28	1	2007	22:05	10,0	1,1	1,4	55	20	0,0	0,0	230	1,5	0,2	SF	x
28	1	2007	9:20	10,0	0,4	0,9	0	0	0,2	0,2	390	1,0	0,3	SR	x
28	1	2007	19:32	15,0	3,1	2,8	5	19	0,7	0,3	34	0,9	0,5	PR	x
28	1	2007	17:05	8,0	1,7	1,2	5	5	0,6	0,6	60	-0,2	2,0	SF	x
28	1	2007	18:05	20,0	4,6	4,1	55	60	3,3	4,1	70	-0,6	2,0	SF	x
29	1	2007	21:00	15,0	1,3	0,7	15	35	0,4	0,3	202	1,4	0,0	PR	
30	1	2007	0:22	5,0	1,7	0,5	23	58	0,3	0,2	126	1,3	0,0	PR	
30	1	2007	2:28	5,0	0,3	0,2	17	12	0,3	0,2	112	1,2	0,0	PR	
30	1	2007	4:20	5,0	0,6	0,5	20	20	0,0	0,0	960	1,5	0,0	PR	
30	1	2007	20:20	8,0	0,3	0,3	5	0	0,0	0,0	390	2,8	0,0	PR	
5	2	2007	2:35	10,0	0,2	0,2	125	70	0,1	0,1	160	-0,5	0,0	PR	
5	2	2007	5:15	10,0	0,3	0,2	15	10	0,0	0,0	295	-0,6	0,0	PR	
5	2	2007	21:21	10,0	0,7	1,0	15	24	0,0	0,0	860	0,5	0,0	PR	
5	2	2007	20:34	20,0	1,1	1,1	11	11	0,3	0,5	47	1,0	1,2	SR	
9	2	2007	4:30	7,5	1,2	1,7	60	70	0,3	0,2	210	0,8	0,0	PR	
19	2	2007	5:18	5,0		0,2	70	75	0,2	0,0	270	3,0	0,0	PR	
17	11	2007	01:20	10,0	0,9	0,8	5	5	0,5	0,7	140	1,2	0,1	SR	
17	11	2007	03:40	10,0	1,5	2,9	30	110	0,7	1,5	135	1,3	0,1	SR	
17	11	2007	03:50	10,0	1,5	2,9	30	110	0,7	1,5	135	1,3	0,1	SR	
17	11	2007	06:05	5,0	2,2	2,6	0	10	0,1	0,1	425	2,0	0,1	SR	
19	11	2007	04:25	10,0	0,8	0,6	30	60	0,5	0,6	70	-1,9	0,0	PR	
19	11	2007	05:35	10,0	0,7	0,6	25	40	0,7	0,5	145	-1,6	0,0	PR	
22	11	2007	05:00	5,0	0,3	0,4	50	25	0,3	0,3	60	-0,3	0,0	PR	
23	11	2007	05:05	5,0	0,6	0,5	145	25	0,5	0,4	175	2,0	0,0	PR	
25	11	2007	08:15	10,0	7,5	3,5	20	20	4,8	1,4	35	-1,9	0,0	SF	x
25	11	2007	09:05	10,0	5,4	2,5	5	5	1,5	1,0	20	-1,6	0,0	SM	x
25	11	2007	05:10	10,0	3,4	2,4	140	155	2,8	2,3	185	-1,0	1,1	SF	x
26	11	2007	00:16	15,0	0,3	0,5	10	20	0,2	0,4	115	0,8	0,0	PR	
26	11	2007	04:35	20,0	0,9	1,7	30	15	0,7	0,6	215	0,1	0,0	PR	
27	11	2007	01:00	10,0	0,7	0,8	50	180	0,3	0,4	420	-0,6	0,0	PR	
28	11	2007	03:45	15,0	0,5	0,6	95	100	0,4	0,4	255	-4,0	0,0	PR	
29	11	2007	21:05	10,0	0,5	0,4	115	85	0,4	0,3	150	-0,3	0,0	PR	
30	11	2007	03:52	15,0	2,6	1,5	5	5	0,1	0,2	278		0,0	SF	
30	11	2007	00:25	10,0	1,8	2,0	0	20	1,2	1,3	35	-0,3	2,0	SF	
30	11	2007	00:50	20,0	1,6	1,7	10	35	1,6	1,7	38	-0,3	2,0	SF	
30	11	2007	01:28	25,0	3,4	3,2	5	0	1,3	2,2	42	-0,2	2,0	SF	
30	11	2007	02:10	25,0	2,9	3,3	30	15	2,5	2,9	52	-0,1	2,0	SF	
30	11	2007	03:02	15,0	2,9	2,9	5	0	2,2	1,2	50	0,5	2,0	SF	
9	12	2007	20:20	10,0	0,2	0,0	55	65	0,0	0,0	220	2,5	0,0	PR	x
10	12	2007	08:00	15,0	0,4	0,3	15	10	0,0	0,1	330	4,0	0,0	PR	
14	12	2007	18:55	15,0	0,8	0,6	75	25	0,4	0,4	365	-0,5	0,1	SF	
14	12	2007	13:45	10,0	0,4	0,2	50	50	0,2	0,2	175	1,5	0,2	SF	
14	12	2007	16:40	10,0	0,5	0,4	25	25	0,2	0,3	50	1,0	0,2	SF	
15	12	2007	01:00	7,0	0,7	0,6	0	0	0,4	0,5	65	-1,5	0,0	PR	
15	12	2007	02:05	5,0	0,6	0,5	5	0	0,3	0,4	90	-1,5	0,0	PR	
15	12	2007	05:05	40,0	0,6	0,5	15	25	0,5	0,5	65	-1,5	0,0	PR	
15	12	2007	08:10	5,0	0,6	0,5	10	10	0,5	0,4	180	-1,5	0,0	PR	
15	12	2007	08:35	15,0	0,5	0,4	0	0	0,5	0,4	0	-1,0	0,0	PR	
15	12	2007	03:30	7,0	0,6	0,5	50	50	0,4	0,5	90	-1,5	0,1	SF	
17	12	2007	00:15	10,0	0,7	0,7	30	30	0,5	0,5	205	-1,5	0,0	PR	
17	12	2007	02:45	8,0	0,7	0,5	40	50	0,5	0,5	190	-1,3	0,0	PR	
17	12	2007	05:50	5,0	0,7	0,6	60	20	0,6	0,5	140	-1,0	0,0	PR	
17	12	2007	20:54	5,0	0,4	0,2	70	70	0,4	0,2	90	-1,0	0,0	PR	
21	12	2007	0:40	5,0	0,5	0,3	15	15	0,3	0,3	260	-7,0	0,0	PR	
21	12	2007	5:05	10,0	0,5	0,4	10	10	0,4	0,3	65	-7,5	0,0	PR	
21	12	2007	20:10	15,0	0,2	0,1	10	10	0,2	0,0	150	-1,2	0,0	PR	
23	12	2007	00:25	10,0	0,4	0,4	40	10	0,2	0,3	260	-7,0	0,0	PR	x
23	12	2007	04:40	10,0	0,5	0,4	20	5	0,3	0,3	200	-7,5	0,0	PR	x
23	12	2007	09:15	10,0	0,8	0,5	150	80	0,0	0,0	300	-4,0	0,0	PR	x
24	12	2007	00:25	10,0	0,6	0,5	10	10	0,5	0,4	260	-4,0	0,0	PR	

Tab. 6: Gesamtliste ausgewerteter Streuvorgänge – Fortsetzung –

Tag	Monat	Jahr	Uhrzeit	Streu- dichte	maximal gelöste Salzmenge außerhalb Radspur	maximal gelöste Salzmenge in Radspur	Zeit bis Wirkungs- maximum außerhalb Radspur	Zeit bis Wirkungs- maximum in Radspur	Salzmenge außerhalb Radspur am Ende des Analyse- zeitraumes	Salzmenge in Radspur am Ende des Analyse- zeitraumes	Ende des Analyse- zeitraumes	mittl. Fahrbahn- temp. außerhalb Radspur	Nieder- schlag	Typ	Tage mit Fahr- verbot LKW
				g/m ²	SM _{ARmax} g/m ²	SM _{RSmax} g/m ²	t _{ARmax} min	t _{RSmax} min	SM _{ARend} g/m ²	SM _{RSend} g/m ²	t _{ges} min	FT _{AR} °C	mm/h		ja x
24	12	2007	04:45	10,0	0,7	0,6	10	10	0,4	0,4	210	-3,7	0,0	PR	
24	12	2007	08:15	8,0	0,8	0,6	35	5	0,7	0,6	70	-3,5	0,0	PR	
24	12	2007	08:20	5,0	0,8	0,6	35	5	0,7	0,6	70	-3,5	0,0	PR	
24	12	2007	20:22	10,0	0,5	0,8	15	10	0,4	0,3	722	-1,9	0,0	PR	
25	12	2007	08:25	8,0	0,8	0,8	25	25	0,5	0,7	32	-5,0	0,0	PR	
25	12	2007	19:34	8,0	0,6	0,6	20	5	0,4	0,4	360	-5,5	0,0	PR	
26	12	2007	01:50	20,0	0,7	1,1	10	10	0,5	0,5	415	-6,0	0,0	PR	
28	12	2007	20:28	8,0	0,5	1,0	230	435	0,5	0,6	480	-4,0	0,0	PR	
27	12	2007	04:25	15,0	1,0	1,0	260	120	0,8	0,7	310	-3,0	0,0	PR	
28	12	2007	04:45	15,0	1,1	1,5	110	80	0,8	0,7	255	-2,0	0,0	PR	
29	12	2007	03:15	15,0	0,3	0,5	15	10	0,6	0,5	30	-4,5	0,0	PR	
29	12	2007	03:35	15,0	0,7	0,6	160	5	0,6	0,5	360	-5,0	0,0	PR	
30	12	2007	00:28	5,0	0,4	0,4	5	5	0,3	0,3	165	-3,0	0,0	PR	x
30	12	2007	03:30	5,0	0,5	0,4	5	5	0,2	0,1	210	-3,0	0,0	PR	x
31	12	2007	01:42	15,0	3,2	3,2	5	5	0,2	0,3	220	-0,5	0,5	SF	
31	12	2007	05:02	10,0	0,5	0,7	10	10	0,3	0,4	60	0,0	0,5	SF	
31	12	2007	00:05	15,0	2,7	2,1	10	10	2,5	1,4	95	-1,0	1,0	SF	
1	1	2008	00:38	5,0	0,5	0,4	150	5	0,2	0,3	260	-1,0	0,0	PR	x
1	1	2008	13:45	15,0	1,4	2,0	10	15	1,4	2,0	15	0,2	0,0	PR	x
1	1	2008	05:00	15,0	0,6	0,5	75	75	0,3	0,2	300	0,6	0,0	SF	x
2	1	2008	00:25	15,0	1,9	0,8	0	15	1,3	0,9	35	-3,0	0,0	SM	
2	1	2008	01:00	10,0	1,7	1,2	35	25	0,9	0,4	130	-4,0	0,0	SM	
2	1	2008	03:08	15,0	1,8	1,0	15	35	1,3	0,9	125	-4,0	0,0	SM	
2	1	2008	05:15	15,0	1,9	1,6	60	100	0,9	0,9	165	-3,0	0,0	SM	
6	1	2008	00:45	10,0	0,9	0,8	20	60	0,4	0,5	90	-4,1	0,0	PR	x
6	1	2008	21:20	7,5	0,4	0,7	20	20	0,3	0,5	290	0,0	0,0	SF	x
6	1	2008	16:20	8,0	1,6	1,4	90	65	0,2	0,2	140	0,5	0,3	SF	x
6	1	2008	18:40	10,0	0,9	1,1	80	20	0,3	0,6	100	0,5	0,3	SF	x
6	1	2008	21:20	8,0	0,4	0,7	20	20	0,3	0,5	290	0,5	0,3	SF	x
6	1	2008	04:20	15,0	7,4	5,8	190	105	2,1	2,1	240	-3,5	1,0	SF	x
7	1	2008	01:10	15,0	0,6	1,2	20	40	0,3	0,7	190	-1,0	0,0	SF	
7	1	2008	04:20	10,0	0,9	1,1	30	30	0,9	0,4	200	-3,0	0,0	SF	
31	1	2008	2:40	10,0	0,2	0,4	10	10	0,3	0,3	50	1,7	0,0	PR	
20	2	2008	04:47	5,0	0,1	0,1	80	90	0,0	0,0	180	-1,0	0,0	PR	
5	3	2008	00:23	40,0	0,8	0,9	25	30	0,7	0,9	30	0,5	0,0	PR	
5	3	2008	04:23	5,0	0,8	0,9	0	0	0,5	0,5	165	-1,0	0,0	PR	
14	3	2008	4:40	8,0	0,5	0,5	40	25	0,4	0,4	100	1,0	0,0	PR	
18	3	2008	17:45	20,0	4,3	2,3	50	50	4,1	1,6	60	0,0	0,1	SF	
18	3	2008	18:45	20,0	5,7	2,4	45	20	3,2	0,9	55	0,0	0,1	SF	
18	3	2008	19:40	10,0	2,6	1,5	15	30	1,2	0,9	60	-1,0	0,1	SF	
19	3	2008	10:20	10,0	0,6	1,4	5	30	0,5	0,7	100	3,0	0,0	PR	
19	3	2008	20:10	10,0	0,8	0,6	30	15	0,3	0,3	200	-0,6	0,0	SF	
19	3	2008	14:30	15,0	1,6	1,2	0	5	0,2	0,2	110	4,0	0,2	SF	
19	3	2008	17:40	20,0	0,6	0,7	45	50	0,4	0,4	60	0,0	0,2	SF	
19	3	2008	18:40	20,0	3,1	3,3	5	15	0,4	0,6	90	-0,2	0,2	SF	
20	3	2008	03:30	10,0	1,5	1,4	10	35	0,4	1,1	40	-1,7	0,0	PR	
23	3	2008	00:15	10,0	0,7	1,2	5	25	0,6	1,0	35	1,3	0,0	PR	x
23	3	2008	03:20	15,0	0,4	0,9	25	25	0,2	0,4	80	1,0	0,0	PR	x
23	3	2008	04:40	25,0	4,5	6,7	60	50	4,4	1,6	60	-1,0	1,0	SF	x
25	3	2008	16:05	10,0	0,6	0,8	5	20	0,3	0,6	45	2,0	0,0	PR	
25	3	2008	06:00	10,0	5,3	3,0	135	140	4,1	5,3	140	-0,5	0,5	SF	
25	3	2008	16:50	10,0	1,3	1,0	90	35	0,7	0,7	110	-1,8	0,5	SF	
25	3	2008	18:40	30,0	3,8	3,4	10	5	1,8	0,9	125	-2,0	0,5	SF	
25	3	2008	20:50	30,0	2,2	1,4	40	25	2,0	1,2	80	-2,0	0,5	SF	
26	3	2008	00:15	10,0	1,7	1,4	5	15	0,7	1,2	60	-1,7	0,0	PR	
26	3	2008	01:15	10,0	2,0	1,6	40	0	2,1	0,4	45	-1,7	0,0	PR	
26	3	2008	07:30	5,0	0,7	0,9	5	45	0,0	0,0	140	2,0	0,0	PR	
26	3	2008	02:00	10,0	4,2	4,0	5	10	3,4	2,8	40	-2,0	0,5	SF	
26	3	2008	02:45	25,0	3,3	4,0	5	10	2,7	3,4	25	-2,0	0,5	SF	
26	3	2008	03:15	20,0	2,7	3,5	0	10	1,4	2,2	30	-2,0	0,5	SF	

Tab. 6: Gesamtliste ausgewerteter Streuvorgänge – Fortsetzung –

10.2 Zusammenfassende Auswertung der Messergebnisse

10.2.1 Charakteristik der untersuchten Winterdienstsituationen

Das Messfeld wurde in der Winterdienstsaison 2006/2007 vom 6. Dezember 2006 bis zum 5. April 2007 und in der Winterdienstsaison 2007/2008 vom 17. November 2007 bis zum 26. März 2008 betrieben. Innerhalb dieser Zeiträume wurden ca. 300 Streuungen durchgeführt. Davon wurden 217 Streuungen detailliert ausgewertet.

Die Differenz kommt durch folgende Gründe zustande:

- unvollständige Aufzeichnungen des Fahrpersonals,
- notierte Streuungen durch Messwerte nicht nachweisbar,
- lückenhafte Datenübertragung im Auswertzeitraum,
- keine Einzelauswertung der Daten, da sehr geringer zeitlicher Abstand zwischen den Streuvorgängen (< 20 min.).

Trotz der milden Winter konnte eine relativ große Zahl interessanter Einzelinformationen gesammelt werden. Allerdings traten nur an wenigen Tagen stärkere Schneefälle auf und es gab kaum Temperaturen unter -5°C .

Der wesentliche Teil der auszuwertenden Ereignisse bezieht sich auf präventive Streuungen bei erwarteter Reifglätte oder überfrierender Nässe und auf die große Zahl von Streuungen innerhalb weniger Tage bei den Niederschlagsereignissen.

Für die weitere Analyse wird die Fahrsituation, bei der Streuungen durchgeführt werden, wie folgt typisiert:

- Fahrbahn trocken oder leicht feucht (max. 0,04 mm Wasserfilm),
- Fahrbahn nass oder mit geringem Schnee- oder Matschbelag – kein Pflugeinsatz,
- räumfähiger Schnee- oder Matschbelag – Pflugeinsatz.

Die untersuchten Streuvorgänge verteilten sich gemäß Sensormessung wie in Tabelle 7 dargestellt.

Typ	Einsätze	Kalendertage
A	99	50
B	55	24
C	63	12

Tab. 7: Zahl der Streueinsätze unterteilt nach Fahrsituationen

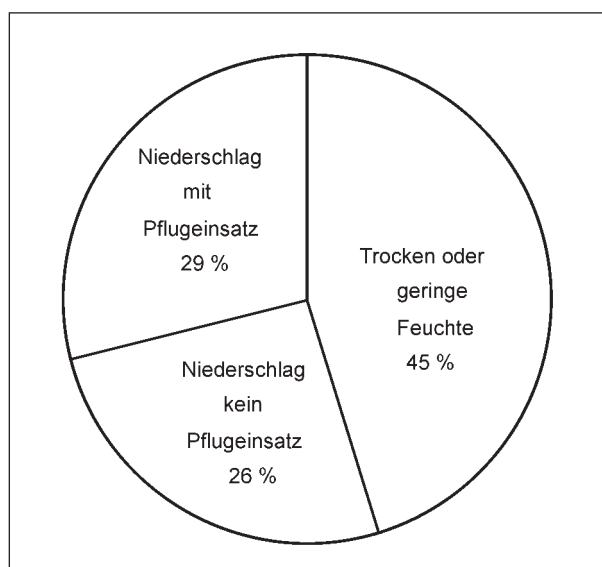


Bild 54: Anteile der Fahrsituationen während der untersuchten Streuungen nach der Zahl der Einsätze

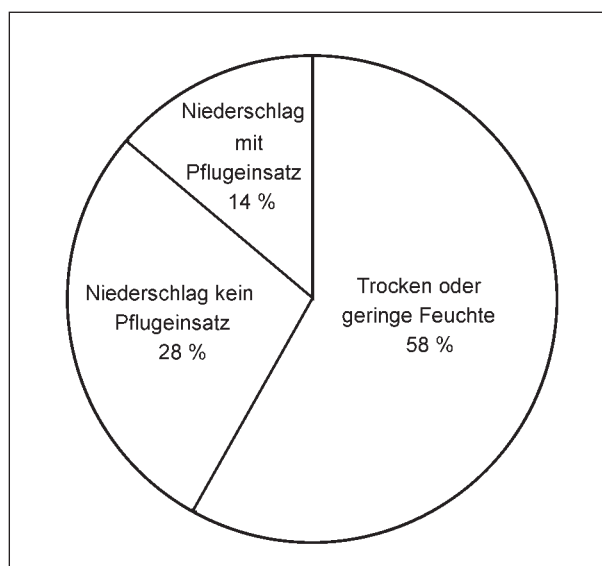


Bild 55: Anteile der Fahrsituationen während der untersuchten Streuungen nach der Zahl der Kalendertage

Prozentual ergibt sich daraus die in den Bildern 54 und 55 dargestellte Verteilung.

Es ist deutlich zu erkennen, dass ein ganz erheblicher Anteil der Einsätze in Situationen durchgeführt wird, bei denen kaum Feuchtigkeit auf der Straße vorhanden ist. Obwohl durchgängig mit FS 30 ge-

arbeitet wurde, fehlt Flüssigkeit, um die Trockenkomponente des Streustoffes in Lösung zu bringen. Diese Teile des Streustoffes konnten mit der angewandten Messmethode nicht bestimmt werden. Das bedeutet aber auch, dass dieser Teil des Streustoffes vollkommen wirkungslos bleibt, wenn keine Flüssigkeit (Niederschlag) innerhalb kurzer Zeit auf der Fahrbahn auftrifft.

10.2.2 Streustoffeinsatz

Bei allen untersuchten Streuungen wurde mit Feuchtsalztechnologie FS 30 gearbeitet. Die Befuchtung der Trockenkomponente NaCl erfolgte in der Winterdienstperiode 2006/07 generell mit MgCl₂-Lösung. In der Winterdienstperiode 2007/08 war eine der beteiligten Autobahnmeistereien (AM Dresden-Hellerau) auf NaCl-Lösung umgestellt.

Die aus den Aufzeichnungen ermittelte durchschnittliche Streudichte über alle untersuchten Streuungen betrug 12,01 g/m². Bei einer Differenzierung der Fahrbahnsituationen nach Kapitel 10.2.1 werden die in Tabelle 8 dargestellten durchschnittlichen Streudichten ermittelt.

10.2.3 Maximal gelöste Streustoffmenge

Für die Frage, wie viel Salz für die Glättebekämpfung erforderlich ist, ist es wichtig zu wissen, welche Salzmenge unter realen Winterdienstbedingungen auf der Fahrbahn gelöst wird. Um diese Werte zu erhalten, wurden die Maximalwerte nach der jeweiligen Streuung getrennt nach Rollspur (RS) und außerhalb Rollspur (AR) aus den Datensätzen ausgelesen und in einer separaten Tabelle erfasst. Außerdem wurde die Zeit von der Streuung bis zum Erreichen der maximal gelösten Menge registriert. Dabei ist es von wesentlicher Bedeutung, ob die Fahrbahn bereits feucht ist und durch Niederschläge weitere Flüssigkeit hinzukommt. Daher werden die ermittelten Daten getrennt nach den festgelegten Fahrbahnsituationen (Typ A, B, C) ausgewertet. Bei der Beurteilung der Werte ist auch zu berücksichtigen, dass es sich um einen dynamischen Pro-

Fahrbahnsituation Typ	Durchschnittliche Streudichte g/m ²
A	9,64
B	12,11
C	16,26

Tab. 8: Durchschnittliche Streudichte in Abhängigkeit von der Fahrbahnsituation

zess handelt. Das heißt, während weiteres Salz gelöst wird, ist möglicherweise vorher gelöstes Salz als Sprühnebel von der Fahrbahn verschwunden. Es kann also keine Totalbilanz in dem Sinne aufgestellt werden, dass 7,6 g/m² Salz (Streudichte FS 30, 10 g/m²) ausgebracht wurden und nur maximal 3 g/m² sichtbar sind und somit 4,6 g/m² vollkommen wirkungslos wären.

Bild 56 zeigt erwartungsgemäß, dass bei Streuungen zu Zeiten ohne Niederschlag deutlich weniger gelöstes Salz gemessen wird. Es handelt sich im Wesentlichen um die ohnehin bei FS 30 hinzugefügte Salzlösung. Damit ist auch messtechnisch bestätigt, dass bei trockener Fahrbahn oder sehr geringer Feuchte kaum Salz in Lösung geht, da logischerweise keine Flüssigkeit dafür vorhanden ist.

Zur Verdeutlichung des bei FS 30 hinzugefügten gelösten Salzes dient Tabelle 9.

Die linearen Trendlinien für Streuen auf trockene Fahrbahn dokumentieren einen leichten Anstieg

Streudichte	Soleanteil	Gelöstes Salz in der Sole (20%ige Lösung)	Gesamtsumme Salz
g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²
5	1,5	0,3	3,8
10	3,0	0,6	7,6
15	4,5	0,9	11,4
20	6,0	1,2	15,2

Tab. 9: Salzanteil in FS 30

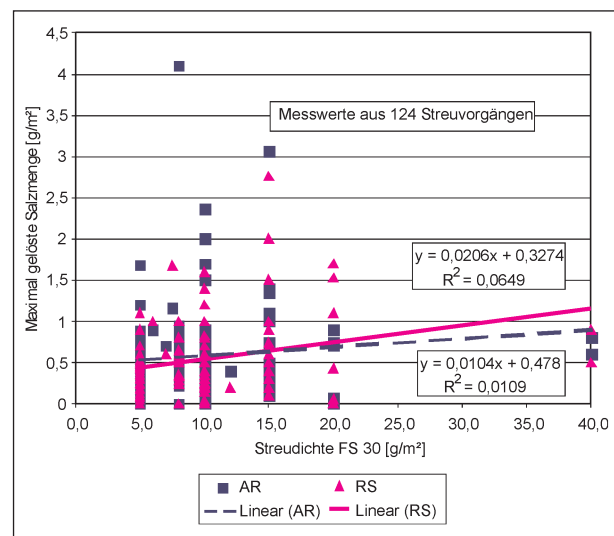


Bild 56: Maximal gelöste Salzmenge in Abhängigkeit von der Streudichte (Fahrbahn trocken oder leicht feucht)

der gelösten Salzmenge in Abhängigkeit von der Streudichte. Aus dem Bestimmtheitsmaß nahe null ist jedoch abzuleiten, dass dieser Zusammenhang nicht stark ausgeprägt ist. Dabei sind die Werte außerhalb der Rollspuren immer etwas höher als innerhalb der Rollspuren (Bild 56). Das deckt sich auch mit den visuellen Beobachtungen, bei denen man erkennt, dass außerhalb der Rollspuren oft mehr Feuchtigkeit vorhanden ist.

Auf nasser Fahrbahn geht deutlich mehr Salz in Lösung (Bilder 57, 58). Die Werte haben allerdings

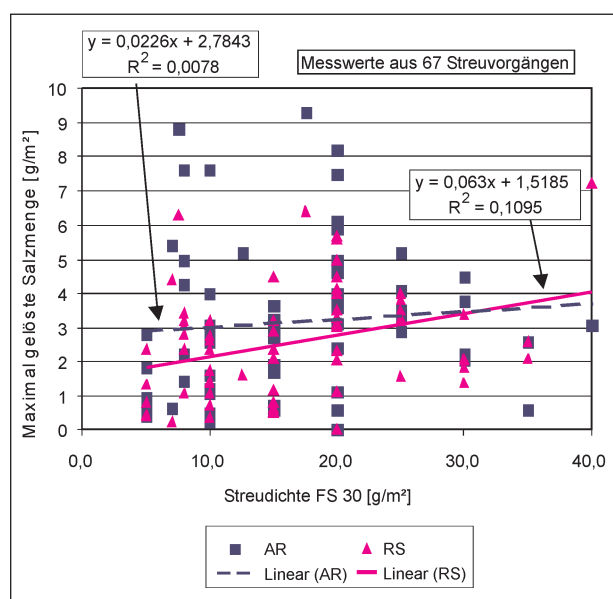


Bild 57: Maximal gelöste Salzmenge in Abhängigkeit von der Streudichte (Fahrbahn nass mit Pflugeinsatz)

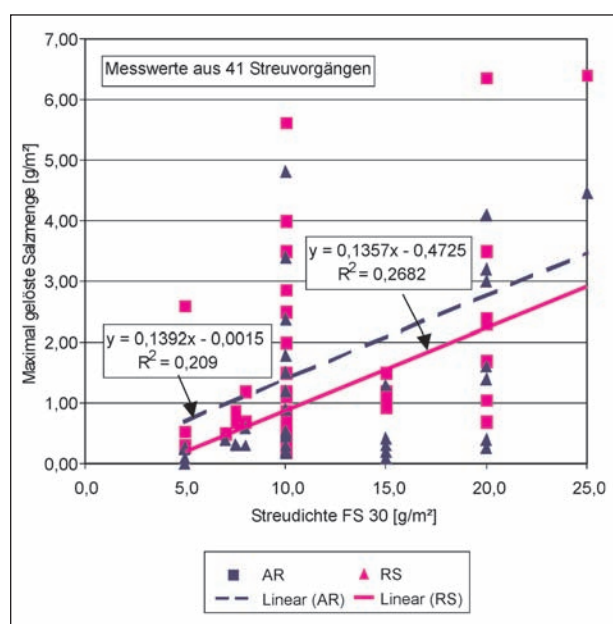


Bild 58: Maximal gelöste Salzmenge in Abhängigkeit von der Streudichte (Fahrbahn nass ohne Pflugeinsatz)

eine große Schwankungsbreite (R^2 nahe null), was darauf hindeutet, dass neben der Feuchtigkeit auf der Fahrbahn noch weitere Faktoren für das Löseverhalten des Salzes von Bedeutung sind. Dazu zählt mit Sicherheit auch die Verkehrsstärke. Dabei ist deutlich zu sehen, dass in der Rollspur mehr Salz gelöst wird als außerhalb der Rollspur. Das ist wahrscheinlich auf die mechanische Wirkung der Reifen zurückzuführen, die den Löseprozess unterstützt.

Bei Schnee oder Matsch auf der Fahrbahn (Pflugeinsatz), also erheblichem Flüssigkeitsüberschuss, wird bei geringen Streudichten anteilmäßig mehr Salz gelöst. Bei größeren Streudichten gibt es kaum Unterschiede zur nassen Fahrbahn.

In einer vergleichenden Betrachtung wird der Einfluss der Flüssigkeitsmenge auf der Fahrbahn dann deutlich, wenn man den relativen Anteil des gelösten Salzes berechnet. Dabei wird der nach den Sensormessungen gelöste Anteil des Salzes mit der einer Streudichte zugeordneten Salzmenge gemäß Tabelle 9 ins Verhältnis gesetzt. Für diese Darstellung wird der Mittelwert des maximal gelösten Salzes der Messungen außerhalb und innerhalb der Rollspur gebildet (Bild 59). Es ist deutlich zu erkennen, dass der Anteil des gelösten Salzes tendenziell mit steigender Streudichte sinkt. Das heißt, je höher die Streudichte, desto geringer ist der Anteil des Salzes, mit dem Tauwirkung erzielt wird. Gegenüber der Streudichte 5 g/m^2 gibt es bei 10 g/m^2 für Typ B und C einen leichten Anstieg der

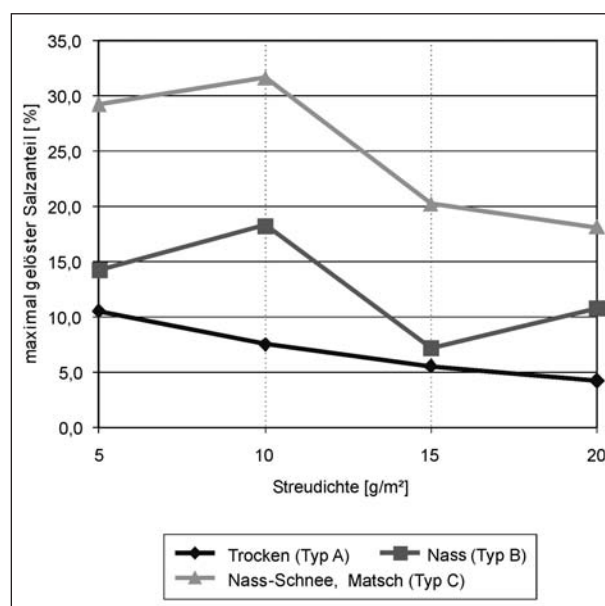


Bild 59: Anteil des maximal gelösten Salzes in Abhängigkeit von Streudichte und Fahrbahnsituation

Löserate, welcher der allgemeinen Tendenz widerspricht. Gleiches ist auch beim Typ B mit Streudichten von 15 zu 20 g/m² zu verzeichnen. Dafür gibt es im Moment keine plausible Erklärung. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass für die einzelnen Vergleichspunkte zum Teil relativ wenige Messwerte vorhanden sind.

Die durch die Messungen festgestellte Rate des gelösten Salzes ist insgesamt als überraschend gering anzusehen. Dadurch stellt sich die Frage, ob das Ergebnis durch das Messverfahren und die Randbedingungen der Messungen verfälscht wird oder tatsächlich nur so geringe Mengen des eingesetzten Salzes gelöst werden. Diese Frage ist im Moment nicht schlüssig zu beantworten, da ein geeignetes Referenzmessverfahren nicht zur Verfügung steht. Für das angewandte Verfahren sprechen jedoch die überzeugenden Ergebnisse der Sensortests und die Tatsache, dass die 12 Sensoren während der gesamten Zeit von zwei Winterperioden immer Werte geliefert haben, die im Vergleich zwischen den Sensoren äußerst plausibel waren.

Es bleibt jedoch die Möglichkeit, dass der Flüssigkeitsfilm auf dem Sensor insbesondere in seiner Dicke nicht dem entspricht, was auf der umgebenden Fahrbahnoberfläche vorgefunden wird. Dafür spricht, da der Sensor eine vollkommen glatte Oberfläche aufweist und im Gegensatz zu den Labormessungen nicht waagrecht eingebaut werden kann. Andererseits wird der Flüssigkeitsfilm der Fahrbahnumgebung durch die Reifen immer wieder auf der Sensoroberfläche reproduziert.

10.2.4 Abnahme der Streustoffmenge nach der Streuung

Die zeitliche Funktion der Abnahme der Salzmenge auf der Fahrbahn in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke und den Niederschlägen gehört zu den interessantesten Fragestellungen. Mit den Messungen in der Winterdienstsaison 2006/2007 konnten erste Zusammenhänge ermittelt werden. Dazu wurden folgende Messwerte von 62 Streuvorgängen ausgewertet, die auf nasser Fahrbahn stattfanden:

- Streudichte [g/m²],
- Zeitraum von der Streuung bis zum Ende des Analysezeitraumes [min.],
- Salzmenge am Ende des Analysezeitraumes [g/m²].

Das Ende des Analysezeitraumes ist entweder dadurch erreicht, dass eine Folgestreuung stattfindet oder der gemessene Wert für die Salzmenge auf null abgesunken ist.

Aus den Werten wurden drei Trendlinien abgeleitet, die sich auf die ausgebrachte Streudichte beziehen (Bild 60). In den ersten 60 Minuten ist ein steiler Abfall der gelösten Salzmenge auf der Fahrbahn zu verzeichnen. Später verringert sich die Rate. Die Zahl der Messungen ist für längere Zeiten nach dem Streuvorgang noch sehr gering. So ist auch der Schnittpunkt zwischen zwei Trendlinien zu erklären, für den es keine sachliche Begründung gibt. Für hohe Streudichten steht meist nur wenig Beobachtungszeit zur Verfügung, da sie in Situationen angewandt werden, welche kurzfristig Folgestreuungen erfordern.

Es ist eine große Streuung der Werte vorhanden. Die Streuung der Werte kommt wahrscheinlich durch weitere Einflussfaktoren zustande. Dazu gehört neben den Niederschlagsmengen auch die Verkehrsstärke. Eine Möglichkeit, den Einfluss der Verkehrsstärke festzustellen, ist die Unterscheidung zwischen Messungen in der Rollspur und

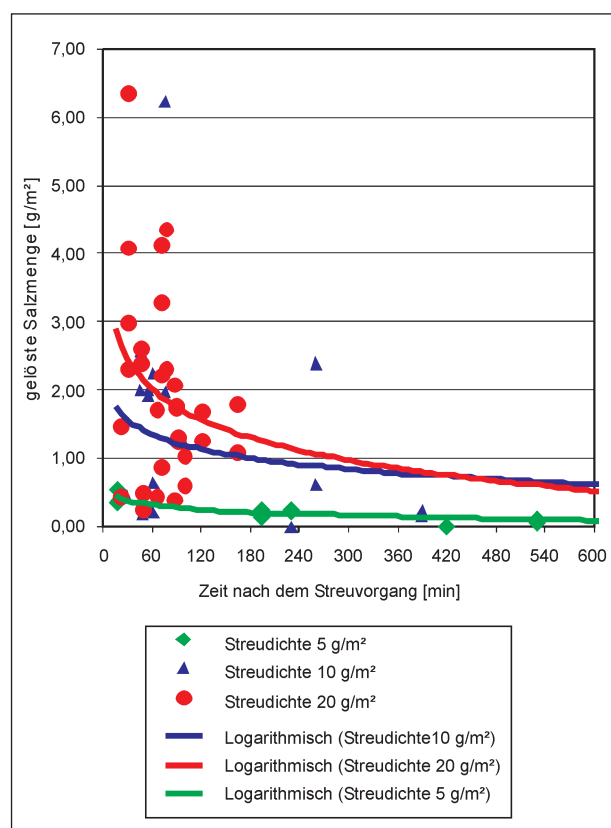


Bild 60: Abnahme der Streustoffmenge auf der Fahrbahn in Abhängigkeit von Streudichte und Zeit

außerhalb der Rollspur. In Bild 61 wurde die Abnahme der gelösten Salzmenge in Abhängigkeit von der Zeit und der Lage auf der Fahrbahn (außerhalb Rollspur, in Rollspur) dargestellt. Es zeigt, dass in einem Zeitraum von bis zu 60 Minuten in der Rollspur eine größere Salzmenge gelöst ist als außerhalb der Rollspur. Die Trendlinie für die Salzmenge außerhalb der Fahrbahn verläuft flacher, sodass sich die Verhältnisse nach 60 Minuten umkehren. Das ist so zu erklären, dass durch die Wirkung der Reifen kurzfristig mehr Salz gelöst, später aber von den Reifen auch schneller verdrängt wird. Es gibt aber auch andere Beobachtungen aus Einzelereignissen, bei denen eine noch wesentlich schnellere Verdrängung des Salzes aus den Rollspuren zu verzeichnen ist.

Bei der Endauswertung der Daten von zwei Winterdienstperioden wurde neben der Salzabnahme innerhalb und außerhalb der Rollspuren auch noch differenziert, ob es sich um Tage mit Lkw-Fahrverbot handelt. Darüber hinaus wurde bei der Gesamtauswertung auch noch unterschieden, ob zum Streuzzeitpunkt Niederschlag gefallen ist oder nicht. Aus der Kombination der Kriterien leiten sich unter Verwendung der Wertepaare für die maximale gelöste Streustoffmenge und die Streustoffmenge am Ende des Analysezeitraumes acht Trendlinien ab.

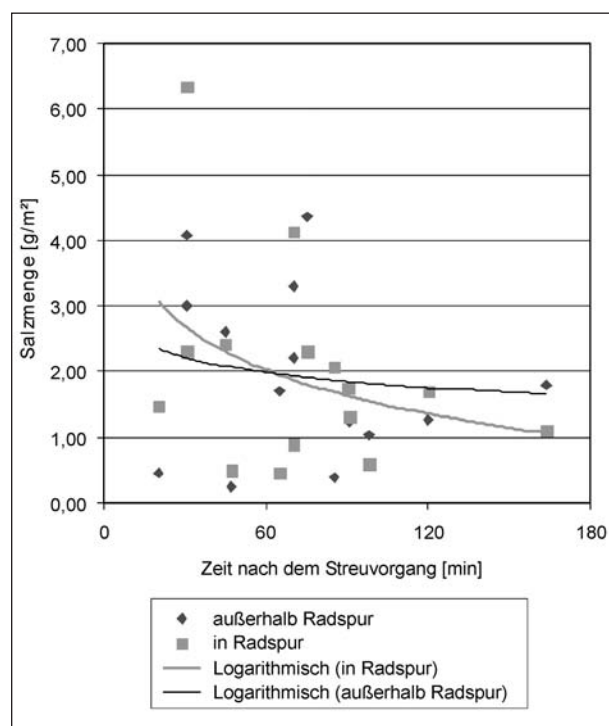


Bild 61: Abnahme der Streustoffmenge auf der Fahrbahn in Abhängigkeit von Zeit und Verkehrseinfluss bei einer Streudichte von 20 g/m^2 (Auswertung Winterdienstsaison 2006/2007)

Die Trendlinien sind in Bild 62 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei nasser Fahrbahn deutlich mehr Salz gelöst ist. Auch eine klare Differenzierung zwischen Tagen mit Lkw-Verkehr und Tagen ohne Lkw-Verkehr ist erkennbar. An Tagen mit Lkw geht bei nasser Fahrbahn anfangs mehr Salz in Lösung. Die Kurve fällt aber dann steiler ab. Das ist durch die Spritzwirkung der Reifen plausibel zu erklären. Zwischen den Werten innerhalb und außerhalb der Rollspuren gibt es ebenfalls eine deutliche Differenzierung, welche die Verdrängungswirkung der Reifen widerspiegelt.

Es wird dabei auch deutlich, dass parallel zum Salzlöseprozess auf der Fahrbahn immer schon erhebliche Salz mengen von der feuchten Fahrbahn verdrängt werden. Die Menge des zu einem Zeitpunkt auf der Fahrbahn gelösten Salzes ist offenbar wesentlich geringer, als das bisher angenommen wurde. Problematisch ist das bei starken Niederschlägen mit entsprechenden zusätzlichen Verdünnungseffekten. Der prozentuale Anteil des zu einem Zeitpunkt gelösten Salzes im Vergleich zur ausgebrachten Menge liegt bei etwa 25 %, wenn die Fahrbahn nass ist.

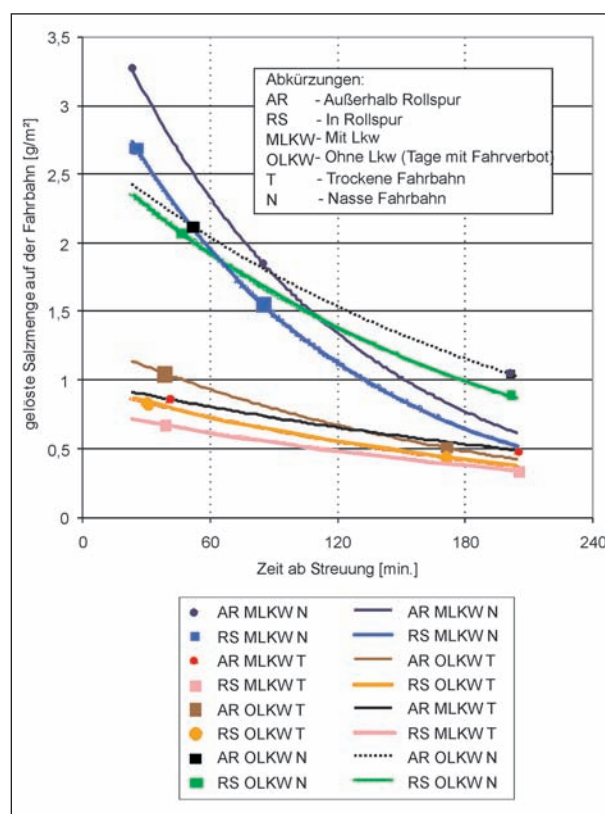


Bild 62: Abnahme der gelösten Salzmenge auf der Fahrbahn in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung und der Fahrbahnfeuchtigkeit

Bei relativ trockener Fahrbahn wird mit etwa 12 % auch prozentual ein wesentlich geringerer Teil des ausgebrachten Salzes gelöst, da dafür nicht ausreichend Flüssigkeit zur Verfügung steht.

Das Tausalz kann dann sehr schnell in ungelöster Form von der Fahrbahn verdrängt werden. Wenn es sich bestätigt, dass Salzlösung eine größere Verweildauer auf der Fahrbahn hat, dann könnte das eine Alternative sein, mit der zudem erheblich geringere Salzmengen den gleichen Effekt erzielen würden.

Bei der Bewertung der Trendlinien des gelösten Salzes ist zu erkennen, dass es nur eine sehr geringe Differenzierung gibt. Die Abhängigkeit von der Verkehrsstärke ist hier nicht dominierend, da wegen der fehlenden Flüssigkeit unter keinen Umständen mehr Salz gelöst werden kann.

11 Parallelmessung mit dem ESG-Gerät

Mit den zwölf Fahrbahnsensoren des Messfeldes kann verfahrensbedingt nur gelöstes Salz detektiert werden. Aufgetrocknetes Restsalz und Salz, das wegen Flüssigkeitsmangels nicht gelöst wurde, kann daher nicht ermittelt werden. Das neu entwickelte Messverfahren der Firma Emissionsmesstechnik und Strömungsmechanik, Entwicklung und Anwendung GmbH (ESG) bietet die Möglichkeit, sowohl bei trockener Fahrbahn als auch bei feuchter oder nasser Fahrbahn Restsalzmessungen mit hoher Genauigkeit durchzuführen (BADEL et al. 2007). Insofern ist dieses Gerät besonders geeignet, die Messungen mit den Fahrbahnsensoren zu verifizieren, aber auch zu ergänzen.

Die Messungen mit dem ESG-Gerät erfordern die Sperrung des betreffenden Fahrstreifens. Eine Anwendung der Messmethode während akuter Win-

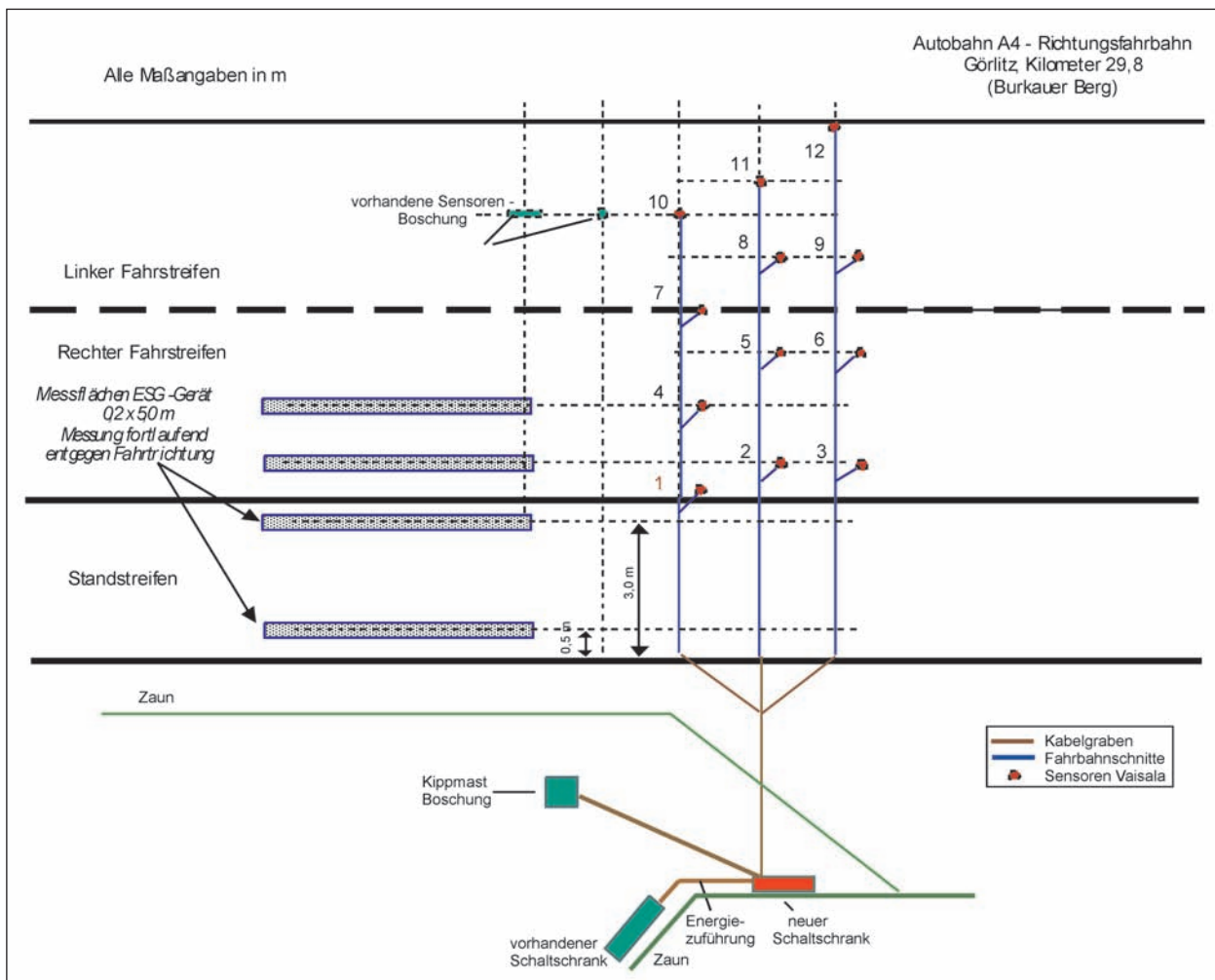


Bild 63: Aufnahmeflächen mit dem ESG-Gerät im Bereich des Messfeldes mit Fahrbahnsensoren

terdiensteinsätze ist daher nicht möglich. Für die Messungen mit dem ESG-Gerät wurden Streuungen in der winterdienstfreien Zeit durchgeführt, um vergleichbare Umfeldbedingungen zu haben und bei gelöstem Salz auch zeitgleiche Parallelmessungen mit den Fahrbahnsonden durchzuführen (Bilder 63, 64, Tabelle 9).

Die Versuche in unmittelbarer Nachbarschaft des Messfeldes auf der A 4 wurden aus folgenden Gründen durchgeführt:

- Herstellung einer Relation zwischen den Messwerten einer kompletten Salzaufnahme (ESG) und den Messwerten, die nur gelöstes Salz erfassen (Fahrbahnsonden),
- Messung der Salzverfrachtung auf den Standstreifen,
- Messung der Salzverteilung bei Anwendung von Siedessalz und reiner Solestreuung.



Bild 64: Salzaufnahme mit dem ESG-Gerät; Detail: Saugmund mit Befeuchtungsdüsen, 20 cm breit

Die Streuversuche am 21.02.08 fanden in Fortsetzung der Versuche statt, die am 19. und 20.02.2008 auf der A 10 nahe der Anschlussstelle Erkner durchgeführt wurden. Dazu wurde von BADELDT et al. (2008) ein Versuchsbericht angefertigt.

Die Messungen mit dem ESG-Gerät wurden jeweils in vier Querschnittspositionen durchgeführt:

1. zwischen den Rollspuren des rechten Fahrstreifens,
2. in der Rollspur des rechten Fahrstreifens,
3. 3,00 m von der Außenkante des Standstreifens,
4. 0,50 m von der Außenkante des Standstreifens.

Vor Beginn der Messungen wurde in allen Querschnitten eine Nullmessung durchgeführt. Nach der Ausbringung des Streustoffes wurde der rechte Fahrstreifen gesperrt, bevor Fahrzeuge über das ausgestreute Material fahren konnten. Damit wurde sichergestellt, dass eine durch den Verkehr unbeeinflusste Bestimmung der ausgebrachten Salzmenge durchgeführt werden konnte. Nach der Messung war der Fahrstreifen für 60 Minuten für den Verkehr freigegeben. Anschließend erfolgte eine weitere Messung.

Nach Auswertung der Ergebnisse vom 21.02.08 ist deutlich zu erkennen, dass bei der Streuung einigiges Streumaterial auf den Standstreifen geriet. Visuelle Beobachtungen während des Streuvorganges ergaben, dass das Streubild randscharf eingestellt war, aber durch die Verwirbelung hinter dem Fahrzeug viel Material auf den Standstreifen transportiert wurde (siehe Bild 65).

Datum	Eingesetzte Anfeuchtungsverfahren und Tausalzformen	Fahrbahnbedingungen	Eingestellte Streudichte [g/m ²]	Eingestellte Streubreite [m]	Resultierende theoretische ausgebrachte Salzmenge [g/m ²]
21.02.08	FS 30, Natriumchlorid mit 0-5 mm Körnung + 22%ige Natriumchloridlösung	feucht bis nass (keine deutlichen Sprühfahnen erkennbar)	15	7	11,5
08.04.08	22%ige Natriumchloridlösung	trocken	40 (FS 30-Einstellung ohne Trockenstoff im Behälter)	8	2,6
09.04.08	FS 30, Natriumchlorid mit 0-1 mm Körnung + 22%ige Natriumchloridlösung	trocken	15	8	11,5

Tab. 9: Spezifikation der mit dem ESG-Gerät überprüften Streuversuche



Bild 65: Verwirbelung von Streustoff nach dem Auftreffen auf die Fahrbahn (solarisierte Darstellung -Streustoff schwarz)

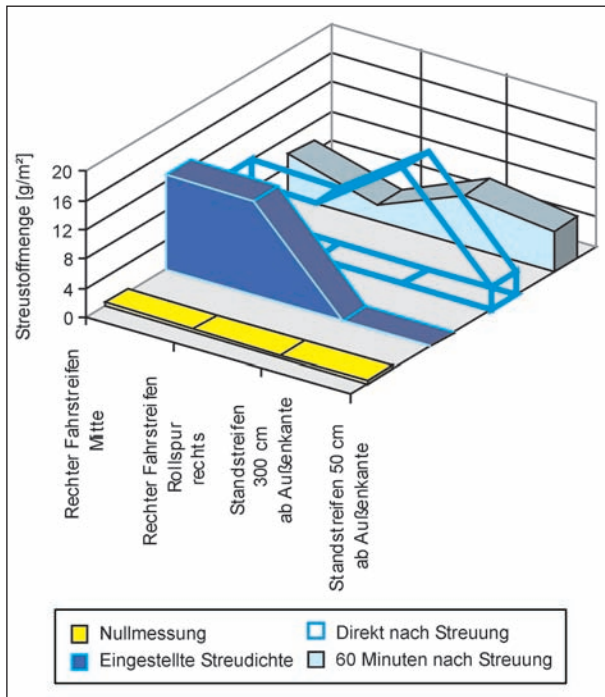


Bild 66: Ausgebrachte und gemessene Salzmenge am 09.04.2008, siehe Tabelle 9

Im weiteren Verlauf nach 60 Minuten ist zu sehen, dass große Teile des Streustoffes von Fahrstreifen verdrängt sind und die Salzmenge auf dem äußeren Teil des Standstreifens deutlich angewachsen ist (Bild 66). Die Messungen am 08. und 09. April 2008 wurden im gleichen Ablauf wie am 21. Februar 2008 durchgeführt. Beim Vergleich der Streustoffe zeigt sich, dass Siedesalz in den Rollspuren weniger schnell verdrängt wird als Steinsalz. Auf dem Standstreifen ist der relative Anstieg des Siedesalzes deutlich höher als beim Steinsalz. Das ist damit zu erklären, dass größere Steinsalz-

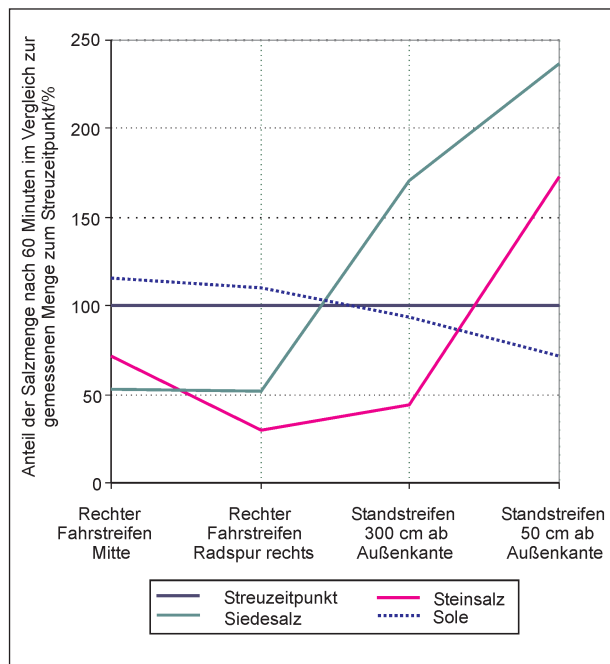


Bild 67: Relative Veränderung der Salzmenge auf dem rechten Fahrstreifen und dem Standstreifen nach 60 Minuten Verkehrseinwirkung

krystalle bis an die Außenkante des Standstreifens und darüber hinaus rollen. Das konnte bei den Streuversuchen beobachtet werden. Der Salzanteil von Salzlösung hatte sich nach 60 (Bild 67) Minuten Verkehrseinwirkung kaum verändert. Allerdings muss man berücksichtigen, dass die absolute Salzmenge bei der Solestreuung wesentlich geringer war als bei der Feuchtsalzstreuung.

12 Betriebsfestigkeit und Anordnung der Fahrbahnsensoren

Während des gesamten Testzeitraumes gab es keine Totalausfälle von Fahrbahnsensoren. Alle Messfunktionen waren uneingeschränkt über die zwei Winterperioden verfügbar. Seit Montage der Sensoren bis zum Abschluss der Messungen wurden die Sensoren in den Rollspuren auf dem rechten Fahrstreifen etwa 3 Millionen Mal von Pkw und 1,6 Millionen Mal von Lkw überfahren.

In einem Fall wurde ein Sensor versehentlich mit Heißplastik-Markierungsfarbe überspritzt. Nach vorsichtiger Entfernung der Farbschicht war auch er wieder uneingeschränkt funktionsfähig.

Eine Kalibrierung der Messeinrichtungen sollte spätestens nach zwei Jahren vorgenommen werden. Bezüglich der Wasserfilmdicke und der elektrischen

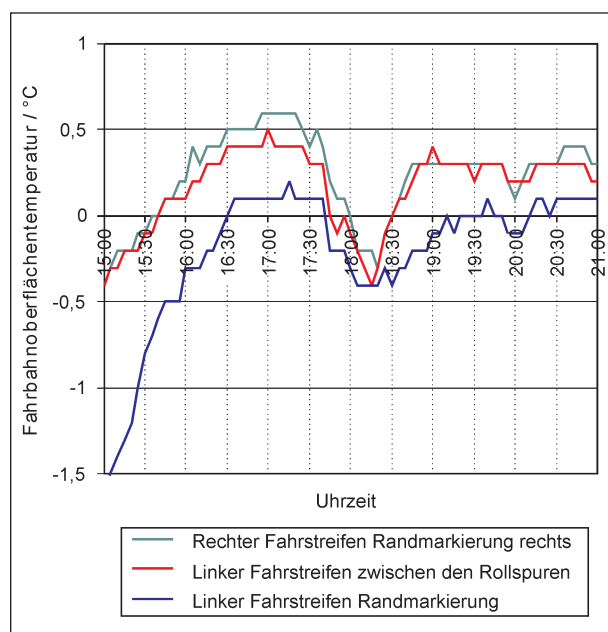


Bild 68: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur an drei Punkten des Fahrbahnquerschnittes am 06.01.2008

Leitfähigkeit müsste dafür ein geeignetes Verfahren entwickelt werden.

Zur derzeitigen Standardanordnung der Fahrbahnsensoren in der Mitte des linken Fahrstreifens sind Alternativen denkbar. Praxisgerechter erscheint die Anordnung der Sonden zur Bestimmung der Restsalzkonzentration oder der Gefriertemperatur in der Rollspur des rechten oder linken Fahrstreifens. Dort wird das Tausalz bzw. Flüssigkeit mit gelöstem Tausalz besonders schnell verdrängt (Bilder 38, 39), wodurch kritische Situationen entstehen können. Die Flüssigkeitsmengen auf der Fahrbahn haben wesentlichen Einfluss auf die Glättebildung. Deren Verteilung sollte daher tiefgründiger untersucht werden.

Die Messung der Fahrbahnoberflächentemperatur ist an den Fahrstreifenrändern sinnvoll, da dort die niedrigsten Temperaturen auftreten (Bild 36). An den Rändern der Fahrstreifen und zwischen den Fahrstreifen wird nur wenig zusätzliche Wärme über die Reifen oder durch die Wärmestrahlung von Antriebsbauteilen auf die Fahrbahn übertragen. Die in Bild 36 dargestellte Temperaturverteilung über den Fahrbahnquerschnitt war bei allen Messungen festzustellen und kann als charakteristisch angesehen werden. Besonders niedrig waren die Temperaturen am Messfeld zumeist an der linken Randmarkierung des linken Fahrstreifens (Bild 68). Es treten Temperaturdifferenzen von maximal 1,5 K auf. Bei absinkenden Temperaturen kann es bis zu

einer Stunde dauern, bis in der Rollspur Temperaturen erreicht werden, die am Fahrstreifenrand schon erreicht waren.

Grundsätzlich sollte auch überlegt werden, ob die doppelte Anordnung von Fahrbahnsensoren die Entscheidungssicherheit verbessern könnte. Die derzeitige Situation ist oft von Misstrauen gegenüber Messwerten geprägt. Dadurch werden oft aus nachvollziehbarer Vorsicht Einsätze gefahren, die vermeidbar gewesen wären.

13 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Rahmen des Forschungsthemas mit dem Messfeld gewonnenen Messwerte geben einen detaillierten Einblick in die Vorgänge auf der Fahrbahnoberfläche eines Autobahnabschnittes während der Winterdienstsaison.

Es liegen erstmals auswertbare Messwerte über den gesamten Fahrbahnquerschnitt einer Autobahn mit zwei Fahrstreifen für zwei komplette Winterdienstperioden vor.

Die Messungen der Fahrbahnoberflächentemperatur geben einen wichtigen Einblick in die Temperaturverteilung auf der Fahrbahn, die durch Fahrzeugüberfahrten und Salzlöseprozesse beeinflusst wird.

Kernstück der Messungen im Sinne der Aufgabenstellung war die Ermittlung der auf der Fahrbahn gelösten Salzmengen.

Aus den Messungen lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- In den Rollspuren geht Salz schneller in Lösung als außerhalb der Rollspuren, wird aber dann schneller verdrängt.
- Die Oberflächentemperatur in und zwischen den Rollspuren des rechten Fahrstreifens liegt bei normaler Verkehrsbelastung etwa 1 bis 1,5 K höher als zwischen den Fahrstreifen und am Rand der Fahrstreifen.
- Die Oberflächentemperatur in und zwischen den Rollspuren des rechten Fahrstreifens liegt bei normaler Verkehrsbelastung etwa 0,5 bis 1,0 K höher als an den vergleichbaren Punkten des linken Fahrstreifens.

- Während des Lösevorganges von NaCl kommt es in einem Zeitraum von 10 bis 15 Minuten zu einer Temperaturabsenkung an der Fahrbahnoberfläche von ca. 1 K.
- Bei präventiver Feuchtsalzstreuung auf trockene oder leicht feuchte Fahrbahn kommen nur der Soleanteil und die Salzmenge zur Wirkung, für die sich Lösewasser auf der Fahrbahn befindet, soweit nicht innerhalb eines Zeitraumes von ca. 120 Minuten Niederschlag fällt.
- Bei den häufig durchgeführten präventiven Streuungen zur Verhinderung von überfrierender Nässe und Reifglätte (Fahrbahn trocken oder leicht feucht) wird nur ein geringer Anteil des Salzes von durchschnittlich 12 % wirksam. Der größere Teil wird von der Fahrbahn befördert, bevor er in Lösung gehen kann.
- Bei ausschließlicher Verwendung von Sole zur präventiven Streuung vor überfrierender Nässe oder Reifglätte treten mit hoher Wahrscheinlichkeit wesentlich geringere Salzverluste auf.
- Bei Feuchtsalzstreuung auf nasse Fahrbahn gehen in Abhängigkeit von der Streudichte und weiteren Faktoren zu einem Zeitpunkt durchschnittlich nur ca. 25 % des ausgebrachten Salzes in Lösung. Im Maximum wurden Werte von 50 % festgestellt.
- Bei Schneeniederschlägen ab ca. 1 cm/h (1 mm Wasser/h) und Temperaturen ab -3 °C entsteht auf stark befahrenen Strecken bereits nach 60 Minuten Glätte, wenn keine erneute Streuung erfolgt.
- Die durch Niederschläge reaktivierten Restsalzmengen liegen innerhalb 24 Stunden bei 0,5 bis 1,0 g/m². Eine Abhängigkeit von der Textur der Fahrbahnoberfläche ist zu vermuten.
- Temperaturen werden von der vorhandenen Sensortechnik mit hoher Genauigkeit und Zuverlässigkeit gemessen.
- Die Messung der Wasserfilmdicke sowie die Bestimmung der Gefriertemperatur und der Salzmenge sind unter Feldbedingungen durch Störfaktoren beeinflusst, die zu Ungenauigkeiten führen. Es stellt sich auch die Frage, inwieweit die Verhältnisse auf der Fahrbahnoberfläche überhaupt auf den vollkommen anders strukturierten Sensoroberflächen abgebildet werden können.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die Untersuchungen auf der Autobahn stattfanden, auf der die üblichen Durchschnittsgeschwindigkeiten (Lkw ca. 90-100 km/h, Pkw ca. 130 km/h) gefahren wurden.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die aktuelle Winterdienstpraxis ableiten:

- Präventive Streueinsätze sind nur dann sinnvoll, wenn sie sehr zeitnah vor den zu erwarteten Glättereignissen stattfinden.
- Der Zeitrahmen für präventive Streuungen beträgt bei trockener Fahrbahn maximal 60 Minuten und bei feuchter Fahrbahn maximal 120 Minuten.
- Durch Erhöhung der Streudichten bei präventiven Streuungen kann der Zeitrahmen nicht vergrößert werden.
- Es ist vollkommen ausreichend, wenn die Streubreite so eingestellt wird, dass die äußeren Rollspuren mit abgestreut werden. Eine Verteilung auf die gesamte Fahrbahnbreite erfolgt durch den Fahrverkehr innerhalb weniger Minuten.

Weitere Untersuchungen und Forschungsarbeiten sollten sich auf folgende Themen konzentrieren:

- ausführlichere Messungen zur Wirkungszeit von ausgebrachten Salzlösungen auf der Fahrbahn,
- Untersuchungen und Versuche zu den erforderlichen Streudichten von Sole zur Bekämpfung von Reifglätte und überfrierender Nässe,
- Untersuchung zur Auswahl der optimalen technischen Lösung der Soleausbringung,
- betriebswirtschaftliche Analyse zur teilweisen Umstellung des Winterdienstes auf Soleanwendung.
- Untersuchung zur Übertragbarkeit der vorliegenden Ergebnisse auf Straßen mit weniger und langsameren Verkehr.
- Ergänzung der Messwerte der Fahrbahnsensoren durch berührungslose Reibwertmessungen. Auswahl und Erprobung geeigneter Verfahren,
- Untersuchung von Mechanismen der Feuchteverteilung und der Abtrocknung von Fahrbahnen und der damit verbundenen Kristallisation von Restsalz.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass insbesondere beim Salzeinsatz gegen dünne Glätteschichten ein erhebliches Einsparpotenzial besteht, welches durch gezielten Einsatz von Informationstechnik und differenzierte Streutechnologien erschlossen werden kann.

Erfolgskontrolle des Winterdienstes kann nur erschöpfend durchgeführt werden, wenn Daten zum Reibwert auf der Fahrbahn vor und nach dem Winterdienst verfügbar sind. Die diesbezüglichen Technologien sollten gezielt untersucht werden.

Literatur

- BADEL, H.: Verfahren für die Prüfung von Sensoren für die Gefriertemperatur, BAST, Abschlussbericht zum Projekt 01652. Bergisch Gladbach 2005
- BADEL, H., MORITZ, K., HEINZE, P.: Verfahren der Firma ESG für die Beurteilung von Streubildern – Ermittlung erzielbarer Wiederfindungsraten, BAST, Abschlussbericht zum KIAP F 1100.6507008. Bergisch Gladbach 2007
- BADEL, H., BREITENSTEIN, J., FLEISCH, J., HÄUSLER, G., SCHEUERL, S., WENDL, A.: Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen, Bericht zu den Projekten 96653, 99655, 01670, 99653, 01652. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 146, 2006
- BADEL, H., BREITENSTEIN, J.: Modell zur Glätzewarnung im Straßenwinterdienst, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 129, 2005
- BADEL, H., NIEBRÜGGE, L., RAATZ, W., STROBL, G.: Technische Lieferbedingungen für Glättemeldeanlagen, unveröffentlichter Entwurf für die europäische Normung, 2006
- BADEL, H., HAUSMANN, G., MÜLLER, A.: Tausalzverteilungen nach Verkehrseinwirkungen gemessen mit dem Feuchtsalzaufnahmeggerät der Firma ESG, BAST-Forschungsbericht, Bergisch-Gladbach 2008, unveröffentlicht
- BLACKBURN, R., BAUER, K., AMSLER, D., BOSELLY, E., McELROY, D.: Snow and Ice Control: Guidelines for Materials and Methods, NCHRP Report 526, Transportation Research Board, Washington, D.C. 2004
- BLOMQVIST, G., GUSTAFSON, M.: Patterns of Residual Salt on Road Surface-Case Study. Transportation Research Circular E-C063, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2004, Seiten 602-608
- BLOMQVIST, G., GUSTAFSON, M.: Modeling Exposure of Roadside Environment to Airborne Salt-Case Study, Transportation Research Circular E-C063, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2004, Seiten 296-306
- BURTWELL, M.: Deicing Trials on UK Roads- Performance of Prewetted Salt Spreading and Dry Salt Spreading, Transportation Research Circular E-C063, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2004, Seiten 564-584
- DIRNBÖCK, G.: Ermittlung des Streuzeitpunktes nach der Restsalzmenge, Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Heft 148, Wien 1980
- DURTH, W., HANKE, H.: Handbuch Straßenwinterdienst, Kirschbaumverlag, Bonn, 2004
- FONNESBECH, J. K.: Vintertjeneste-Forsog med Lagespredning, Dansk Vejtidskrift, (2001) 10, S. 45-47
- FONNESBECH, J. K., PRAHL, K. B.: Saltlagespredning pa Travikveje, Fyns Amt Dänemark 2000
- FONNESBECH, J. K. R.: Spredningsmålinger Vi kan bekæmpe glatføre bedre. <http://www.fyns-amt.dk/wm165138>
- FONNESBECH, J. K. R.: Ice control Technology with 20 % brine on highways (English version), <http://www.fyns-amt.dk/wm103245>
- FONNESBECH, J. K. R., PRAHL, K.: Rapport over maling af restsalt efter udspredning af henholdsvis saltlage og befugtet salt (dän), www.fyns-amt.dk/user/files/318.pdf
- FREITAG: Entwicklung und Test eines Online-Sensors zur Messung von Feuchte und Restsalzgehalt für den Einsatz im Winterdienst zur Steuerung von Taumittelstreugeräten, Abschlussbericht InfraLytic GmbH, FH Münster 2004
- GARRICK, NIKOLAIDIS, LUO: A Portable Method to Determine Chloride Concentration on

- Roadway Pavement, Forschungsbericht der University of Connecticut Nr.: NECTR 17, Connecticut 2002
- GLUE, T. H.: Indledende overvejelser over restsalt mængdernes afhængighed af de malte parametre. 2000, (dän.). www.fyns-amt.dk/user/files/322.pdf
- GLUE, T. H.: Restsaltmængdernes afhængighed af trafikken, 2000, (dän.). www.fyns-amt.dk/wm103241 (Abhängigkeit des Restsalzes vom Verkehrsaufkommen)
- GÖTZFRIED, F.: Qualitätsanforderungen an Streustoffe im Straßenwinterdienst, FGSV-Kolloquium Straßenbetriebsdienst, Darmstadt 2001
- HAAVASOJA, T., HAAVISTO, V., TURUNEN, M., NYLANDER, P., PILLI-SIHVOLA, Y.: A Field Trial of a Vehicle's Grip Compared with RWIS Data, Vortrag auf der Sirwec-Konferenz, Saporó 2002
- HANKE, H.: Qualitätssicherung bei Streustoffen für den Winterdienst, VKS-News, Oktober 2000
- HANKE, H.: Aufbau eines Winterdienst-Management-Systems zur optimierten Einsatzsteuerung, Straßenverkehrstechnik (2004)1, S. 13-16
- HEPPLER, K.: Parameterstudien zur Granulatausbringung mit Schleuderscheiben, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1993
- LANG, J.: Zeitanteile nicht trockener Fahrbahnzustände zur Beurteilung des Einflusses der Witterung auf die Verkehrssicherheit, Straße und Autobahn (1992)8 S. 481-488
- LYSBAKKEN, K. R.: PhD-studium med tema salt, Statens vegvesen/NTNU, 2006 (norw.)
- LYSBAKKEN, K. R., NOREM, H.: The Amount of Salt on Road Surfaces. Transportation Research Circular E-C126, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2008, Seiten 85-101
- HUNT, C., MITCHELL, G., RICHARDSON, W.: Evaluation of ODOT Roadway/Weather Sensor Systems for Snow and Ice. Removal Operations – Part III: Optimization of Salt Brine Pre-Treatment. Application Rates and Frequency, Forschungsbericht der Ohio University Nr.: FHWA/OH-2003/008C, Athens, Ohio 2003
- HUNT, C., MITCHELL, G., RICHARDSON, W.: Field Persistence of Anti-Icing Sodium Chloride Residuals, Transportation Research Circular E-C063, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2004 Seiten 609-622
- MITCHELL, G., RICHARDSON, W., RUSS, A.: Evaluation of ODOT Roadway/Weather Sensor Systems for Snow and Ice. Removal Operations-Part IV: Optimization of Pretreatment or Anti Icing Protocol. Forschungsbericht der Ohio University Nr.: FHWA/OH-2006/24, Athens, Ohio 2006
- MORITZ, K.: Betriebstechnische Anforderungen an Glättemeldealagen, FGSV-Kolloquium Straßenbetriebsdienst, Darmstadt 1995
- MORITZ, K., POHLE, G., KUTTER, M.: Untersuchungen zur Wirkungsdauer von Tausalzen, Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen 7/87
- MÜHLBERGER, J.: Funktion und Wirkung des Streusalzes auf der Straße, unveröffentlichtes Tagungsreferat, Bozen, Oktober 2006
- NICOLAS, H.-P.: Glättebildung durch Überfrieren. Schwellwerte der Oberflächenfeuchte auf Fahrbahnen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 36, 1996
- NIEBRÜGGE, L.: Automatisierung des Streuens von Tausalz, FGSV-Kolloquium Straßenbetriebsdienst, Darmstadt 1995
- NIEBRÜGGE, L.: Messen statt schätzen: Feuchtesensor für die Streustoffsteuerung, FGSV-Kolloquium Straßenbetriebsdienst, Karlsruhe 2003
- NIEBRÜGGE, L.: Wirksamkeit von tauenden Stoffen, FGSV-Kolloquium Straßenbetriebsdienst, Darmstadt 2001
- Prewetted salt versus brine on motorway. Danish Road Directorate, 2003
- RIECHERT, A.: Speichervermögen und Verdunstung auf bituminösen Oberflächen, Bitumen (1985)3, S. 124-128
- ROOSEVELT, D.: Standardized Testing Methodologies for Pavement Sensors. Final Report – Aurora Program. Eagan, Minnesota 1999
- SCHARSCHING, H.: Berührungslose Messung des Straßenzustandes-Stand der Technik und Ent-

wicklungsziele. FGSV-Kolloquium Straßenbetriebsdienst, Darmstadt 1993

SCHARSCHING, H.: Optoelektronisches Verfahren zur Feststellung der quantitativen Verteilung von Taumitteln auf der Fahrbahn, Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Heft 434, Wien 1995

SPLIID, H., STOTTERUD, R.: Forsøk med befruktning med magnesiumkloridlosning på Gjøvik/Toten. Sesongen 2004/2005. Statens vegvesen, Technologie-Rapport Nr. 2415, 2005 (norw.).

STOTTERUD, R.: Salt befruktet med varmt vann – Forstudie sesongen 2003/2004. Statens vegvesen, Intern-Rapport Nr. 2370, 2004 (norw.)

MÖLLER, S. T.: Tema Vintermodell. Väg- och transport-forskningsinstitutet, VTI rapport 529, Göteborg 2006 (schwed.)

ZWAHLEN, H. T., RUSS, A., BADURDEEN, F., VATAN, S.: Evaluation of ODOT Roadway/Weather Sensor Systems for Snow and Ice Removal Operations – Part II: RWIS Pavement Sensor Bench Test, Forschungsbericht der Ohio University Nr.: FHWA/OH-2003/008B, Athens, Ohio 2003

ZWAHLEN, H. T., Mitchell, G. F., RUSS, A.: Evaluating RWIS and Brine Pretreatment for Snow and Ice Removal, Government Engineering, 03/2007, S. 42-46, www.govengr.com

ZULAUF, R.: Vorbedingungen für einen wirtschaftlichen und wirkungsvollen Präventiveinsatz mit Streusalzen, Straße und Verkehr (1967) 4, S. 160-170

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Verkehrstechnik“

2004

- V 110: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2001 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Laffont, Nierhoff, Schmidt, Kathmann € 22,00
- V 111: Autobahnverzeichnis 2004 (erschienen 2005)
Kühnen € 21,50
- V 112: Einsatzkriterien für Betonschutzwände (vergriffen)
Steinauer, Kathmann, Mayer, Becher € 21,50
- V 113: Car-Sharing in kleinen und mittleren Gemeinden
Schweig, Keuchel, Kleine-Wiskott, Hermes, van Acken € 15,00
- V 114: Bestandsaufnahme und Möglichkeiten der Weiterentwicklung von Car-Sharing
Loose, Mohr, Nobis, Holm, Bake € 20,00
- V 115: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2002 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Kathmann, Laffont, Nierhoff € 24,50
- V 116: Standardisierung der Schnittstellen von Lichtsignalanlagen – Zentralrechner/Knotenpunktgerät und Zentralrechner/
Ingenieurarbeitsplatz
Kroen, Klod, Sorgenfrei € 15,00
- V 117: Standorte für Grünbrücken – Ermittlung konfliktreicher Streckenabschnitte gegenüber großräumigen Wanderungen jagdbarer Säugetiere
Surkus, Tegethof € 13,50
- V 118: Einsatz neuer Methoden zur Sicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer
Steinauer, Maier, Kemper, Baur, Meyer € 14,50

2005

- V 119: Alternative Methoden zur Überwachung der Parkdauer sowie zur Zahlung der Parkgebühren
Boltze, Schäfer, Wohlfarth € 17,00
- V 120: Fahrleistungserhebung 2002 – Inländerfahrleistung
Hautzinger, Stock, Mayer, Schmidt, Heidemann € 17,50
- V 121: Fahrleistungserhebung 2002 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko
Hautzinger, Stock, Schmidt € 12,50
- V 122: Untersuchungen zu Fremdstoffbelastungen im Straßenseitenraum – Band 1 bis Band 5
Beer, Herpetz, Moritz, Peters, Saltzmann-Koschke, Tegethof, Wirtz € 18,50
- V 123: Straßenverkehrszählung 2000: Methodik
Lensing € 15,50
- V 124: Verbesserung der Radverkehrsführung an Knoten
Angenendt, Blase, Klöckner, Bonfranchi-Simovió Bozkurt, Buchmann, Roeterink € 15,50
- V 125: PM_{10} -Emissionen an Außerortsstraßen – mit Zusatzuntersuchung zum Vergleich der PM_{10} -Konzentrationen aus Messungen an der A1 Hamburg und Ausbreitungsberechnungen
Düring, Bösinger, Lohmeyer € 17,00
- V 126: Anwendung von Sicherheitsaudits an Stadtstraßen
Baier, Heidemann, Klemps, Schäfer, Schuckließ € 16,50
- V 127: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2003 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 24,50

- V 128: Qualitätsmanagement für Lichtsignalanlagen – Sicherheitsüberprüfung vorhandener Lichtsignalanlagen und Anpassung der Steuerung an die heutige Verkehrssituation
Boltze, Reusswig € 17,00
- V 129: Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst
Badelt, Breitenstein € 13,50
- V 130: Fortschreibung der Emissionsdatenmatrix des MLuS 02
Steven € 12,00
- V 131: Ausbaustandard und Überholverhalten auf 2+1-Strecken
Friedrich, Dammann, Irzik € 14,50
- V 132: Vernetzung dynamischer Verkehrsbeeinflussungssysteme
Boltze, Breser € 15,50

2006

- V 133: Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offener Straßenbeläge
Hübelt, Schmid € 17,50
- V 134: Qualifizierung von Auditoren für das Sicherheitsaudit für Innerortsstraßen
Gerlach, Kesting, Lippert € 15,50
- V 135: Optimierung des Winterdienstes auf hoch belasteten Autobahnen
Cypra, Roos, Zimmermann € 17,00
- V 136: Erhebung der individuellen Routenwahl zur Weiterentwicklung von Umlegungsmodellen
Wermuth, Sommer, Wulff € 15,00
- V 137: PM_x -Belastungen an BAB
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 138: Kontinuierliche Stickoxid (NO_x)- und Ozon (O_3)-Messwertaufnahme an zwei BAB mit unterschiedlichen Verkehrsparametern 2004
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,50
- V 139: Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Taumittelsprühanlagen
Wirtz, Moritz, Thesenvitz € 14,00
- V 140: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2004 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 15,50
- V 141: Zählungen des ausländischen Kraftfahrzeugverkehrs auf den Bundesautobahnen und Europastraßen 2003
Lensing € 15,00
- V 142: Sicherheitsbewertung von Maßnahmen zur Trennung des Gegenverkehrs in Arbeitsstellen
Fischer, Brannolte € 17,50
- V 143: Planung und Organisation von Arbeitsstellen kürzerer Dauer an Bundesautobahnen
Roos, Hess, Norkauer, Zimmermann, Zackor, Otto € 17,50
- V 144: Umsetzung der Neuerungen der StVO in die straßenverkehrsrechtliche und straßenbauliche Praxis
Baier, Peter-Dosch, Schäfer, Schiffer € 17,50
- V 145: Aktuelle Praxis der Parkraumbewirtschaftung in Deutschland
Baier, Klemps, Peter-Dosch € 15,50
- V 146: Prüfung von Sensoren für Glättmeldeanlagen
Badelt, Breitenstein, Fleisch, Häusler, Scheurl, Wendl € 18,50
- V 147: Luftschadstoffe an BAB 2005
Baum, Hasskelo, Becker, Weidner € 14,00
- V 148: Berücksichtigung psychologischer Aspekte beim Entwurf von Landstraßen – Grundlagenstudie –
Becher, Baier, Steinauer, Scheuchenpflug, Krüger € 16,50
- V 149: Analyse und Bewertung neuer Forschungserkenntnisse zur Lichtsignalsteuerung
Boltze, Friedrich, Jentsch, Kittler, Lehnhoff, Reusswig € 18,50

V 150: Energetische Verwertung von Grünabfällen aus dem Straßenbetriebsdienst
Rommeiß, Thrän, Schlägl, Daniel, Scholwin € 18,00

2007

V 151: Städtischer Liefer- und Ladeverkehr – Analyse der kommunalen Praktiken zur Entwicklung eines Instrumentariums für die StVO
Böhl, Mausa, Kloppe, Brückner € 16,50

V 152: Schutzeinrichtungen am Fahrbahnrand kritischer Streckenabschnitte für Motorradfahrer
Gerlach, Oderwald € 15,50

V 153: Standstreifenfreigabe – Sicherheitswirkung von Umnutzungsmaßnahmen
Lemke € 13,50

V 154: Autobahnverzeichnis 2006
Kühnen € 22,00

V 155: Umsetzung der Europäischen Umgebungslärmrichtlinie in Deutsches Recht
Bartolomaeus € 12,50

V 156: Optimierung der Anfeuchtung von Tausalzen
Badelt, Seliger, Moritz, Scheurl, Häusler € 13,00

V 157: Prüfung von Fahrzeugrückhaltesystemen an Straßen durch Anprallversuche gemäß DIN EN 1317
Klöckner, Fleisch, Balzer-Hebborn, Ellmers, Friedrich, Kübler, Lukas € 14,50

V 158: Zustandserfassung von Alleebäumen nach Straßenbaumaßnahmen
Wirtz € 13,50

V 159: Luftschadstoffe an BAB 2006
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50

V 160: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2005 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 25,50

V 161: Quantifizierung staubedingter jährlicher Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen – Infrastrukturbedingte Kapazitätsengpässe
Listl, Otto, Zackor € 14,50

V 162: Ausstattung von Anschlussstellen mit dynamischen Wegweisern mit integrierter Stauinformation – dWiSta
Grahl, Sander € 14,50

V 163: Kriterien für die Einsatzbereiche von Grünen Wellen und verkehrabhängigen Steuerungen
Brilon, Wietholt, Wu € 17,50

V 164: Straßenverkehrszählung 2005 – Ergebnisse
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,00

2008

V 165: Ermittlung des Beitrages von Reifen-, Kupplungs-, Brems- und Fahrbahnabrieb an den PM₁₀-Emissionen von Straßen
Quass, John, Beyer, Lindermann, Kühlbusch, Hirner, Sulkowski, Sulkowski, Hippler € 14,50

V 166: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2006 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen, Koßmann € 26,00

V 167: Schadstoffe von Bankettmaterial – Bundesweite Datenauswertung
Kocher, Brose, Siebertz € 14,50

V 168: Nutzen und Kosten nicht vollständiger Signalisierungen unter besonderer Beachtung der Verkehrssicherheit
Frost, Schulze € 15,50

V 169: Erhebungskonzepte für eine Analyse der Nutzung von alternativen Routen in übergeordneten Straßennetzen
Wermuth, Wulff € 15,50

V 170: Verbesserung der Sicherheit des Betriebspersonals in Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen
Roos, Zimmermann, Riffel, Cypra € 16,50

V 171: Pilotanwendung der Empfehlungen für die Sicherheitsanalyse von Straßennetzen (ESN)
Weinert, Vengels € 17,50

V 172: Luftschadstoffe an BAB 2007
Baum, Hasskelo, Siebertz, Weidner € 13,50

V 173: Bewertungshintergrund für die Verfahren zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offenerporiger Straßenbeläge
Altreuther, Beckenbauer, Männel € 13,00

V 174: Einfluss von Straßenzustand, meteorologischen Parametern und Fahrzeuggeschwindigkeit auf die PM_x-Belastung an Straßen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Düring, Lohmeyer, Moldenhauer, Knörr, Kutzner, Becker, Richter, Schmidt € 29,00

V 175: Maßnahmen gegen die psychischen Belastungen des Personals des Straßenbetriebsdienstes
Fastenmeier, Eggerdinger, Goldstein € 14,50

2009

V 176: Bestimmung der vertikalen Richtcharakteristik der Schallabstrahlung von Pkw, Transportern und Lkw
Schulze, Hübelt € 13,00

V 177: Sicherheitswirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB A24
Lerner, Hegewald, Löhe, Velling € 13,50

V 178: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2007 – Jahresauswertung der automatischen Dauerzählstellen
Fitschen € 13,00

V 179: Straßenverkehrszählung 2005: Methodik
Kathmann, Ziegler, Thomas € 15,50

V 180: Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn
Hausmann € 14,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

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

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.