

# Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Verkehrstechnik Heft V 322

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving them a 3D appearance as if they are floating above a surface.

# Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren

von

Günter Hausmann

KOMMZEPT  
Ingenieurbüro Hausmann,  
Bannewitz

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Verkehrstechnik Heft V 322

**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 bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

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

Die Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt: FE 04.0297/2015/KRB**  
Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren

**Fachbetreuung:**  
Horst Badelt

**Referat**  
Verkehrsbeeinflussung und Straßenbetrieb

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

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

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9331  
ISBN 978-3-95606-482-1

Bergisch Gladbach, November 2019



## Kurzfassung – Abstract

### **Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren**

Die Festlegung der Salzdosierung (Streudichte) wird in der aktuellen Winterdienstpraxis zumeist vom Einsatzpersonal auf den Fahrzeugen vorgenommen.

Das von der Bundesanstalt für Straßenwesen (Bergisch Gladbach, Deutschland) in Auftrag gegebene Pilotprojekt „Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren“ hatte die Minimierung von „subjektiven Faktoren“ bei der Taustoffanwendung zum Ziel.

Der Forschungsauftrag knüpfte an das Vorprojekt „Optimierung der Streustoffausbringung – Modell der objektiv notwendigen Streudichten im Straßenwinterdienst“ an und nutzt zusätzlich die Möglichkeiten eines neu entwickelten berührungslosen Sensors. Mit diesem Sensor besteht die Möglichkeit, die Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn und den aktuellen Fahrbahnzustand in die Berechnung der optimalen Streudichte einzubeziehen.

Die Testinstallationen wurden in den Autobahnmeistereien Greding und Münchberg erprobt.

Die Einführung von Assistenzsystemen zur parametergesteuerten Ermittlung der optimalen Streudichte sollte als wichtiger Schritt angesehen werden, um den Straßenwinterdienst zukünftig noch wirtschaftlicher, sicherer und mit geringsten Umweltbelastungen durchführen zu können.

Die mit den derzeit verfügbaren technischen Mitteln durchgeführten Feldversuche haben erste Erkenntnisse und Lösungen aufgezeigt. Es wurde aber auch deutlich, dass kurzfristige Lösungen nicht zu erwarten sind.

Praxistaugliche Lösungen erfordern Sensoren, die präzise Messwerte liefern und eine noch komplexere Erfassung der Bedingungen auf der Straßenoberfläche. Das kann wahrscheinlich nur mit einer größeren Zahl von Sensoren an einem Fahrzeug kombiniert mit Verfahren der Bilderkennung erfolgen. Damit könnte alles Wesentliche erfasst und ausgewertet werden, was die Fahrer der Winterdienstfahrzeuge heute im Sichtfeld haben, kombiniert mit der Möglichkeit, die numerischen Daten automatisiert zu verarbeiten.

### **Automatically controlled spreading of grit using new mobile sensors**

In the current winter road maintenance, the amount of salt (spreading density) is mostly determined by field personnel on the vehicles.

The objective of the pilot project “Automatically controlled spreading of grit using new mobile sensors” commissioned by the Bundesanstalt für Straßenwesen (Federal Highway Research Institute), based in Bergisch Gladbach, Germany, was to minimise the “subjective factors” involved in the application of ice-melting materials.

The research project was based on the previous project „Optimisation of the degree of spreading material – Model to determine the spreading density objectively required in winter road clearance“ and also uses a newly developed contactless sensor. With this sensor, the water film thickness on the road surface and the current condition of the road can be included when calculating the optimum spreading density.

The test installations have been tested in the highway maintenance depots at Greding and Münchberg.

The implementation of assistance systems for determining the optimum spreading density based on parameters should be considered as an important step to carry out winter maintenance in the future in a more economical, safe manner and with minimum impact on the environment.

Field trials carried out using the currently available technical equipment have resulted in initial findings and solutions. It was also clear that solutions cannot be expected in the short term.

Practical solutions require sensors that provide accurate readings and increasingly detailed detection of road surface conditions. This can probably only be done with a larger number of sensors on a vehicle combined with image recognition techniques. On this basis it would be possible to record and evaluate all important information that the drivers of winter maintenance vehicles have in their field of vision today, with the added possibility of automatically processing the numerical data.

## Summary

### Automatically controlled spreading of grit using new mobile sensors

## 1 Introduction

The theoretical basis and practical experiences on the use of de-icers in winter maintenance were consolidated into an algorithm in the previous project „Calculation of the optimum spreading density in winter maintenance of roads“ completed in 2013. This algorithm determined the spreading density objectively required to prevent the accumulation of ice on the road surface, considering the forecast weather and road surface conditions.

Based on the phase diagram for mixing sodium chloride and water, a calculation algorithm was developed considering the temperature and water film thickness on the road surface in forecast periods that can be selected. The forecast data, which is updated hourly, is sent to the winter maintenance vehicle during deployment and directly affects the spreading density to be calculated.

In addition to the forecast data, the technology and road-surface-based conditions directly affect the calculated spreading density.

Road surface properties (for example, type of surface, bridge location on the road) and residual amounts of salt on the road surface can be considered as road-surface-based conditions.

In addition, technical constraints like the spreading technology (either FS30 or FS100) and the forecast period are also considered.

It was seen that calculating the optimum spreading density using an algorithm considering the readings and forecast values especially in preventive spreading operations, opens up previously unused savings potential. Along with the hardware installed in the vehicle, the dispensing algorithm can reduce the pronounced subjective factor when selecting the spreading density during winter maintenance.

This research project was based on the steps recommended in the previous project „Optimisation of the degree of spreading material – Model to determine the spreading density objectively required

for winter road maintenance“. In the project, the use of a novel mobile sensor made it possible for the first time to measure the water film thickness and include the result in the calculation. The inclusion of the water film thickness in the calculations increases the safety of the driving personnel when choosing the scatter density. The functionality of the tested system has been verified. The function of the system needs to be stabilised for practical implementation. Subsequently, the algorithm can be used directly for setting the spreading density on the spreaders.

The following steps should be taken with the objective of introducing driver assistance systems for winter maintenance work:

1. Conducting of additional field trials,
2. Modification of the algorithm based on the results of additional field trials and a review of technical discussions,
3. Adapting the system to the spreaders of other manufacturers,
4. Conducting of supervised trial operations with direct transmission of the calculated spreading density to the controller of the spreaders,
5. Incorporating a mobile residual salt quantity measurement, as soon as it technically feasible,
6. Promotion of the development of technical systems for mobile measurement of water film thickness, in order to use this important parameter for calculating the spreading density in curative trials and
7. Determination of the necessary de-icer quantities to create „snow slush“ in the event of snowfall.

The implementation of assistance systems for determining the optimum spreading density based on parameters should be considered as an important step to carry out winter maintenance in the future in a more economical, safe manner and with minimum impact on the environment.

The test installations were tested in the highway maintenance depots at Greding and Münchberg on a Küpper-Weisser spreader and a combination spreader of Aebi-Schmidt. The water film thickness and road surface condition can also be measured now using the additional mobile sensor „MARWIS“ manufactured by Lufft. The BAST research project „Optimisation of de-icing spreading materials for

winter maintenance“ yielded new information on the quantities of de-icer necessary during snowfall.

## 2 Results

The large quantity of input data resulted very often in failures in the winter maintenance season of 2016/17 during the trial runs. Individual data was temporarily unavailable for different reasons. Causes are interruptions in the data transfer (DWD data), positioning problems (GPS), functional problems of the on-board computer (operating system), and various interruptions in the power supply. The problems were already partly resolved during the winter period.

In preparation for the 2017/18 season, a number of technical changes were implemented that led to a much more stable operation of the overall system, partly because of the use of LTE routers for data transmission to the vehicle.

For the field trials continued in December 2017, the following data was available:

Highway maintenance depot Münchberg: 36 days of operation in the period from 12.12.2017 to 18.03.2018 with 90 trips

Highway maintenance depot Greding: 27 days of operation in the period from 09.12.2017 to 18.03.2018 with 94 trips.

The safety of the data provision and data transfer could be improved substantially compared with the previous season. Complete data sets were available for almost all the days of operation.

The function of the algorithm along with the input data could be tested for almost all conceivable winter weather conditions.

The incorporation of a large amount of input data made the system highly sensitive. This was reflected especially in a wide range of the calculated values. The water film thickness measured by the MARWIS-sensor and the displayed condition of the road surface were crucial here. The water film thickness varied a lot within a very short duration.

The road surface condition changed quickly in all the directions. Fluctuations of measurement and display values that last only a few seconds cannot be usefully implemented due to the mechanical

inertia of the conveying system of spreaders. In other words, if for example, a high spreading density is applied to the road surface, the crucial road conditions at the applied point no longer exists.

It is seen that sensor data based on a measurement spot of only a few centimetres in diameter is often not representative of the entire width of the road surface.

The mobile determination of residual quantities of salt on the road surface is problematic. However, with the MARWIS-sensor the residual quantities of salt can be indirectly determined. Whether the results can be applied in practice needs to be examined.

## 3 Findings and conclusions

The field tests in the winter maintenance periods of 2016/17 and 2017/18 have provided valuable insights about the requirements that need to be met for beneficially using the dispensing algorithms based on extensive sensor and usage data. The following findings are worth mentioning:

1. The function of the model converted into an algorithm for the calculation of the optimal scatter density could be proven.
2. The technical options to combine all the necessary data for automatic spreading on the maintenance vehicles, are available.
3. The DWD point weather forecast can be used for a dispensing algorithm with a time horizon of 3h. However, further progress needs to be made with regard to the reliability of forecasts.
4. The measurement and calculation data of the contactless sensor show a wide range of variations in mobile operation.
5. The display of road conditions changes so frequently that this input value cannot be meaningfully processed at present. It is to be assumed that some of the output values for the road condition are not representative or are even incorrect.
6. The output values of the contactless sensor are sometimes incomprehensible because the internal algorithms of the manufacturer are not known.

7. The categorisation of the road surface condition is not fully reliable for a dispensing algorithm. The road surface condition of „covered with snow-ice“ is not differentiated enough for dispensing control. Snow and ice need to be calculated differently for the dispensing quantity. These two conditions need to be clearly distinguished.
8. For the conditions of „chemically wet“ and „critically wet“, knowledge of the internal algorithm of the MARWIS-sensor is required for their valid incorporation in the calculation.
9. In case of mobile use of the MARWIS-sensor, saline spray water should be expected. The degree of protection of the connector between the sensor and cable is not adequate for this purpose, based on practical experience. After a few days' use in the vehicle at the Münchberg highway maintenance depot, the contacts on the connector were corroded.
10. Modified sensors need to be developed for use in automatic dispensing.
11. Simple procedures that can be carried out at the place where the winter maintenance vehicles are being deployed need to be found for calibrating the sensor for the road surface temperature and the water film thickness.

General conclusions on the use of sensors for dispensing control:

1. The wide range of readings within seconds, especially for water film thickness, but also for road surface temperature, indicates that the readings obtained from a small measurement spot do not necessarily represent a larger surface of the road.
2. Higher stability and reliability of the readings could be achieved by installing several sensors distributed across the width of the vehicle. Average values could be obtained from the readings of several sensors and then be incorporated directly in the calculation.
3. The internal algorithms of the sensors should be matched to the data requirement of the dispensing controller.
4. The sensor systems being offered need to be further investigated for the accuracy of the readings.

5. Technical specifications for fixed sensors have to be extended to mobile sensors.

## 4 Questions and tasks

The following questions and tasks arise for the further work on the device and its future development up to its operational readiness in winter maintenance:

1. What developments are to be expected in sensor technology?
2. Which measurement accuracies of the sensors can be expected?
3. Are the achievable measurement accuracies sufficient for an automated scatter density calculation?
4. Which methods can be used to calibrate sensors under practical conditions?
5. How can the quality of the measurements be ensured during winter maintenance operations?
6. What role can image recognition of the road surface play for the further processing?
7. Should the development of dosing algorithms aim at taking into account as much input data as possible, or should an economical use of possible input data be our goal?
8. Will there be sufficiently precise methods in the future to determine the residual salt quantities from a moving vehicle?
9. If practical sensor technology is available for the mobile measurement of residual salt quantities, it should be integrated into the system to calculate the optimum scatter density.
10. Is knowledge of the friction coefficients on the roadway helpful for calculating the optimum spreading density?
11. According to which criteria can the simultaneous use of FS30 and FS100 be recommended, which according to the current knowledge can be advantageous especially on open-pored asphalt?
12. Should the simultaneous use of FS30 and FS100 become part of the algorithm?

## 5 Future prospects

Currently research and pilot projects with automatic traffic systems are being conducted worldwide. In Germany, there are initial projects on the unmanned operation of vehicles in the area of the road operating services. Among other things, work has been underway since 2014 on a project sponsored by the Federal Ministry of Economics and Energy entitled „Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen“ (aFAS - Automatic driverless safety vehicle for workplaces on federal motorways).

In the area of winter maintenance, under the title of „Automated Airfield Ground Maintenance“ (AAGM) a system is being tested according to test requirements of the airport operator Fraport, where the team operations only require the lead vehicle with a driver. This development of unmanned systems will most likely continue and be extended to other areas of winter maintenance. In this respect, the winter maintenance on motorways appears to be the most suitable due to the relatively clear routing for getting started. An automatic system for determining the optimum spreading density would be indispensable.

Field trials carried out using the currently available technical equipment have resulted in initial findings and solutions. It was also clear that solutions cannot be expected in the short term.

Practical solutions require sensors that provide accurate readings and increasingly detailed detection of road surface conditions. This can probably only be done with a larger number of sensors on a vehicle combined with image recognition techniques. On this basis it would be possible to record and evaluate all important information that the drivers of winter maintenance vehicles have in their field of vision today, with the added possibility of automatically processing the numerical data.



## Inhalt

<b>Abkürzungen/Formelzeichen</b> .....	11	5.2.3 Zentralserver .....	37
<b>1 Einleitung</b> .....	13	5.2.4 Technische Änderungen nach der Winterperiode 2016/2017.....	37
<b>2 Stand der Wissenschaft und Technik</b> .....	14	5.3 Hardwarekomponenten auf den Testfahrzeugen.....	38
<b>3 Theoretische Grundlagen der Wirkung von Tausalzen</b> .....	16	5.3.1 Spezifikation der Hardware- komponenten .....	38
3.1 Phasendiagramm Wasser – Salz.....	16	5.3.2 Fahrzeuginstallation in der Autobahnmeisterei Münchberg .....	39
3.2 Einflussfaktoren auf die Glättebildung .....	16	5.3.3 Fahrzeuginstallation in der Autobahnmeisterei Greding .....	39
<b>4 Entwicklung eines Berechnungs- algorithmus für die optimale Streudichte</b> .....	17	<b>6 Versuchsstrecken</b> .....	40
4.1 Allgemeiner Ansatz.....	17	6.1 Autobahnmeisterei Münchberg .....	40
4.2 Mathematische Beschreibung der Phasengrenzlinie .....	18	6.1.1 Charakteristik der Einsatzstrecke.....	40
4.3 Prognose der Fahrbahntemperatur ...	21	6.1.2 Straßenwetterstationen im Einsatzgebiet .....	40
4.4 Wasserfilmdicke .....	22	6.2 Autobahnmeisterei Greding .....	41
4.4.1 Messung der Wasserfilmdicke .....	22	6.2.1 Charakteristik der Einsatzstrecke.....	41
4.4.2 Prognose der Wasserfilmdicke.....	22	6.2.2 Straßenwetterstationen im Einsatzgebiet .....	42
4.5 Kalkulation der Restsalzmengen und der Liegezeitverluste .....	24	<b>7 Eingangsdaten für die Berechnung der optimalen Streudichte</b> .....	43
4.6 Berechnungsalgorithmus .....	25	<b>8 Qualität der Eingangsdaten</b> .....	44
4.6.1 Berechnungsgrundlagen des Algorithmus .....	25	8.1 Einfluss von Messwertabweichungen auf die Streudichte .....	44
4.6.2 Struktur des Algorithmus (Fassung 2016) .....	26	8.2 Daten der Punktwettervorhersage ....	46
4.6.3 Programmierungselemente des Algorithmus .....	29	8.2.1 Fahrbahnzustand .....	46
<b>5 Umsetzung des Pilotprojektes zur optimierten Streudichte</b> .....	32	8.2.2 Fahrbahntemperatur.....	46
5.1 Umsetzungskonzept.....	32	8.2.3 Niederschlagsmenge .....	48
5.2 Funktionsweise des Systems zur Optimierung der Streudichte .....	33	8.2.4 Niederschlagsart .....	48
5.2.1 Übersicht .....	33	8.3 MARWIS-Daten .....	49
5.2.2 Fahrzeugrechner und umgesetzter Algorithmus .....	35	8.3.1 Fahrbahnzustand .....	49
		8.3.2 Fahrbahntemperatur.....	53
		8.3.3 Wasserfilmdicke .....	54

<b>9</b>	<b>Ergebnisse der Feldversuche in der WD-Saison 2016/17</b> . . . . .	60
<b>10</b>	<b>Ergebnisse der Feldversuche in der WD-Saison 2017/18</b> . . . . .	66
10.1	Überblick über die Saison- ergebnisse . . . . .	66
10.2	Erhebungsdaten ausgewählter Einsatzfahrten . . . . .	67
10.3	Vergleich der vom Fahrpersonal eingestellten Streudichte mit der über den Algorithmus errechneten Streudichte . . . . .	79
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung</b> . . . . .	83
11.1	Allgemeine Erkenntnisse . . . . .	83
11.2	Qualität der Eingangsdaten . . . . .	84
11.2.1	Fahrbahnoberflächentemperatur (MARWIS) . . . . .	84
11.2.2	Wasserfilmdicke (MARWIS) . . . . .	84
11.2.3	Wasserfilmdicke (DWD- Niederschlagsprognose) . . . . .	84
11.2.4	Fahrbahnzustand (MARWIS) . . . . .	85
<b>12</b>	<b>Schlussfolgerungen</b> . . . . .	85
<b>13</b>	<b>Fragestellungen und Aufgaben</b> . . . . .	86
<b>14</b>	<b>Ausblick</b> . . . . .	86
	<b>Literatur</b> . . . . .	87
	<b>Bilder</b> . . . . .	88
	<b>Tabellen</b> . . . . .	91

## Abkürzungen/Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung	Symbol	Beschreibung
D		Differenz zwischen dem aktuellen Dampfdruck der Luft in 2 m Höhe und dem Sättigungsdampfdruck auf der Straßenoberfläche	0	Wert zum Zeitpunkt 0 (aktueller Zeitpunkt)
F		Faktor (Ausgleichsfaktor, Bewertungsfaktor)	1	Wert zum Zeitpunkt (1 Stunde)
f		Funktion	2	Wert zum Zeitpunkt (2 Stunden)
FBT	°C	Temperatur der Straßenoberfläche	3	Wert zum Zeitpunkt (3 Stunden)
FBZ		Fahrbahnzustand	A	Streckenattribute
SWS		Straßenwetterstation	B	berechnet
GT	°C	Gefriertemperatur	E	am Einsatzfahrzeug gemessen
KO	%	Salzlösungskonzentration	Ex	externe Messung (z. B. Thermomat)
NI	mm	Niederschlagsmenge	F	Fahrbahn
NS		Niederschlagsart	G	Gefrier
PZ	h	Prognosezeitraum	K	Korrekturwert
R <sup>2</sup>		Bestimmtheitsmaß	L	Liegezeitverlust
SD	g/m <sup>2</sup>	Streudichte	max	Maximum (höchster Wert)
SD A	g/m <sup>2</sup>	Streudichte Berechnungsstufe A	min	Minimum (geringster Wert)
SD B	g/m <sup>2</sup>	Streudichte Berechnungsstufe B	Opt	optimal
SD C	g/m <sup>2</sup>	Streudichte Berechnungsstufe C	P	prognostisch
SM	g/m <sup>2</sup>	Streustoffmenge	R	Rest
SR	kg/m <sup>2</sup> /s	Resublimationsrate (Zuwachsgeschwindigkeit von gefrorenem Wasser oder Raureif). Resublimation ist die Phasenumwandlung vom gasförmigen in festen Aggregatzustand.	S	Streckenattribute
ST		Steigung der linearen Trendlinie	verl	Verlustmenge innerhalb eines definierten Zeitraumes
SZ		Straßenzustandsprognose nach DWD-Schema = WR	vorh	zum Zeitpunkt der Messung/ Berechnung vorhandener Wert
T	°C	Temperatur	X	Prognosezeitpunkt X h (X = 0 bis 3)
TA	°C	Lufttemperatur in 2 m Höhe		
TD	°C	Taupunkttemperatur der Luft		
WFD	µm	Wasserfilmdicke		
WS	m/s	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe		



## 1 Einleitung

In dem 2013 abgeschlossenen Vorprojekt „Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst“ wurden die theoretischen Grundlagen und praktischen Erfahrungen zum Taustoffeinsatz im Winterdienst in einen Algorithmus gefasst. Dieser Algorithmus hat die objektiv erforderliche Streudichte ermittelt, die für die Verhinderung von Fahrbahnglätte unter Berücksichtigung der prognostizierten Wetterentwicklung und des Fahrbahnzustandes erforderlich ist.

Aufbauend auf dem Phasendiagramm für die Mischung von Natriumchlorid und Wasser wurde ein Berechnungsalgorithmus entwickelt, der Temperatur und Wasserfilmdicke auf der Fahrbahn in wählbaren Prognosezeiträumen berücksichtigt. Die stündlich aktualisierten Prognosedaten werden während der Einsatzfahrt des Winterdienstfahrzeuges übermittelt und haben direkten Einfluss auf die Streudichte.

Neben den Prognosedaten haben technologische und streckenbezogenen Randbedingungen direkten Einfluss auf die berechnete Streudichte.

Als streckenbezogenen Randbedingungen können Streckeneigenschaften (z. B. Art des Belages, Brückenlage der Fahrbahn) und Restsalzmengen auf der Fahrbahn berücksichtigt werden.

Darüber hinaus finden auch technologische Randbedingungen wie die Streutechnologie (wahlweise FS30 oder FS100) und der Prognosezeitraum Berücksichtigung.

Es wurde festgestellt, dass die Berechnung der optimalen Streudichte mit einem Algorithmus unter Berücksichtigung von Mess- und Prognosewerten vor allem bei präventiven Streueinsätzen ein bisher ungenutztes Einsparungspotenzial erschließt.

Der Dosierungsalgorithmus kann in Verbindung mit der im Fahrzeug installierten Hardware den bei der Winterdienststreuung stark ausgeprägten subjektiven Faktor bei der Wahl der Streudichte verringern. Insofern besteht die Möglichkeit, mit derartigen Assistenzsystemen beim Salzeinsatz ein großes Einsparungspotenzial zu erschließen. Die Stärke des Gesamtsystems liegt im Vergleich zum reinen Pyrometer-System in der besseren Berücksichtigung der zu erwartenden Flüssigkeitsmengen auf der Fahrbahn. Das erhöht die Sicherheit des Fahrpersonals bei der Wahl der Streudichte im Falle

von präventiven Streuungen. Die Funktionsfähigkeit des erprobten Systems wurde nachgewiesen. Für eine praxismgerechte Umsetzung muss die Funktion des Systems stabilisiert werden. Danach kann der Algorithmus direkt für die Einstellung der Streudichte an den Streumaschinen eingesetzt werden.

Mit Ziel der Einführung von Fahrerassistenzsystemen in die Winterdienstpraxis sollten folgende Schritte unternommen werden:

1. Durchführung weiterer Praxisversuche,
2. Modifizierung des Algorithmus in Auswertung weiterer Praxisversuche und unter Berücksichtigung der Fachdiskussionen,
3. Anpassung des Systems an die Streumaschinen weiterer Hersteller,
4. Durchführung von überwachten Praxiseinsätzen mit direkter Übertragung der errechneten Streudichte auf die Steuerung der Streumaschinen,
5. Einbeziehung einer mobilen Restsalzmengensmessung, sobald die technischen Möglichkeiten dafür bestehen,
6. Förderung der Entwicklung von technischen Systemen zur mobilen Messung der Wasserfilmdicke, um diesen wichtigen Parameter für die Berechnung der Streudichte bei kurativen Einsätzen nutzen zu können und
7. Quantifizierung der bei Schneefall erforderlichen Taustoffmengen, um „Schneemulm“ zu erzeugen.

Die Einführung von Assistenzsystemen zur parametergesteuerten Ermittlung der optimalen Streudichte sollte als wichtiger Schritt angesehen werden, um den Straßenwinterdienst zukünftig noch wirtschaftlicher, sicherer und mit geringsten Umweltbelastungen durchführen zu können.

Der aktuelle Forschungsauftrag knüpfte an die vorgeschlagenen Schritte aus dem Vorprojekt „Optimierung der Streustoffausbringung – Modell der objektiv notwendigen Streudichten im Straßenwinterdienst“ an.

Die Testinstallationen werden an einer Küpper-Weisser-Streumaschine und an einer Kombistreumaschine von Aebi Schmidt erprobt. Mit dem jetzt zusätzlich eingesetzten mobilen Sensor „MARWIS“

der Firma Lufft besteht die Möglichkeit die Wasserdünnigkeit zu messen. Aus dem BAST-Forschungsprojekt „Optimierung der auftauenden Streustoffe für den Winterdienst“ stehen Erkenntnisse über die bei Schneefall erforderlichen Taustoffmengen zur Verfügung.

Nach wie vor problematisch ist die mobile Ermittlung von Restsalzmengen auf der Fahrbahnoberfläche. Mit dem MARWIS-Sensor besteht jedoch eine indirekte Möglichkeit, die Restsalzmengen zu bestimmen. Ob damit praxistaugliche Ergebnisse erzielt werden, muss noch untersucht werden.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

Grundsätzliche Überlegungen zu den Zusammenhängen bei der Glättebildung auf Straßenoberflächen, in Abhängigkeit von meteorologischen Einflüssen wurden zu einem „Modell zur Glättewarnung im Straßenwinterdienst“ zusammengefügt. Dabei wurde auch untersucht, welche Messwerte von Straßenwetterstationen (SWS) für die Prognose der Glättebildung von besonderer Relevanz sind (BADEL, 2005).

Einzelne technische Systeme, die auch in Deutschland angewandt werden, geben Hilfestellung bei der Festlegung der optimalen Streudichte. Dazu gehören folgende technische Lösungen:

- Anzeige der Fahrbahntemperatur im Fahrerhaus (Messung durch Pyrometer),
- automatisierte Steuerung der Streudichte in Abhängigkeit von Fahrbahntemperatur in Verbindung mit der manuellen Auswahl der Wasserfilm- bzw. Glätteschichtdicke.

Die temperaturabhängigen Dosiersysteme werden unter verschiedenen Herstellerbezeichnungen angeboten (siehe Tabelle 2-1).

Hersteller	Bezeichnung
Aebi Schmidt	Thermologic
Boschung/Küpper-Weisser	Thermomat
Epoke	EpoTherm

Tab. 2-1: Herstellerbezeichnungen

Der bekannte Stand der Forschungen bis zum Jahr 2013 wurde im Abschlussbericht des Vorprojektes dokumentiert (HAUSMANN, 2015).

Aus der Fachliteratur der letzten Jahre ist zu entnehmen, dass sich die Forschungen mit der Weiterentwicklung von einzelnen Messkomponenten beschäftigen, die für die Optimierung der Dosierung eingesetzt werden könnten.

In Spanien wurde ein mobiler Sensor entwickelt, der Salzmenge auf trockenen Fahrbahnoberflächen messen kann (RUIZ-LLATA, 2014). Arbeitsprinzip des Sensors ist die Messung der laserinduzierten Fluoreszenz. Der maximale Messfehler wird für eine Salzmenge von 20 g/m<sup>2</sup> mit 10 % angegeben. Die kompakte Bauweise soll eine Installation auf Einsatzfahrzeugen möglich machen. Eine schriftliche Rückfrage bei der Autorin des Fachartikels im November 2016 ergab, dass der Sensor im Moment nur ein Laborprototyp ist. Ein für Feldversuche geeigneter Prototyp soll in nächster Zeit entwickelt werden, wenn die Finanzierung geklärt ist.

Seit wenigen Jahren werden berührungslose Sensoren angeboten, welche Temperatur und Wasserdünnigkeit bzw. Wasseräquivalent auf der Straßenoberfläche ermitteln.

Außerdem wird der Zustand auf der Fahrbahn klassifiziert (trocken, feucht, nass, Eis, Schnee). Aus diesen Werten wird über Algorithmen, die von den Herstellern nicht offengelegt sind, ein Reibungskoeffizient errechnet. Aus Fachveröffentlichungen sind einige Details bekannt (HAAVA-SOJA, 2010).

Wissenschaftlich interessant sind Vergleichstests zwischen Sensoren, die auf dem europäischen Markt angeboten werden (MALMIVUO, 2013; WAHLIN, 2016).

In dem Vortrag von WAHLIN wird über den Vergleichstest von fünf Sensoren berichtet, von denen drei mobil eingesetzt werden können.

Es handelt sich um folgende mobile Sensoren:

- Teconer RCM412,
- Metsense MetRoad Mobile und
- MARWIS.

Die Klassifizierungsgenauigkeit der Sensoren wurde an drei verschiedenen Zuständen von Fahrbahnoberflächen im Labor getestet (nass, eisbedeckt, schneebedeckt).

Dieser Test ist besonders interessant, da der im laufenden Projekt verwendete MARWIS-Sensor auch getestet wurde.

Im Dosierungsalgorithmus wird für die Berechnung der Streudichte bei kurativen Streuungen der für die Wasserfilmdicke (bei Schnee und Eis Wasseräquivalent) gemessene Wert verarbeitet. Beim Test auf grauem Asphalt waren die Messwerte des MARWIS-Sensors in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke 40 bis 60 % niedriger als der Sollwert. Auf schwarzem Asphalt erhöhte sich der Fehler auf 80 bis 100 %.

Die Tester hielten diese relativ großen Messfehler in Anbetracht der Tatsache, dass es bei mobilen Sensoren keine Alternativen gibt, für akzeptabel.

Die Punktwettervorhersagen des DWD stellen eine wesentliche Grundlage für die automatisierte Dosierungsberechnung dar. Sie basieren auf den Daten der Straßenwetterstationen der betreffenden Streckenabschnitte. Die Qualität der Vorhersagen ist auch von der Qualität der Messwerte abhängig. In der Europäischen Norm DIN EN 15518-3 werden Messanforderungen an stationäre Anlagen gestellt.

Es sind folgende Fehlergrenzen festgelegt:

- Temperaturbereich  $-15\text{ °C}$  bis  $10\text{ °C}$ , ( $\pm 0,2\text{ °C}$ ) und
- Temperaturbereich  $-30\text{ °C}$  bis  $-15\text{ °C}$ , ( $\pm 0,8\text{ °C}$ ).

Für mobile Systeme gibt es noch keine normativen Festlegungen.

Aus aktuellen Untersuchungen (HOLLDORP, 2015) ist zu entnehmen, dass die Toleranzgrenzen im Mittel eingehalten, aber in Einzelfall auch überschritten werden.

Aus Japan ist ein Projekt bekannt, bei dem ein Sensor zur Messung der Restsalzmenge eingesetzt wird (SUYA et al., 2018). Die Information über die Restsalzmenge auf der Fahrbahn wird aus der Analyse des Sprühnebels gewonnen, der

durch ein Fahrzeugrad aufgewirbelt wird. In Abhängigkeit von der Fahrbahnoberflächentemperatur und der Restsalzmenge kann die Streudichte der Einsatzfahrzeuge unter Umständen verringert werden.

Mit einem Salzmengenmesser im Radkasten (Salinometer) befasst sich auch ein Projekt, das von der Firma Honda R&D Co. Ltd bearbeitet wird (OHIRO, 2018). Dabei ist der Salzmengenmesser im Radkasten eines Fahrzeuges untergebracht.

In einem weiteren japanischen Projekt werden in den Reifen eines Vorausfahrzeuges eingebaute Sensoren dazu benutzt, den Fahrbahnzustand zu detektieren (SAITO et al., 2018). In Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand und der Fahrbahnoberflächentemperatur wird die Streustoffladung der Einsatzfahrzeuge variiert.

Ein neuer theoretischer Ansatz, die Restsalzmengen zu messen wurde auf der Winterdienstkonferenz 2018 in Danzig vorgetragen. Die Idee besteht darin, dem Streustoff ein grün fluoreszierendes Protein hinzuzufügen, welches mit geeigneten Geräten die Messung der Restsalzmenge auf der Fahrbahn ermöglichen soll (BULLAS, 2018). Der Vorteil dieser Lösung würde darin liegen, dass Restsalzmengen auch ohne Feuchtigkeit auf der Fahrbahn gemessen werden könnten.

In Dänemark wird unter dem Titel De-Icers Management System (DIMS) daran gearbeitet, die Voraussetzung für eine automatisierte Streuung zu erarbeiten (ERAM, 2018). Dazu gehören Tests der verfügbaren berührungslosen Sensoren zur Feststellung des Fahrbahnzustandes (ROSTMOS-Projekt) und die Modellierung der Salzverluste auf der Fahrbahn, um die Restsalzmengen zu berechnen (MORS-Projekt).

### 3 Theoretische Grundlagen der Wirkung von Tausalzen

#### 3.1 Phasendiagramm Wasser – Salz

In trockener Form wird in Deutschland fast ausschließlich NaCl (Stein- oder Siedesalz) eingesetzt. Die Qualitätsanforderungen für NaCl sind in der DIN EN 16811-1 festgelegt.

Die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen von NaCl leiten sich aus dem Phasendiagramm ab. Aus diesem Diagramm ist abzulesen, welche Konsistenz die Salzlösung in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur annimmt.

In Bild 3-1 ist das Phasendiagramm von NaCl für Temperaturen unter 0 °C dargestellt.

Für die Glätteverhinderung bzw. Glättebekämpfung auf Verkehrsflächen muss so viel Taustoff ausgebracht werden, dass kein Eis oder fest gefahrene Schneedecken mit Glätteschicht auf der Fahrbahn entstehen können. Das ist mit Sicherheit der Fall, wenn sich Salzlösung ohne Eiskristalle auf der Fahrbahn befindet. Auch die Phase Salzlösung mit Eiskristallen führt nicht automatisch zu gefährlicher Glätte. Hier ist es von Bedeutung, welches Masseverhältnis zwischen Salzlösung und Eiskristallen besteht. Bekannt ist auch der Effekt, dass eine Salzmenge, die nicht ausreicht den

Schnee auf der Fahrbahn zu tauen, zumindest die Verdichtung des Schnees und damit die Eisbildung an der Oberfläche verhindert. Man spricht in diesem Zusammenhang von „Schneemulm“. Auch dieser Effekt ist in der Phase „Salzlösung + Eiskristalle“ angesiedelt.

#### 3.2 Einflussfaktoren auf die Glättebildung

Glättebildung auf Verkehrsflächen ist bei Anwendung von Tausalzen von drei Primärfaktoren abhängig:

1. Fahrbahnoberflächentemperatur (genaue Temperatur in der Salzlösung auf der Fahrbahn),
2. Konzentration der Salzlösung auf der Fahrbahn und
3. Art des Tausalzes.

Diese Primärfaktoren sind von weiteren Einflüssen (Sekundärfaktoren) abhängig. Das sind im wesentlichen meteorologische, fahrbahnspezifische, verkehrsunabhängige und technologische Faktoren. In Tabelle 3-1 sind die Primärfaktoren in Verbindung mit den Sekundärfaktoren aufgeführt. Die Primärfaktoren Fahrbahntemperatur und Taustoff-

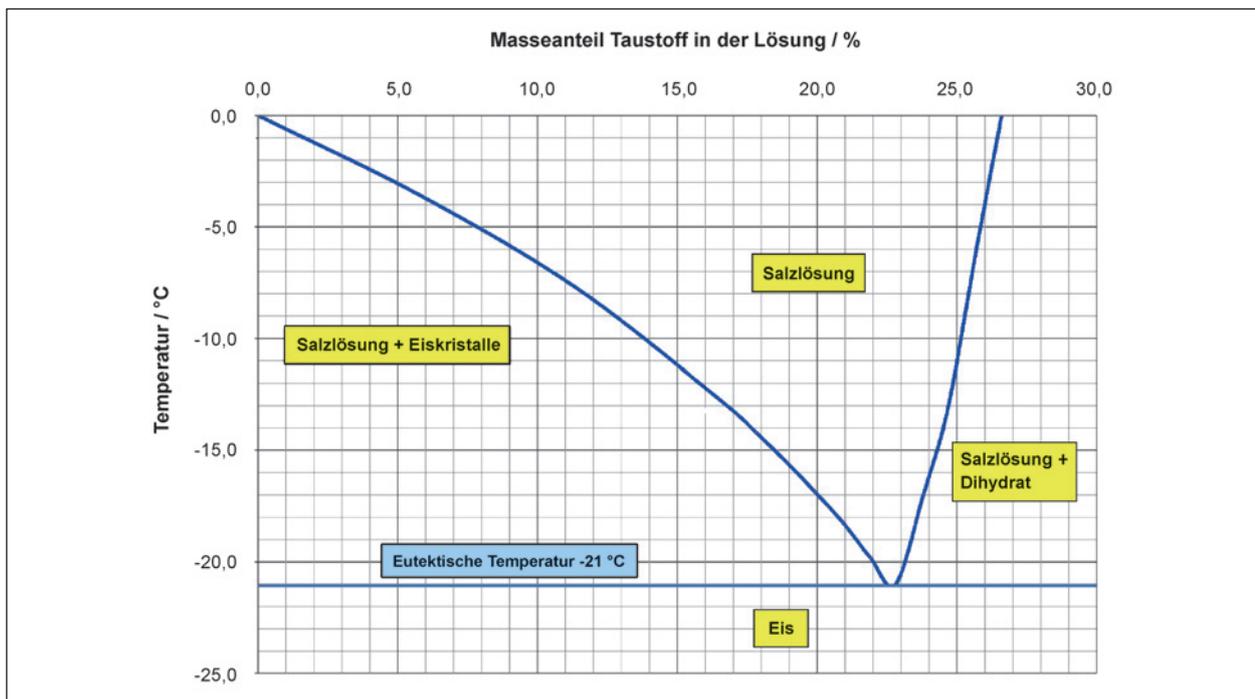


Bild 3-1: Phasendiagramm H<sub>2</sub>O – NaCl

konzentration werden teilweise von den gleichen Sekundärfaktoren beeinflusst. Beispielsweise hat die Art des Fahrbahnbelages Einfluss auf die Fahrbahntemperatur und auf die Taustoffkonzentration (z. B. offenporiger Asphalt). Aus der Vielzahl der Einflussfaktoren entsteht für die Prognose von Glättezuständen bzw. für die optimale Festlegung von Streudichten eine relativ komplexe Ausgangssituation.

Fahrbahnoberflächentemperatur	Konzentration des gelösten Taustoffes an der Fahrbahnoberfläche	Taustoffart
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lufttemperatur</li> <li>• Untergrundtemperatur</li> <li>• Strahlung</li> <li>• Bewölkung</li> <li>• Wind</li> <li>• Verkehrsmenge</li> <li>• Fahrbahnbelag</li> <li>• Taustoffart</li> <li>• Taustoffmenge</li> <li>• Wasserfilmdicke</li> </ul>	<p><b>Salzmenge</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Streudichte               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Qualität der Taustoffausbringung</li> <li>– Technologie der Taustoffausbringung</li> <li>– Taustoffqualität</li> </ul> </li> <li>• Restsalz               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Qualität der Taustoffausbringung</li> <li>– Technologie der Taustoffausbringung</li> <li>– Taustoffqualität</li> <li>– Fahrbahnbelag</li> <li>– Verkehrsmenge</li> </ul> </li> </ul> <p><b>Wasserfilmdicke</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Niederschlag</li> <li>• Wasserabfluss</li> <li>• Abtrocknung               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Fahrbahntemperatur</li> <li>– Lufttemperatur</li> <li>– Relative Luftfeuchte</li> <li>– Taustoffart</li> </ul> </li> <li>• Kondensation               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Fahrbahntemperatur</li> <li>– Lufttemperatur</li> <li>– Relative Luftfeuchte</li> </ul> </li> <li>• Fahrbahnbelag,</li> <li>• Fahrbahnoberfläche               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Struktur</li> <li>– Geometrie</li> </ul> </li> <li>• Verkehrseinfluss               <ul style="list-style-type: none"> <li>– Menge</li> <li>– Geschwindigkeit</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• NaCl</li> <li>• CaCl<sub>2</sub></li> <li>• MgCl<sub>2</sub></li> </ul>

Tab. 3-1: Einflussfaktoren auf die Glättesituation auf taustoff-behandelten Fahrbahnoberflächen

## 4 Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus für die optimale Streudichte

### 4.1 Allgemeiner Ansatz

Unter optimaler Streudichte ( $SD_{Opt}$ ) wird die Mindestmenge an Taustoff verstanden, die pro Quadratmeter ausgebracht werden muss, um Glätte auf Verkehrsflächen kurzfristig zu beseitigen oder innerhalb eines technologisch erforderlichen bzw. sinnvollen Zeitraumes (Planzeitraum) zu verhindern.

Unter dem technologisch erforderlichen Zeitraum ist die Zeitspanne zu verstehen, innerhalb derer eine Wiederholungsstreuung ausgeführt werden könnte oder sollte. Das kann von den Umlaufzeiten, der Schichtplanung und dem Wetterverlauf abhängig sein.

Die nachfolgenden Betrachtungen werden für den Einsatzfall „Präventive Streuung“ durchgeführt. Das heißt, die optimale Streudichte wird für einen Glättefall errechnet, der für maximal 8 Stunden nach dem Streuzeitpunkt prognostiziert wurde. Bei den Berechnungen in nachfolgenden Beispielen werden die Daten für NaCl verwendet. Der Berechnungsalgorithmus gilt gleichfalls für andere Tausalze.

Nach der Abhängigkeit von den Primärfaktoren lässt sich für einen bestimmten Taustoff allgemein folgender Zusammenhang formulieren:

$$SD_{Opt} = f(FBT_{min}, WFD_E, TSQ, SM_{verl}) \quad (1)$$

Darin bedeuten:

$FBT_{min}$  in °C    Niedrigste Fahrbahnoberflächentemperatur, die innerhalb des technologisch erforderlichen Zeitraumes zu erwarten ist.

$WFD_E$  in mm    In Wasserfilmdicke umgerechnete Flüssigkeitsmenge, die innerhalb des technologisch erforderlichen Zeitraumes maximal auf der Fahrbahnoberfläche vorhanden ist.

$TSQ$  in g/m<sup>2</sup>    Vorhandene Streustoffmenge aus zurückliegenden Streuungen, die sich zum Zeitpunkt der aktuellen Streuung auf der Fahrbahn befindet.

SM<sub>verl</sub> in g/m<sup>2</sup> Streustoffmenge auf der Fahrbahn, mit deren Verlust innerhalb des Planzeitraumes gerechnet werden muss (s. a. Kapitel 4.5).

Für kurative Einsätze gelten grundsätzlich die gleichen Zusammenhänge. Für die Fahrbahnoberflächentemperatur und die Wasserfilmdicke sind dann die aktuellen Werte relevant. Ein Streustoffverlust (SM<sub>verl</sub>) muss nicht kalkuliert werden. Der Algorithmus für diesen Fall könnte einfacher gestaltet sein. In diesem Zusammenhang ist anzunehmen, dass über die Temperaturmessung hinaus, der visuelle Eindruck des Bedienpersonals im Vergleich zu Niederschlagsmessungen die bessere Information darstellt.

### 4.2 Mathematische Beschreibung der Phasengrenzlinie

Die Phasengrenzlinie zwischen den Phasen „Salzlösung + Eiskristalle“ und „Salzlösung“ kann durch eine polynomische Gleichung beschrieben werden.

Für  $y = T_G$  und  $x = KO$  ergibt sich:

$$T_G = -0,0006 KO^3 - 0,0007 KO^2 - 0,5941 KO \quad (2)$$

$T_G$  Gefriertemperatur/°C

KO Salzlösungskonzentration/%

Für den Fall  $FBT = T_G$  beschreibt die Gleichung den Grenzbereich zwischen nasser und vereister Fahrbahn (Bild 4-1).

In der Salzlösungskonzentration (KO) sind Streustoffmenge und Wassermenge (Wasserfilmdicke – WFD) enthalten.

$$KO = (SM/WFD) \times 100 \quad (3)$$

Nach SM aufgelöst ergibt sich:

$$SM = (KO \times WFD)/100 \quad (4)$$

Formel (2) ermöglicht die Berechnung der Gefriertemperatur für alle sinnvollen Wertepaare der Wasserfilmdicke (WFD) und der Streustoffmenge (Tabelle 4-1).

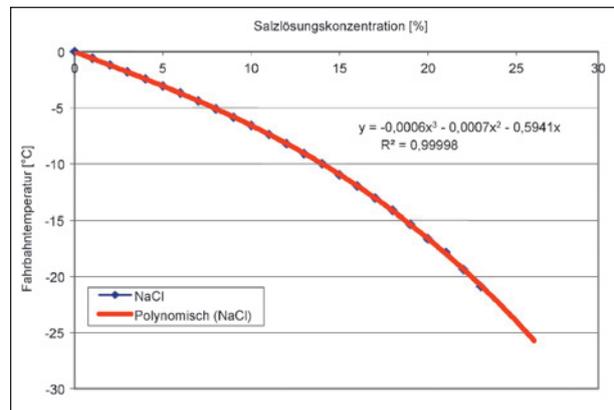


Bild 4-1: Phasengrenzlinie als polynomische Formel

WFD mm	Streustoffmenge [g/m <sup>2</sup> ]									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	
0,01	0,0									
0,02	0,0	-17,0								
0,03	0,0	-10,4								
0,04	0,0	-7,5	-20,1							
0,05	0,0	-5,9	-14,6							
0,06	0,0	-4,9	-11,5							
0,07	0,0	-4,2	-9,5	-17,0						
0,08	0,0	-3,6	-8,1	-14,0						
0,09	0,0	-3,2	-7,0	-11,9	-18,4					
0,10	0,0	-2,9	-6,2	-10,4	-15,7					
0,15	0,0	-1,9	-4,0	-6,4	-9,1	-12,3	-16,1	-20,7		
0,20	0,0	-1,5	-3,0	-4,6	-6,4	-8,4	-10,7	-13,3	-16,3	
0,30	0,0	-1,0	-2,0	-3,0	-4,1	-5,2	-6,5	-7,8	-9,3	
0,40	0,0	-0,7	-1,5	-2,2	-3,0	-3,8	-4,7	-5,6	-6,5	
0,50	0,0	-0,6	-1,2	-1,8	-2,4	-3,0	-3,7	-4,4	-5,0	

Tab. 4-1: Gefriertemperaturen in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke (WFD) und Streustoffmenge

Die Ergebnisse der Berechnung können als Kurvenschar dargestellt werden. Jede Kurve steht für eine Wasserfilmdicke (Bild 4-2).

Zur Vereinfachung der Berechnungen ist es sinnvoll, mit linearen Gleichungen zu arbeiten. Dazu werden lineare Trendlinien hinzugefügt und deren Gleichung ermittelt. Für jede Wasserfilmdicke gibt

es eine lineare Trendlinie. Die Trendlinien unterscheiden sich nur durch ihre Steigung.

In einem ersten Schritt zeigt sich, dass dadurch in bestimmten Temperaturbereichen ein zu geringer Streustoffbedarf errechnet wird. Die Abweichung beträgt maximal  $1 \text{ g/m}^2$  (Bild 4-3). Zur Verringerung dieser Abweichung wurden in einem zweiten Schritt

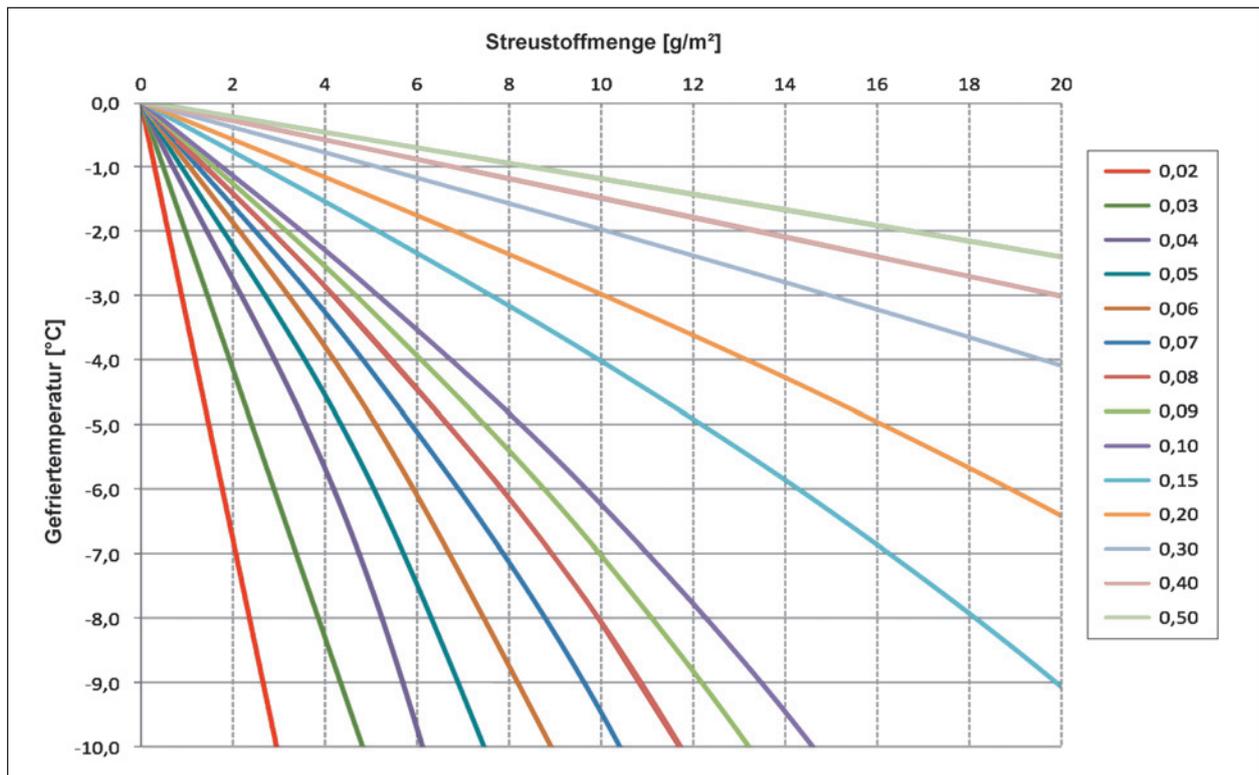


Bild 4-2: Gefriertemperatur in Abhängigkeit von Streustoffmenge und Wasserfilmdicke in mm

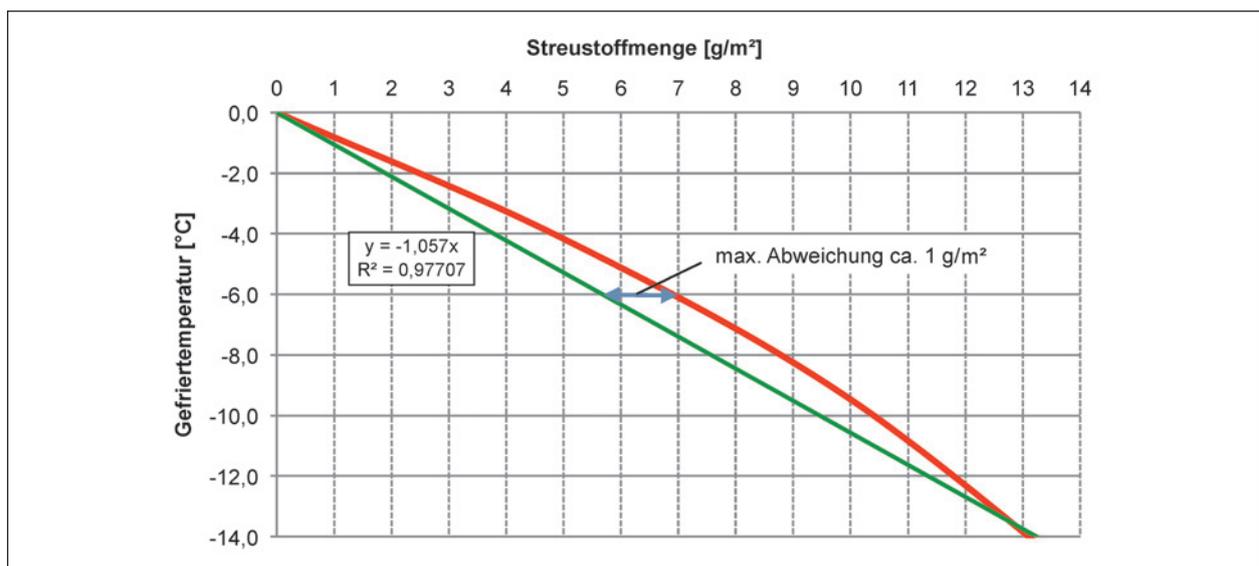


Bild 4-3: Verlauf der linearen Trendlinie im Vergleich zum berechneten Kurvenverlauf auf Basis der Phasengrenzlinie (rote Linie) – Beispiel mit Wasserfilmdicke WFD 0,07 mm

WFD mm	Streustoffmenge [g/m <sup>2</sup> ]								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0,01	0,0								
0,02	0,0								
0,03	0,0	-10,4							
0,04	0,0	-7,5							
0,05	0,0	-5,9							
0,06	0,0	-4,9							
0,07	0,0	-4,2							
0,08	0,0	-3,6							
0,09	0,0	-3,2	-7,0						
0,10	0,0	-2,9	-6,2						
0,15	0,0	-1,9	-4,0	-6,4					
0,20	0,0	-1,5	-3,0	-4,6	-6,4	-8,4			
0,30	0,0	-1,0	-2,0	-3,0	-4,1	-5,2	-6,5	-7,8	
0,40	0,0	-0,7	-1,5	-2,2	-3,0	-3,8	-4,7	-5,6	-6,5
0,50	0,0	-0,6	-1,2	-1,8	-2,4	-3,0	-3,7	-4,4	-5,0

Tab. 4-2: Eingeschränkter Wertebereich für die Berechnung der Trendlinien

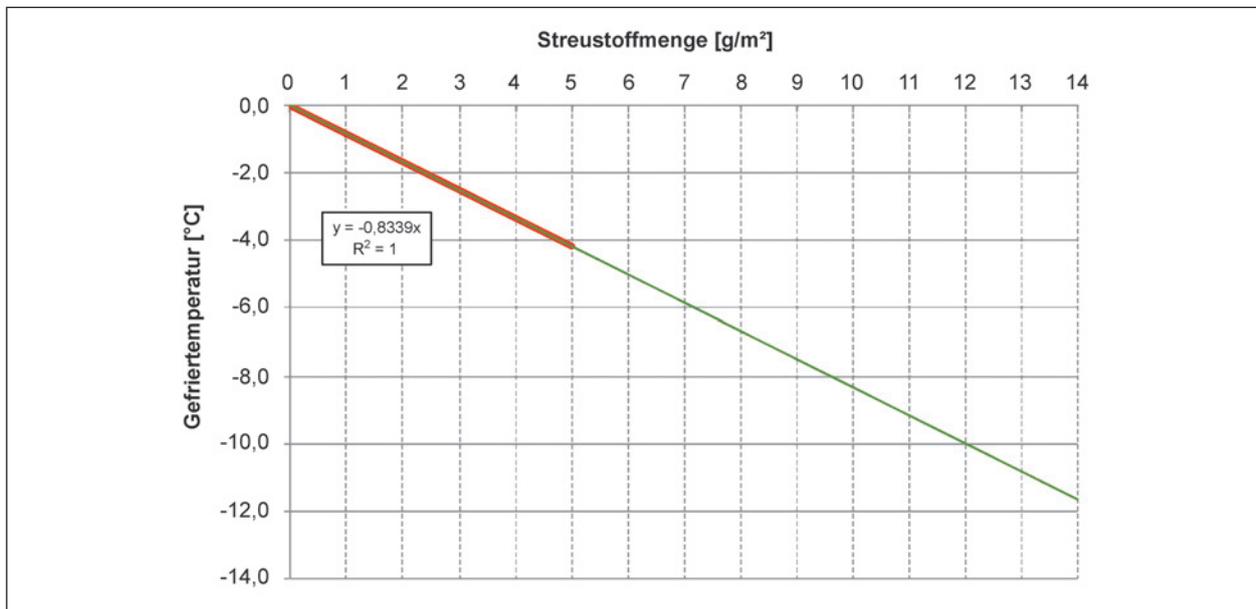


Bild 4-4: Übereinstimmung von Trendlinie und linearer Funktion im eingeschränkten Temperaturbereich (Beispiel für 0,07 mm Wasserfilmdicke)

die linearen Trendlinien innerhalb eines eingeschränkten Temperaturbereiches (bis minimal -10 °C) berechnet (Tabelle 4-2). Damit liegt die Trendlinie im Temperaturbereich bis -6 °C immer sehr nahe der Ideallinie (Bild 4-4). Bei niedrigeren Temperaturen gibt es dadurch mehr Sicherheit.

Für jede Wasserfilmdicke wird die Steigung (ST) der linearen Trendlinie berechnet (Tabelle 4-3). Aus

der grafischen Darstellung der Wertepaare lässt sich ein mathematisch fassbarer Zusammenhang erkennen (Bild 4-5). Die Steigung ST der linearen Trendlinie ist an eine bestimmte Wasserfilmdicke gebunden und drückt aus, in welchem Maß die erforderliche Streustoffmenge von der Fahrbahntemperatur abhängig ist. Bei geringer Wasserfilmdicke (z. B. 0,03 mm) ist der Einfluss der Fahrbahntemperatur auf die erforderliche Streustoffmenge deut-

WFD/mm	Steigung der linearen Trendlinie ST
0,03	2,0759
0,04	1,5021
0,05	1,1819
0,06	0,9769
0,07	0,8339
0,08	0,7282
0,09	0,6918
0,10	0,6156
0,15	0,4357
0,20	0,3242
0,30	0,2199
0,40	0,1578
0,50	0,1235

Tab. 4-3: Steigung der linearen Trendlinie für verschiedene Wasserfilmdicken

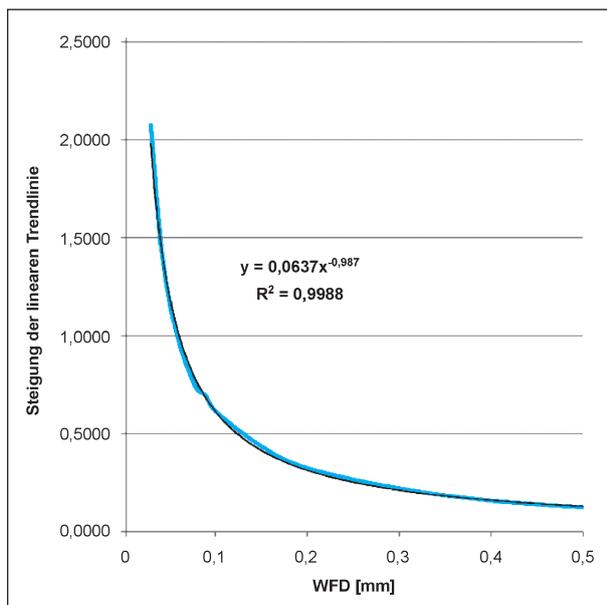


Bild 4-5: Steigung der linearen Trendlinien in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke

lich geringer als bei großen Wasserfilmdicken (z. B. 0,5 mm). Dieser Zusammenhang ist auch aus der grafischen Darstellung vor der Linearisierung erkennbar (Bild 4-2).

In der Formeldarstellung ergibt sich:

$$ST = 0,0637 \times WFD^{-0,987} \quad (5)$$

Dieser rechnerisch abgeleitete Zusammenhang zwischen Steigung der linearen Trendlinien und Wasserfilmdicke ermöglicht die Entwicklung einer relativ einfachen Formel für die Berechnung der er-

forderlichen Streudichte. Unter Benutzung dieser exponentialen Gleichung wird eine Formel gebildet, mit der die theoretisch erforderliche Mindestmenge an Taustoff anhand der Temperatur und der Wasserfilmdicke errechnet werden kann.

Vereinfacht (Exponent auf -1 gerundet):

$$ST = 0,0637/WFD \quad (6)$$

$y = -mx$  (allgemeine Form der linearen Trendlinie)

$y = T_G$  (Gefriertemperatur/°C)

$m = ST$  (Steigung der linearen Trendlinie)

$x = SM$  (Streustoffmenge/g/m<sup>2</sup>)

$$\Rightarrow TG = -ST \times SM \quad (7)$$

(6) in (7) eingesetzt ergibt:

$$T_G = (-0,0637/WFD) \times SM \quad (8)$$

Nach SM umgestellt:

$$SM = (T_G \times WFD)/-0,0637 \quad (9)$$

Für den Fall der Streustoffdosierung gilt unter Verwendung der dafür relevanten Formelzeichen:

$$SD = (FBT \times WFD)/-0,0637 \quad (10)$$

Damit wird eine Streudichte berechnet, welche die bekannten chemisch-physikalischen Zusammenhänge berücksichtigt.

Werden für FBT und WFD Prognosewerte eingesetzt, finden auf diese Weise meteorologische Einflüsse Eingang in die Berechnung. Für die Berechnung der optimalen Streudichte sinnvolle Prognosewerte sind  $T_{FK}$  und  $WFD_{max}$ . Als  $FBT_K$  wird die aus den Prognosewerten kalkulierte Fahrbahntemperatur bezeichnet, die in die Berechnung eingeht (siehe Kapitel 4.3).

### 4.3 Prognose der Fahrbahntemperatur

$FBT_K$  kann durch eine Kombination aus aktueller Messung der Fahrbahntemperatur (Pyrometer) und dem z. B. aus der Punktvorhersage des DWD ermittelten Temperaturtrend für die Zeit von 0 bis 8 Stunden berechnet werden. Die Punktvorhersagen des DWD werden stündlich aktualisiert auf die Einsatzfahrzeuge übertragen. Diese Lösung verspricht nach allen bisherigen Erfahrungen eine größere

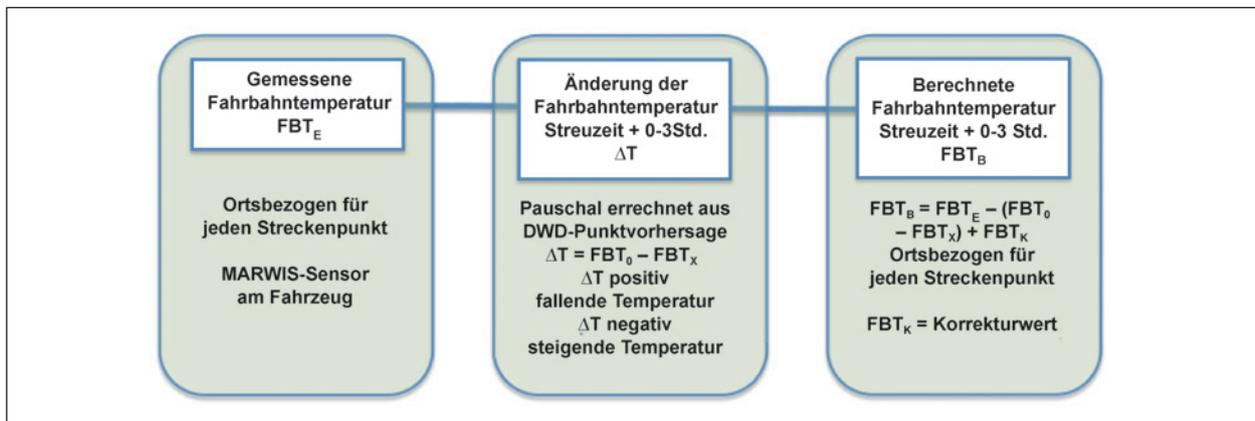


Bild 4-6: Ermittlung der berechneten Fahrbahntemperatur

Genauigkeit der Temperaturprognose als eine Verfahrensweise, die auf „Thermal Mapping“ basiert, da die an der Position des Einsatzfahrzeuges gemessenen Fahrbahntemperaturen in die Berechnung eingehen. Abgeleitet aus den praktisch realisierbaren Umlaufzeiten wurde in den Feldversuchen mit einem Prognosezeitraum von maximal 3 Stunden gerechnet. In die Berechnung geht der kleinste innerhalb der nächsten drei Stunden prognostizierte Temperaturwert  $FBT_x$  ein (Bild 4-6). Die Software ist jedoch so konzipiert, dass jederzeit mit anderen Prognosezeiträumen gerechnet werden kann.

Zusätzlich wurde der Korrekturwert  $FBT_K$  in die Berechnung eingeführt. Er berücksichtigt bekannte Temperaturabweichungen zwischen den Messstellen und ermöglicht zum Beispiel die rechtzeitige Streudichte Anpassung an unterkühlte Brückenfahrbahnen.

$FBT_K > 0 \Rightarrow$  Temperatur erfahrungsgemäß höher als an der nächstliegenden Messstelle,

$FBT_K < 0 \Rightarrow$  Temperatur erfahrungsgemäß niedriger als an der nächstliegenden Messstelle.

## 4.4 Wasserfilmdicke

### 4.4.1 Messung der Wasserfilmdicke

Der Begriff Wasserfilmdicke ist in DIN EN 15518-3 als mittlere Dicke des Wasserfilms auf einer planen Oberfläche definiert.

Für die kurative Streuung wird die Wasserfilmdicke mit dem MARWIS-Sensor bestimmt. Nach Herstel-

lerangaben erfolgt die Messung mittels berührungsloser optischer Spektroskopie (MARWIS, 2014). Angegeben wird der Anteil des flüssigen Wassers. Das heißt, dass unabhängig von der Erscheinungsform (Schnee, Eis) das sogenannte Wasseräquivalent ermittelt wird.

Für die Berechnung des Salzbedarfes wird zusätzlich berücksichtigt, dass für die Glätteverhinderung bei Schneefall nur etwa 10 % des Taustoffes benötigt wird, der für gefrierendes Wasser oder Eis notwendig wäre.

Unter den Bedingungen einer Fahrbahn handelt es sich um Wassermengen, die sich in einem Bereich von unterhalb bis oberhalb der Kontaktebene der unebenen Fahrbahnoberfläche befinden können, die keinen homogenen Wasserfilm bilden. Für die Berechnung der optimalen Streudichte ist genau genommen nicht die Wasserfilmdicke, sondern die Wassermenge entscheidend. Die vom MARWIS-Sensor gemessenen Werte sind daher zu verifizieren.

Dazu ist der sogenannte Wettex-Tuchtest besonders geeignet. Mit ihm wird die Wassermenge pro Flächeneinheit direkt bestimmt. Der ermittelte Wert kann auch als rechnerische Wasserfilmdicke bezeichnet werden. Nach LAMM ist sie der Quotient aus aufgebrachtener Wassermenge und benetzter Grundfläche ( $\text{mm}^3/\text{mm}^2 = \text{mm}$ ).

### 4.4.2 Prognose der Wasserfilmdicke

Für Berechnung der Streudichte bei präventiver Streuung muss eine Prognose der Wasserfilmdicke errechnet werden. Mit der maximalen Wasserfilmdicke ( $WFD_{\max}$ ) innerhalb des Wirkungszeitraumes

Bezeichnung	Wassermenge [g/m <sup>2</sup> ]	Wasserfilmdicke [mm]	Beschreibung
wenig feucht	5 – 20	0,005 – 0,020	sichtbar dunkle Straßenoberfläche
feucht	20 – 50	0,020 – 0,050	deutlich dunkle Straßenoberfläche
nass	50 – 200	0,050 – 0,200	beginnende Sprühfahnenbildung
sehr nass	200 – 400	0,200 – 0,400	kleine Wassertropfen in der Luft
fließend	> 400	> 0,400	fließendes Wasser im Gefälle

Tab. 4-4: Definition des Status der Straßenoberfläche

Oberflächenzustand	Wassermenge [g/m <sup>2</sup> ]	Wasserfilmdicke [mm]
trocken	0	0
feucht	0 – 100	0 – 0,1
nass	> 100	> 0,1

Tab. 4-5: Oberflächenzustand und Wasserfilmdicke nach (LYSBAKKEN, 2008)

einer präventiven Streuung wird erfasst, wie viel Flüssigkeit sich von zurückliegenden Niederschlägen auf der Fahrbahn befindet (Restfeuchte), wie viel Flüssigkeit durch Taubildung (Kondensation) auf die Fahrbahn gelangen kann oder welche Flüssigkeitsmengen sich als Reif ansetzen könnten.

Eine Verbindung zwischen der optischen Wahrnehmung der Fahrbahnfeuchte und der Wasserfilmdicke ist aus Tabelle 4-4 zu entnehmen, die in einer finnischen Untersuchung entwickelt wurde (RAUKOLA 1993).

Bei LYSBAKKEN werden in Abhängigkeit vom Oberflächenzustand die in Tabelle 4-5 dargestellten Wasserfilmdicken angenommen.

Rückhaltung und Speichervermögen von Fahrbahnoberflächen mit unterschiedlicher Oberflächentextur in Abhängigkeit von der Fahrbahnneigung sind bei LUKAS in Bild 4-7 dargestellt.

Rückhaltung: Wassermenge, die sich während des Regens auf der Straßenoberfläche befindet.

Speichervermögen: Wassermenge, die infolge der Rauheit der Straßenoberfläche nach einem Regen zurückgehalten wird.

Rautiefen:

A = 0,40 mm,

B = 1,60 mm,

C = 2,65 mm,

D = 6,10 mm.

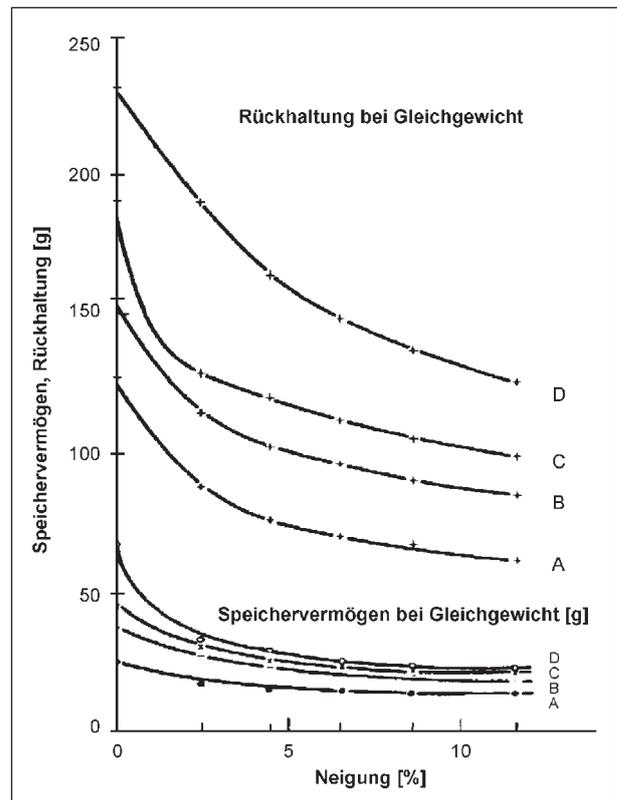


Bild 4-7: Rückhalte- und Speichervermögen von Fahrbahnoberflächen in Abhängigkeit von Fahrbahnneigung und mittlerer Rautiefe nach (LUKAS)

Die für die Berechnungen relevante Restfeuchte ist dem Speichervermögen gleichzusetzen, das für unterschiedliche Fahrbahnoberflächen und Fahrbahnneigungen im Rahmen der Untersuchung von Aquaplaningeffekten experimentell ermittelt wurde. Aus dem Diagramm ist abzuleiten, dass unter den zumeist anzutreffenden Umständen (Fahrbahnneigung 2,5 %; mittlere Rautiefe maximal 1,60 mm) wenige Minuten nach Niederschlägen maximal mit Wasserfilmdicken von 0,03 mm gerechnet werden muss.

Diese Angabe wird auch durch Messergebnisse von EVANS (Bild 4-8) bestätigt, die mit dem berührungslosen Fahrbahnsensor DSC 111 der Firma

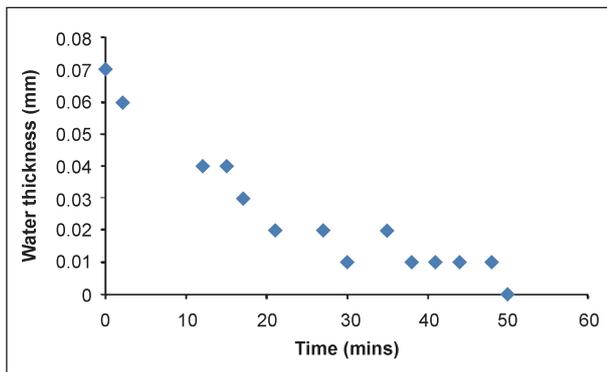


Bild 4-8: Verlauf der Wasserfilmdicke nach Niederschlagsende (EVANS)

Vaisala gewonnen wurden. Nach diesen Messungen stellt sich die Wasserfilmdicke von 0,03 mm nach etwa 15 Minuten ein und verringert sich nach 30 Minuten auf 0,01 mm. Es handelt sich dabei um Werte, die in der Fahrstreifenmitte gemessen wurden. In den Rollspuren verringert sich die Wasserfilmdicke noch schneller.

Bei Evans werden darüber hinaus folgende Werte angegeben, die zusätzlichen Bezug zur Verkehrsbelastung haben:

- Wasserfilmdicke einer feuchten Straße mit erheblichem Verkehr: 0,03 mm,
- Wasserfilmdicke einer feuchten Straße mit wenig Verkehr oder einer Straße mit erheblichem Verkehr bis eine Stunde nach Niederschlagsende: 0,05 mm,
- Wasserfilmdicke einer feuchten Straße mit wenig Verkehr: 0,10 mm.

Die für diese Messwerte zugrundeliegenden Verkehrsstärken sind nicht angegeben. Es wird lediglich erklärt, dass es sich bei den Straßen mit erheblichem Verkehr um Hauptfahrbahnen handelt, während bei Straßen mit wenig Verkehr einzelne Spuren von Zufahrten zu Hauptstrecken gemeint sind.

An dieser Stelle ist sicher auch davon auszugehen, dass nicht nur die Verkehrsstärke sondern auch die gefahrene Geschwindigkeit Einfluss hat.

Die durch Reifbildung gebundenen Flüssigkeitsmengen können mithilfe von relativer Luftfeuchte, Fahrbahn- und Lufttemperatur aus der DWD-Punktprognose ermittelt werden.

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:

$$SR = 2,16 \times 10^{-6} \times WS \times D/TA \quad (11)$$

mit

$$D = 611 \times e^{(22,2-6061/TD)-(22,2-6061/TS)} \quad (12)$$

Es gelten:

SR Resublimationsrate (Zuwachsgeschwindigkeit von gefrorenem Wasser oder Raureif – kg/m<sup>2</sup>/s). Unter Resublimation ist die Phasenumwandlung vom gasförmigen in 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

TA Lufttemperatur in 2 m Höhe (K)

TD Taupunkttemperatur der Luft in 2 m Höhe (K)

TS Temperatur der Straßenoberfläche (K)

Es muss jedoch noch überprüft werden, ob diese Berechnungsmethode zu praxisrelevanten Ergebnissen führt und der Genauigkeitsgrad der Vorhersage ausreicht.

## 4.5 Kalkulation der Restsalzmengen und der Liegezeitverluste

Für die Berechnung der optimalen Streudichte für präventive Einsätze sind weitere Einflussfaktoren zu berücksichtigen.

Dazu gehören zwei wesentliche Angaben über den Verbleib von Streustoff auf der Fahrbahn:

1.  $SM_{\text{verl}}$  in g/m<sup>2</sup> Streustoffmenge auf der Fahrbahn, mit deren Verlust innerhalb des technologisch erforderlichen Zeitraumes gerechnet werden muss,
2.  $SM_R$  in g/m<sup>2</sup> Streustoffmenge aus zurückliegenden Streuungen (Restsalzmengen), die sich zum Zeitpunkt der aktuellen Streuung auf der Fahrbahn befindet.

Diese beiden Werte können unter Verwendung der Erkenntnisse kalkuliert werden, die bei Liegezeitmessungen von FS30 und Sole gewonnen wurden.

Die Berücksichtigung der Liegezeitverluste ( $SM_{\text{verl}}$ ) erfolgt dadurch, dass die unter Berücksichtigung der Liegezeit errechnete Streudichte am Ende des Prognosezeitraumes mit Erhöhungsfaktoren (siehe Tabelle 4-6: Ausgleichsfaktor  $F_L$  für Liegezeitverluste) multipliziert wird.

Bei der Berechnung des Liegezeitfaktors fließen die bei Liegezeitmessungen gewonnenen Erkenntnisse über prozentuale Verluste pro Zeiteinheit, aber auch praktische Erfahrungen ein (HAUSMANN, 2009; HAUSMANN, 2012). Die in den letzten Jahren durchgeführten Liegezeitmessungen hatten ergeben, dass in der ersten Stunde nach der Streustoffausbringung die mit Abstand größten Taustoffverluste auftreten. Darüber hinaus ergaben die Messungen, dass bei der Ausbringung von Tausalösungen wesentlich geringere Taustoffverluste auftreten. Der Ausgleichsfaktor für Liegezeitverluste  $F_L$  ist der Quotient aus der unmittelbar nach der Streustoffausbringung gemessenen Streustoffmenge  $SM_0$  und der Streustoffmenge  $x$ -Stunden nach der Ausbringung  $SM_x$ .

$$F_L = SM_0 / SM_x \quad (13)$$

Die Erhöhungsfaktoren sind abhängig vom Prognosezeitraum und der Streutechnologie (Tabelle 4-6).

Für die Kalkulation der Restsalzmenge muss mindestens Folgendes bekannt sein:

- Zeitpunkt der vorhergehenden Streuung,
- Art des Streustoffes,
- Streudichte und
- Niederschlag seit der letzten Streuung Ja/Nein.

Prognosezeitraum (h)	FS30	FS100
1	4,75	1,30
2	4,76	1,40
3	4,77	1,50
4	4,78	1,66
5	4,79	1,70
6	4,80	1,75
7	4,81	1,80
8	4,82	1,87

Tab. 4-6: Ausgleichsfaktor  $F_L$  für Liegezeitverluste

Soweit diese Daten nicht automatisiert übernommen werden können, müssten sie vor der Einsatzfahrt per Hand eingegeben werden. Aus in den vergangenen Jahren im Auftrag der BASt durchgeführten Untersuchungen ist bekannt, dass in einem Zeitraum bis 24 h nach der letzten Streuung, eine Salzmenge von etwa 2 g/m<sup>2</sup> auf der Fahrbahn gemessen wird, wenn zwischenzeitlich kein Niederschlag gefallen ist (HAUSMANN, 2009). In Abhängigkeit von der Struktur der Fahrbahnoberfläche und dem Wetterverlauf wurden in einigen Fällen auch nach mehreren Tagen noch Restsalzmengen bis 10 g/m<sup>2</sup> gemessen.

Im Berechnungsalgorithmus bestand die Möglichkeit, die Restsalzmenge fest einzugeben (in der Regel 2 g/m<sup>2</sup>) und von der errechneten Streudichte unter Berücksichtigung des Taustoffinhaltes (Taustoffmengenfaktor) abzuziehen. Mit dem Taustoffmengenfaktor wird die tatsächliche Streustoffmenge je nach angewandter Technologie berücksichtigt (FS30 – 0,76; FS100 – 0,20).

Die technische Möglichkeit, Restsalzmengen am Einsatzfahrzeug zu messen, würde zu Salzeinsparungen in einer geschätzten Höhe von ca. 10 % führen.

Faktoren wie Verkehrsstärke, Fahrbahnbelag, Brücken und weitere Streckenattribute können in einem weiteren Bewertungsfaktor ( $F_S$ ) Berücksichtigung finden.

Die Streckenattribute könnten in einer Streckendatei hinterlegt werden. Es gibt derzeit noch keine ausreichenden Erkenntnisse über die Wirkung dieser Faktoren auf die Liegezeit von Taustoffen. Der Bewertungsfaktor  $F_S$  ging daher nicht in die Berechnung ein.

## 4.6 Berechnungsalgorithmus

### 4.6.1 Berechnungsgrundlagen des Algorithmus

Zusammengefasst stellt sich der Berechnungsalgorithmus wie folgt dar:

$$SD = (((FBT_B \times WFD) / -0,0637) \times F_L \times F_S) - SM_R \quad (14)$$

Es gelten:

SD (g/m<sup>2</sup>) Streudichte

FBT<sub>B</sub> (°C) Berechnungstemperatur  
(Berechnung nach Bild 4-13)

WFD	(mm)	Wasserfilmdicke
$F_L$	-	Liegezeitfaktor
$F_S$	-	Bewertungsfaktor für Streckenattribute
$SM_R$	(g/m <sup>2</sup> )	Restsalzmenge

Der Liegezeitfaktor  $F_L$  berücksichtigt die unterschiedlichen Liegezeiten der Taustoffe in Abhängigkeit von dem angewandten Streuverfahren. Es wird zwischen FS30 und FS100 unterschieden. In Abhängigkeit vom Prognosezeitraum wird bei präventiven Streuungen durch den Liegezeitfaktor eine Streustoffmenge ausgebracht, welche die zu erwartenden Verluste berücksichtigt. Dazu wurden die Ergebnisse von Messungen berücksichtigt, die in den Jahren 2007 bis 2012 durchgeführt wurden (HAUSMANN, 2009; HAUSMANN, 2012).

Für den Prognosezeitraum von 3 Stunden wurden folgende Liegezeitfaktoren ( $F_L$ ) angewandt:

- FS30:  $F_L = 4,77$  und

- FS100:  $F_L = 1,50$ .

Mit Ausnahme des Faktors  $F_S$  ist der Berechnungsalgorithmus für die Bordcomputer programmiert worden (siehe Bild 4-9). Er ist auch als Excel-Datei „Algorithmus 2016.xlsx“ mit Berechnungsvorschriften realisiert.

#### 4.6.2 Struktur des Algorithmus (Fassung 2016)

Der Algorithmus 2016 ist eine Weiterentwicklung des Algorithmus, der im Rahmen des Forschungsprojektes „Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst“ in den Jahren 2010 bis 2013 entstand. Die Ergebnisse dieses Projektes sind als Bericht der BAST, Heft V 260 verfügbar.

Der Algorithmus 2016 bezieht weitere Daten der DWD-Punktwettervorhersage und die Daten aus dem berührungslosen, mobilen Fahrbahnsensor MARWIS der Firma Luftt in die Berechnungen ein.

Bei der Berechnung der optimalen Streudichte werden bekannte physikalisch/chemische Zusammen-

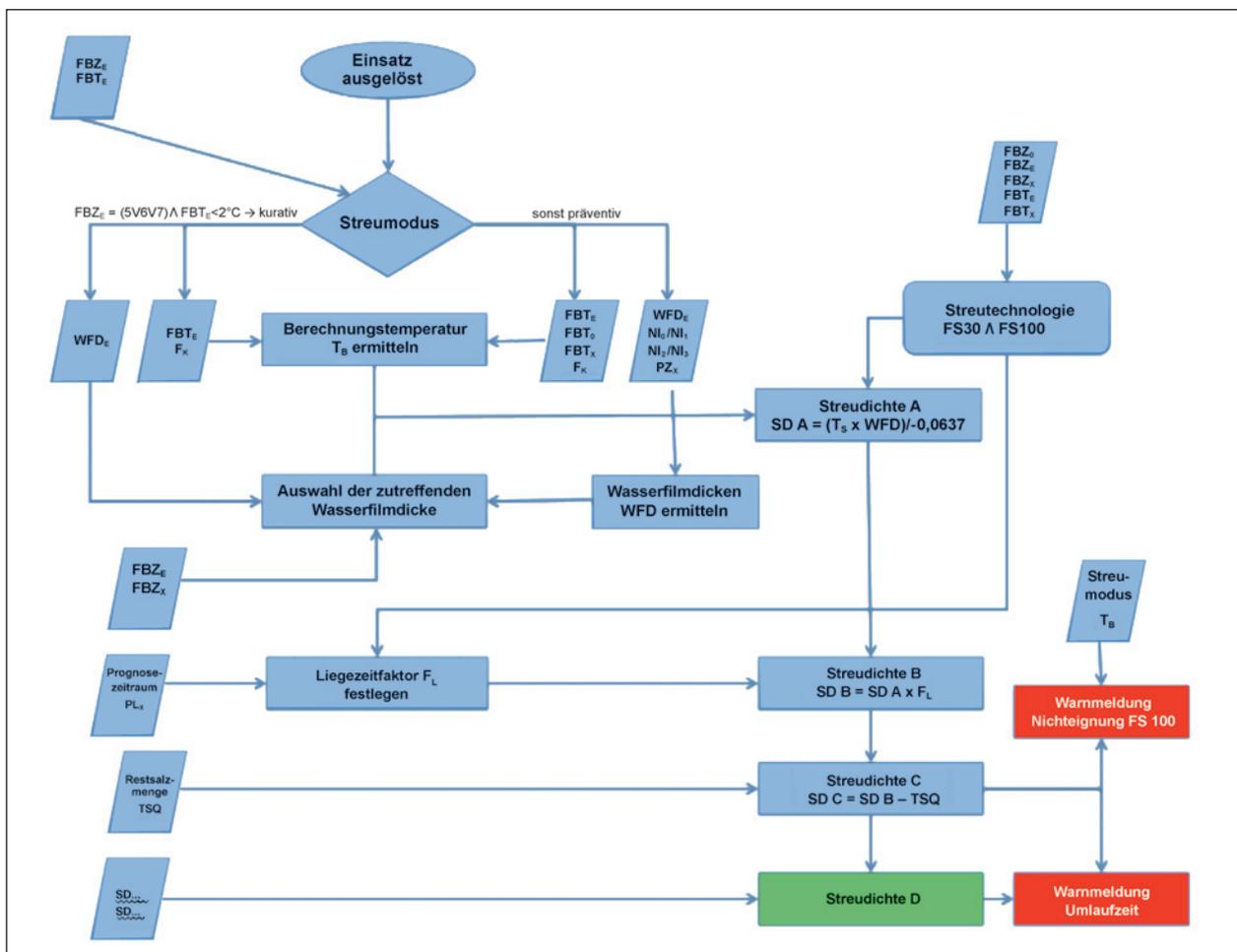


Bild 4-9: Programmablaufplan zur Berechnung der optimalen Streudichte (Fassung 2016)

hänge (Phasendiagramm) und Erfahrungen aus Vorprojekten und der Winterdienstpraxis zugrunde gelegt.

In der programmtechnischen Umsetzung des Algorithmus wird die Streudichte in vier Stufen berechnet (Streudichte A, B, C, D). In den einzelnen Stufen werden schrittweise folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Streudichte A: Rechenwert unter Berücksichtigung der Wasserfilmdicke und der Berechnungstemperatur für die Fahrbahnoberfläche auf Grundlage der Phasengrenzlinie (chemisch-physikalische Zusammenhänge),
- Streudichte B: Qualifizierter Rechenwert unter zusätzlicher Berücksichtigung der Liegezeitverluste,
- Streudichte C: Optimale Streudichte unter Berücksichtigung der Restsalzmengen,
- Streudichte D: Optimale Streudichte unter Berücksichtigung von technologisch sinnvollen Minimal- und technisch möglichen Maximalmengen.

### Berechnung von Streudichte A

Kerndaten der Berechnung sind die Fahrbahntemperatur und die Wasserfilmdicke (siehe Tabelle 4-7). Der Algorithmus läuft in seinem ersten Teil darauf hinaus, die Daten (Temperatur als Berechnungstemperatur  $FBT_B$  und die Wasserfilmdicke WFD) für den Zielzeitpunkt zu berechnen. Zielzeitpunkt ist bei kurativer Streuung der Moment der Überfahrt mit dem Streufahrzeug.

Bei präventiver Streuung wird mit einem Zielzeitpunkt von 3 Stunden gerechnet.

Für die Bestimmung der Kerndaten ist es unverzichtbar, dass der beabsichtigte und technologisch gebotene Streumodus ermittelt wird.

Ein Einsatz ist immer dann präventiv, wenn bei Überfahrt des Streufahrzeuges keine Glätte vorhanden ist, aber wegen der Vorhersagen Glätte zu erwarten ist.

Das wird anhand des prognostizierten Fahrbahnzustandes bestimmt.

Ein Einsatz ist in jedem Fall kurativ, wenn bereits Glätte auf der Fahrbahn vorhanden ist. Das wird aus dem vom Fahrzeugsensor ausgegebenen Wert  $FBZ_E$  bestimmt. Je nach Streumodus und erwarteter Glätteart gibt es unterschiedliche Rechengänge zur Ermittlung der Berechnungstemperatur und der Wasserfilmdicke. Für präventive Einsätze werden teilweise auch Annahmen bezüglich der zu erwartenden Wasserfilmdicke getroffen. Sie stützen sich auf das Arbeitspapier „Temperaturgesteuerte Streustoffdosierung“, das 2015 vom Arbeitsausschuss Winterdienst erarbeitet wurde.

Erläuterung: Soweit es sich um festen Niederschlag handelt, ist bei der Wasserfilmdicke (WFD) das Wasseräquivalent maßgeblich.

Definition des Begriffes spezifisches Wasseräquivalent lt. DWD:<sup>1</sup>

„Wasseräquivalent einer Schneedecke pro cm Schneedeckenhöhe, angegeben in mm/cm Schneedichte: Masse des gefallenen Schnees bezogen auf

<sup>1</sup> Quelle von Definition und Erläuterungen zum Wasseräquivalent: [http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/W/Waseraequivalent\\_pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/begriffe/W/Waseraequivalent_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4) (abgerufen am 04.08.2016)

	Kurativ	Präventiv
Schneeglätte	$FBT_B = FBT_E + FBT_K$ WFD = WFD <sub>E</sub>	$FBT_B = FBT_E - (FBT_0 - FBT_X) + FBT_K$ WFD = NI <sub>1</sub> + NI <sub>2</sub> + NI <sub>3</sub>
Reifglätte	$FBT_B = FBT_E + FBT_K$ WFD = WFD <sub>E</sub>	$FBT_B = FBT_E - (FBT_0 - FBT_X) + FBT_K$ WFD = 0,02 mm
Eisglätte	$FBT_B = FBT_E + FBT_K$ WFD = WFD <sub>E</sub>	$FBT_B = FBT_E - (FBT_0 - FBT_X) + FBT_K$ WFD = 0,06 mm
Glatteis	$FBT_B = FBT_E + FBT_K$ WFD = WFD <sub>E</sub>	$FBT_B = FBT_E - (FBT_0 - FBT_X) + FBT_K$ WFD = NI <sub>1</sub> + NI <sub>2</sub> + NI <sub>3</sub>

Tab. 4-7: Berechnungstemperatur und Wasserfilmdicke – Formeln für die Glättezustände auf Fahrbahnen

die Volumeneinheit im Zustand der natürlichen Lagerung, angegeben in  $\text{g/cm}^3$ .

Umrechnung von Schneedichte und spezifischem Wasseräquivalent:

$$1 \text{ g/cm}^3 = 10 \text{ mm/cm},$$

$$1 \text{ mm/cm} = 0.1 \text{ g/cm}^3.$$

Ermittelt wird das Wasseräquivalent mit einem Schneeausstecher oder einer Schneesonde. Dabei wird die Schneedecke einer definierten Fläche abgetragen (ausgestochen) und die Höhe der Schmelzwassersäule in einem normierten Gefäß in mm abgelesen bzw. das Gewicht der ausgestochenen Schneedecke festgestellt und in mm Schmelzwasser umgerechnet“ (siehe Tabelle 4-8).

Die tatsächliche Schneedichte kann vom fahrenden Einsatzfahrzeug aus, nicht ermittelt werden. Im Algorithmus wird daher durchgängig mit einer mittleren Neuschneedichte (spezifisches Wasseräquivalent 1 mm/cm) gerechnet.

Im Arbeitspapier „Temperaturgesteuerte Streustoffdosierung“ ist ein Wert von 0,1 mm/cm angegeben. Das ist wahrscheinlich eine Zehnerpotenz zu wenig.

Im Algorithmus ist bei Schnee auf der Fahrbahn ein weiteres Phänomen zu berücksichtigen, welches im Projekt „Optimierung der auftauenden Streustoffe für den Straßendienst“ (FE 04.0242/2011/KRB) untersucht wurde. Es wurde dort festgestellt, dass der Schnee mit nur 10 % der nach Phasendiagramm erforderlichen Streudichte räumfähig gehalten werden kann und in dieser Konsistenz (Schneemulm) auch nicht fest bzw. glatt gefahren wird.

Für die weitere Berechnung wird die Wasserfilmdicke deshalb mit dem Faktor 0,1 multipliziert.

Schneeart	Spezif. Wasseräquivalent [mm/cm]
Neuschnee	0,5 bis 1,5
Pulverschnee	1,0 bis 2,0
körniger Schnee	1,5 bis 4,5
gelagerter Schnee	3,5 bis 6,0
Firnschnee	5,0 bis 8,5
Die Übergänge zwischen den einzelnen Schneearten sind nicht genau definiert!	

Tab. 4-8: Spezifisches Wasseräquivalent unterschiedlicher Schneearten

Die für die jeweilige Situation zutreffende Wasserfilmdicke wird unter Berücksichtigung des Streumodus und der Glätteart auf Grundlage des aktuellen und prognostizierten Fahrbahnzustandes ausgewählt und für die weitere Berechnung zur Verfügung gestellt.

Nach dem aus dem Vorprojekt bekannten Modus wird dann die Streudichte A berechnet. An dieser Stelle ist noch zu erklären, dass sozusagen als Basiswert der Berechnungen auch die bei reiner Trockensalzstreuung erforderliche Streudichte ermittelt wird, obwohl diese Technologie normalerweise nicht mehr angewandt werden sollte.

### Berechnung von Streudichte B

Über die bei Feldversuchen ermittelten Liegezeiten wurde ein Ausgleichsfaktor  $F_L$  für Liegezeitverluste ermittelt, der vom Prognosezeitraum bei präventiven Streuungen abhängig ist. Der Ausgleichsfaktor für kurative Streuung (Stunde 0) ist gleich 1. Aber schon ab Stunde 1 ist ein sehr hoher Ausgleich für die Liegezeitverluste erforderlich, da die größten Verluste in der ersten Stunde gemessen wurden (Tabelle 4-6).

An dieser Stelle ist auch darauf hinzuweisen, dass die Liegezeiten auf Autobahnen ermittelt wurden. Bisherige Beobachtungen deuten darauf hin, dass sie eher von den gefahrenen Geschwindigkeiten als von der Verkehrsstärke abhängen. Insofern müssten für Straßen, die mit geringeren Geschwindigkeiten befahren werden, separate Ausgleichsfaktoren für Liegezeitverluste angewandt werden. Dafür sind aber derzeit noch keine Daten vorhanden.

### Berechnung der Streudichte C

Soweit Restsalzmengen bekannt sind, wird die ermittelte Streudichte um den betreffenden Betrag verringert.

### Berechnung der Streudichte D

Die letzte Berechnungsstufe dient folgenden Zwecken:

- Ausgabe der Streudichte 0  $\text{g/m}^2$  bei Umfeldaten, bei denen eine Streuung nicht notwendig ist als Signal für die Abschaltung der Streumaschine,
- Ausgabe der Streudichte 5  $\text{g/m}^2$  (FS30) und 10  $\text{g/m}^2$  (FS100) bei errechneten Streudichten unterhalb dieser Werte, aber  $\geq 0 \text{ g/m}^2$  und

- Ausgabe der Streudichte 40 g/m<sup>2</sup> (FS30) und 60 g/m<sup>2</sup> (FS100) bei errechneten Streudichten oberhalb dieser Werte.

#### 4.6.3 Programmierungselemente des Algorithmus

Die Elemente des Algorithmus werden als Flussbilder dargestellt, die unmittelbare Grundlage für die Programmierung bilden. Im Algorithmus sind die Elemente verbunden und spiegeln den kompletten Rechengang wider.

##### Ermittlung des Streumodus (MOD)

Der Begriff Streumodus wird dafür verwendet, ob der Einsatz zur Bekämpfung vorhandener Glätte (kurativ) oder zur Vermeidung von Glätte (präventiv) durchgeführt wird. Entscheidungsgrundlage dafür sind der aktuelle und der zu erwartende Fahrbahnzustand und die Fahrbahnoberflächentemperatur. Die Eingangsdaten kommen vom MARWIS-Sensor (Symbole im Flussbild gelb hinterlegt) und der Punktwettervorhersage des DWD (Symbole im Flussbild blau hinterlegt; siehe Bild 4-10). Die Fahrbahnzustände sind beim MARWIS-Sensor und beim DWD unterschiedlich codiert. Das musste bei der Programmierung individuell berücksichtigt werden.

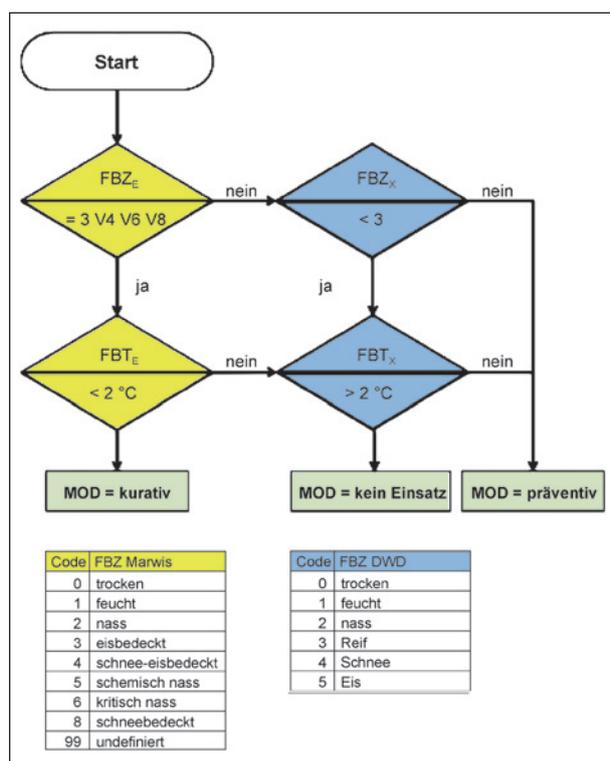


Bild 4-10: Flussbild zur Ermittlung des Streumodus

##### Ermittlung der optimalen Streutechnologie (TECH)

Die optimale Streutechnologie hängt ebenfalls von dem aktuellen und dem zu erwartenden Fahrbahnzustand und den Fahrbahnoberflächentemperaturen ab. Es gelten allerdings etwas andere Randbedingungen (siehe Bild 4-11).

##### Ermittlung des Rechenwertes der Wasserfilmdicke

Die Wasserfilmdicke gehört neben der Fahrbahnoberflächentemperatur zu den Kerndaten der Berechnung der optimalen Streudichte.

Die vom MARWIS-Sensor gemessene Wasserfilmdicke geht allerdings nur dann direkt in die Berechnung ein, wenn es sich um einen kurativen Einsatz

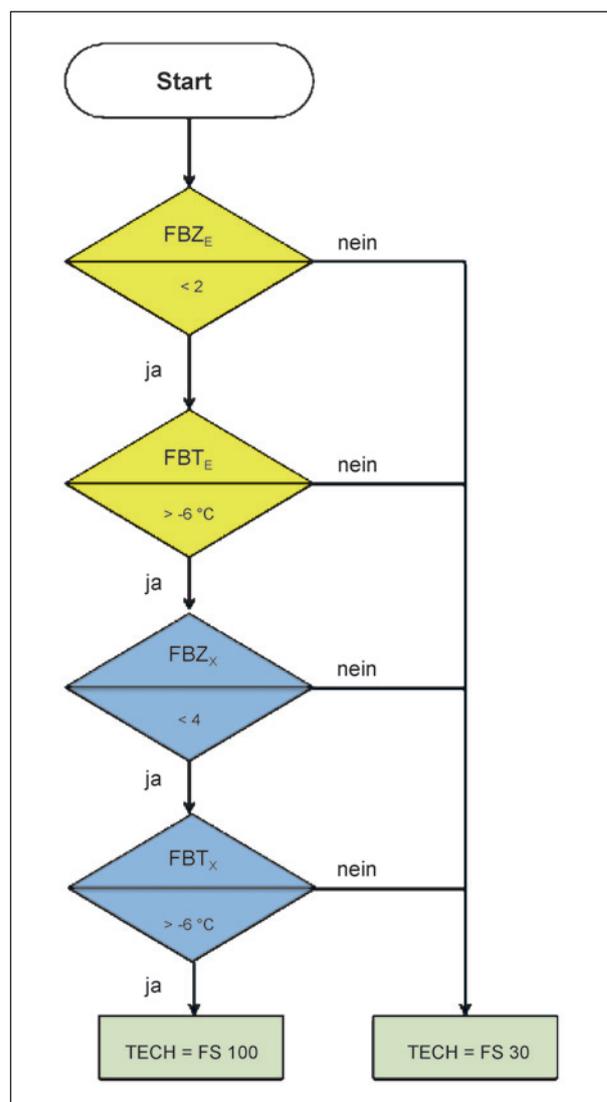


Bild 4-11: Flussbild zur Ermittlung der Streutechnologie

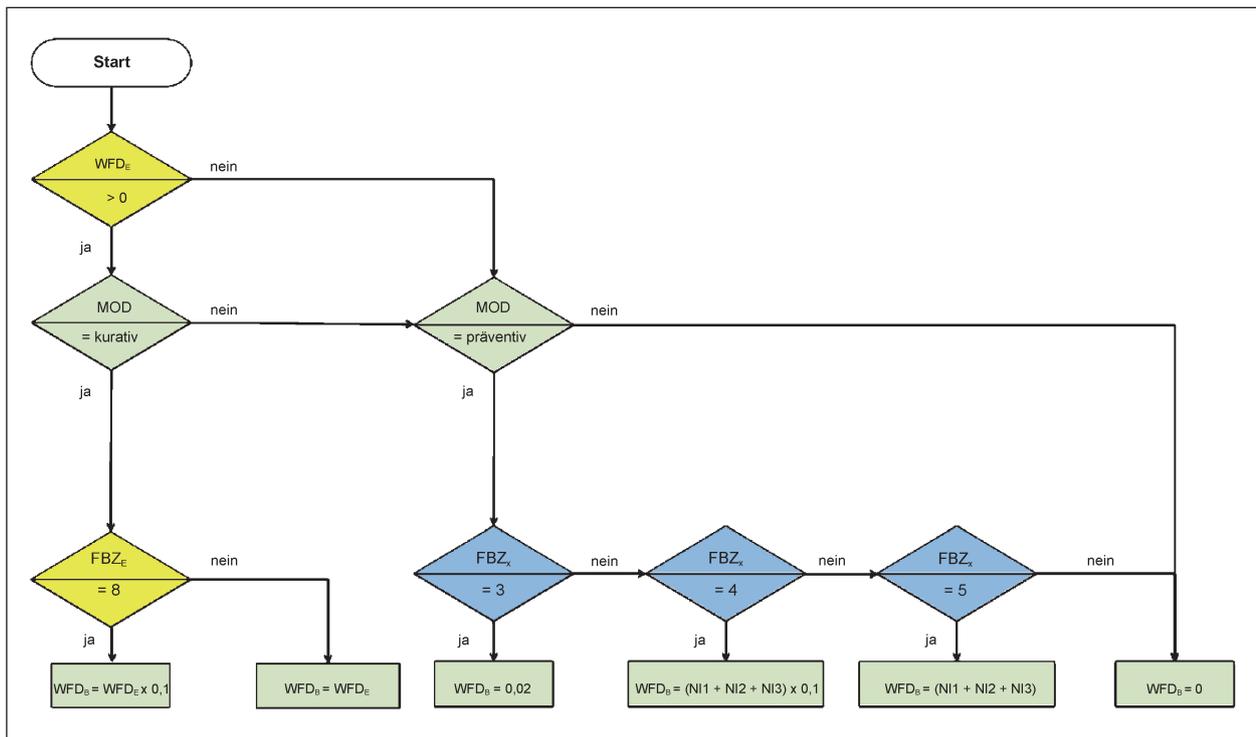


Bild 4-12: Flussbild zur Ermittlung des Rechenwertes der Wasserfilmdicke

handelt und kein Schnee auf der Fahrbahn liegt. Bei Schnee auf der Fahrbahn wird mit einem Abminderungsfaktor von 0,1 gerechnet, da Schnee nicht komplett getaut, sondern Mulm erzeugt werden soll.

Bei präventiven Einsätzen geht die Wasserfilmdicke ein, die in maximal 3 Stunden zu erwarten ist. Die Berechnung (Bild 4-12) hängt davon ab, welche Glätteart erwartet wird. Es wird zwischen Reif, Schnee und Eis unterschieden. Die Daten für diese Berechnung kommen aus der Punktwettervorhersage des DWD.

**Ermittlung der Berechnungstemperatur**

Bei kurativen Einsätzen geht die vom MARWIS-Sensor gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur direkt in die Berechnung ein (Bild 4-13). Sie wird bei spezifischen Besonderheiten der Strecke (Brücken, bekannte Kälteabschnitte) GPS-gesteuert mit einem Korrekturwert vorausschauend angepasst.

Bei präventiver Streuung wird für die Ermittlung der Berechnungstemperatur außerdem die niedrigste Temperatur innerhalb des Prognosezeitraumes (in der Regel 3 h) berücksichtigt.

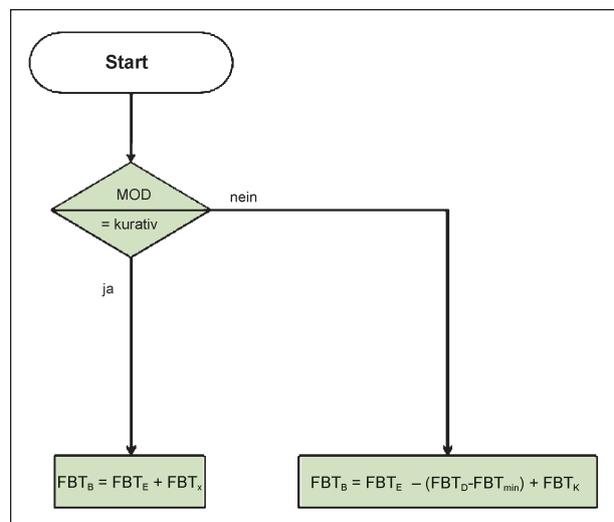


Bild 4-13: Flussbild zur Ermittlung der Berechnungstemperatur

**Ermittlung des Grundwertes der Streudichte**

Der Grundwert der Streudichte wird mit den in Kapitel 4.6.1 erläuterten Berechnungsformeln bestimmt (Bild 4-14). Dabei gibt es Modifikationen in Abhängigkeit vom Streumodus und der Streutechnologie. Bei präventiver Streuung werden auch die unterschiedlichen Liegezeiten von FS30 und FS100 berücksichtigt. In der Darstellung wird von einem festen Prognosezeitraum von 3 Stunden ausgegangen. Der Algorithmus ermöglicht grundsätzlich auch andere Prognosezeiträume.

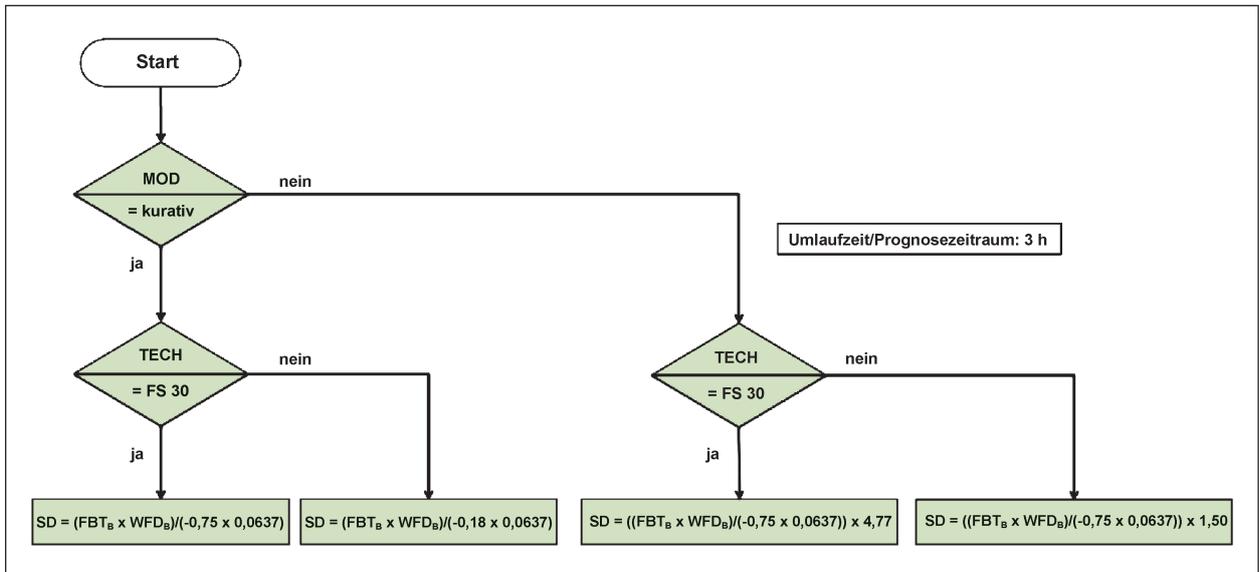


Bild 4-14: Flussbild zur Ermittlung des Grundwertes der Streudichte

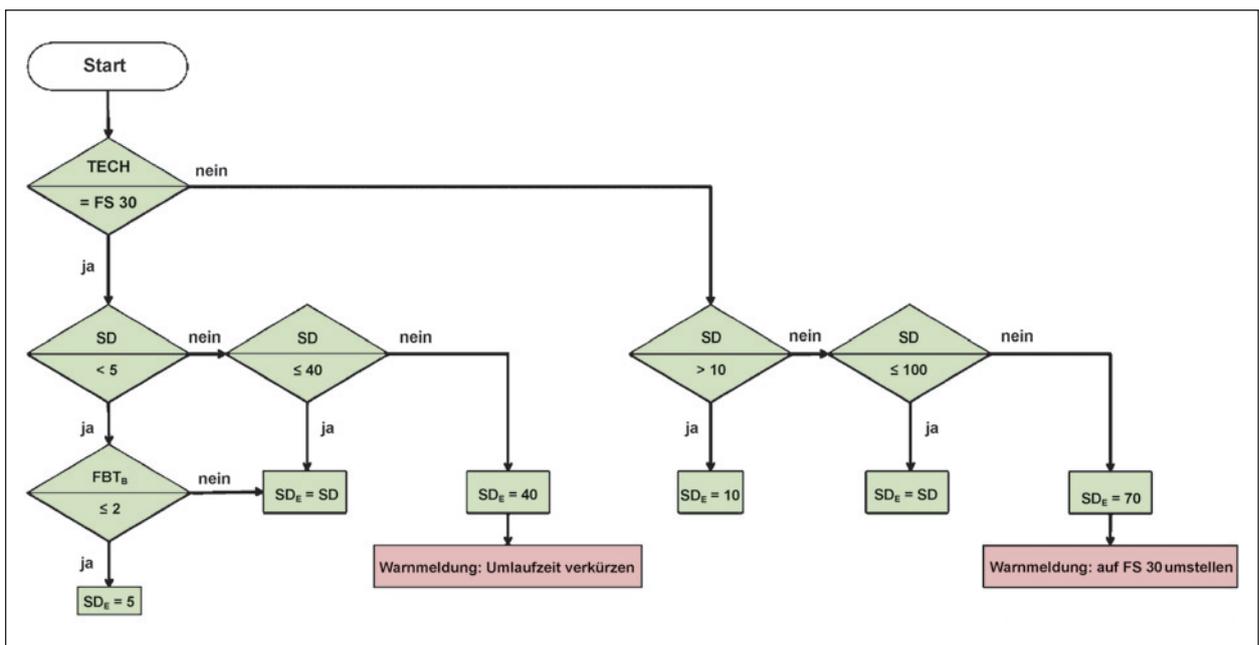


Bild 4-15: Flussbild zur Ermittlung des Endwertes der Streudichte

### Ermittlung des Endwertes der Streudichte

Aus technischen und technologischen Gründen ist die einstellbare Streudichte an den Streumaschinen nach unten und oben begrenzt. Diese Begrenzungen werden bei der Berechnung des Endwertes der Streudichte berücksichtigt (Tabelle 4-9).

Streutechnologie	Unterer Wert der Streudichte [g/m <sup>2</sup> ]	Oberer Wert der Streudichte [g/m <sup>2</sup> ]
FS30	5	40
FS100	10	70

Tab. 4-9: Grenzwerte der Streudichte

Bei der rechnerischen Überschreitung des oberen Wertes bei FS30 erscheint eine Warnmeldung, dass die Umlaufzeit verkürzt werden muss. Dieser Fall wird ausschließlich bei kurativen Einsätzen auftreten.

Wenn trotz vorheriger Entscheidung für FS100 eine Streudichte von mehr als 70 g/m<sup>2</sup> errechnet wird erscheint eine Warnmeldung, dass auf FS30 umgestellt werden soll (Bild 4-15).

## 5 Umsetzung des Pilotprojektes zur optimierten Streudichte

### 5.1 Umsetzungskonzept

Die Demonstrationsanlagen werden in den Autobahnmeistereien Greding und Münchberg auf jeweils einem Streufahrzeug eingesetzt. Die berechneten und die vom Fahrpersonal eingestellten Streudichten wurden zeit- und ortsbezogen aufgezeichnet. Auf dieser Basis wurde in einem ersten Schritt die Plausibilität der Berechnungen unter Feldbedingungen im praktischen Einsatz überprüft.

Mit den zusätzlich in den Fahrzeugen installierten Bordcomputern wurden alle eingehenden internen und externen Daten verarbeitet. Im Ergebnis wird die optimale Streudichte (Streudichte D) mit dem programmierten Algorithmus im Sekundentakt berechnet. Die Quelle der externen Daten war die Punktwettervorhersage des DWD, die stündlich aktualisiert wurde.

Die Datenübertragung erfolgte vom DWD über den Server des Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (IVI) in Dresden auf die Einsatzfahrzeuge.

Dazu wurde Folgendes vereinbart:

- Entwicklung und Umsetzung einer Hardwarelösung, welche die notwendigen Sensorik-, Kommunikations- und Auswertekomponenten zur Verfügung stellt,
- Entwicklung und Umsetzung einer Softwarelösung, welche die vorgegebenen Hardwarekomponenten funktional verbindet inklusive Auswertesoftware und Konfigurationssoftware (Streubereicheditor) zur Ausgabe einer unter den gegebenen Randbedingungen optimale Streudichte,
- Entwicklung einer Server-Anwendung zur Annahme externer Daten (DWD) und zur Abgabe von Prognose- und Warnmeldungen,
- Entwicklung und Umsetzung eines Systemtestkonzepts zur Verifikation der Sensor- und Systemfunktionalität,
- Unterstützung der Einsatzfahrten in der ersten und zweiten Winterperiode hinsichtlich Aufbau des Optimierungssystems, Funktionskontrolle, technischer Störungsbehebung und Datenabgriff zur Auswertung,

- Überarbeitung der Hard- und Softwarelösung nach Bedarf nach der ersten Winterperiode in Vorbereitung auf die zweite Winterperiode,
- Unterstützung bei Auswertung und Berichterstellung: Generierung der Auswertegrundlage, Unterstützung bei Datenauswertung und Diagrammerstellung, Zurverfügungstellung von Bildmaterial.

Fraunhofer IVI setzte auf einem eigenen Server einen Prozess auf, der zyklisch die CSV-Datei vom DWD las, speicherte, für das im Fahrzeug zu realisierende Rechnersystem aufbereitete und in einer geeigneten Form für den Fernzugriff via Internet bereithielt.

Zur Fernkonfiguration und zum Fernzugriff wurde eine im Funktionsumfang auf die wesentlichen Punkte beschränkte Bediensoftware realisiert, in der Kartendaten (z. B. OpenStreetMap) als Hintergrundbild angezeigt und eigene GPS-Tracks dargestellt werden konnten. Die eigenen Strecken (aus GPS-Track oder vom Editor) sollten manipuliert und mit Attributen versehen werden können.

Das Demonstrationssystem im Fahrzeug bestand aus einer Rechner- und einer Anzeigeeinheit. Der Rechner wurde ein Windows-Betriebssystem haben. Die Anzeigeeinheit wurde als Touchscreen ausgeführt. Über eine RS-232-Schnittstelle wurde die Verbindung zum MARWIS-Sensor hergestellt. Darüber hinaus wurde eine GPS-Verortung mit separater Antenne installiert. Das vom Auftraggeber in Form von Gleichungen oder Tabellenkalkulationen bereitgestellte analytische Optimierungsmodell wurde auf dem Rechner unter Einbeziehung von GPS-Verortung und Temperatursensor sowie der serverseitig vorliegenden DWD-Daten softwaretechnisch umgesetzt. Der Rechner verfügte über eine eigene GSM-/GPRS-Anbindung, damit ein Fernzugriff möglich war. Weiterhin war ein Map-Matching auf Basis der vom Konfigurationsprogramm bereitgestellten Streckeninformationen zu realisieren.

Der Dosierungsalgorithmus lag mit allen Berechnungsvorschriften als Excel-Datei vor. Daraus wurde die Software entwickelt.

Eingangsdaten sind:

- $FBT_E$  – aktuelle, vom Fahrzeug gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur,
- $FBT_0$  – Prognosetemperatur 0 Stunden (DWD-Punktvorhersage mit Datenfernübertragung),

- FBT<sub>3</sub> – Prognosetemperatur 3 Stunden (DWD-Punktvorhersage mit Datenfernübertragung),
- PZ – Prognosezeitraum in Stunden (Regelfall 0 – 3 Stunden),
- WFD – Wasserfilmdicke (berechnet oder gemessen),
- SM<sub>R</sub> – Restsalzmenge (berechnet oder gemessen) und
- SZ – Straßenzustandsprognose nach DWD-Schema.

Für die Temperatur- und Niederschlagsprognosen wurden die Daten derjenigen Wetterstationen verarbeitet, die für den betreffenden Streckenabschnitt die qualitativ besten Daten lieferten. Das wird bezogen auf den Streckenabschnitt individuell programmiert.

Für eine zusätzliche Beurteilung des Straßenzustandes wurde eine nachtsichtfähige Kamera installiert, die auf den Messfleck des MARWIS-Sensors gerichtet war. In der zweiten Winterdienstsaison des Projektes wurde die Ausrichtung der Kameras verändert (siehe Bild 5-7). Die Kamerabilder wurden in einer Rate von 6 Bildern pro Minute auf dem Bordcomputer gespeichert. Die Bildrate konnte bedarfsweise verändert werden.

## 5.2 Funktionsweise des Systems zur Optimierung der Streudichte

### 5.2.1 Übersicht

Die wesentlichen Komponenten des Gesamtsystems gliedern sich in zwei Gruppen: externe Systeme, welche nur über vorgegebene Schnittstellen angesprochen werden können (grau hinterlegt) und Systeme, die für dieses Projekt entwickelt wurden (orange hinterlegt). In die erste Kategorie fallen das GPS-Ortungssystem zur Bestimmung der aktuellen Position, der Server des Deutschen Wetterdienstes für die Abfrage der aktuellen Wetterprognose-Daten und die auf dem Winterdienstfahrzeug bereits vorhandene Technik.

Diese weicht bei den beiden Einbauorten, Münchberg bzw. Greding, deutlich voneinander ab. Das war vor allem den unterschiedlichen Streumaschinentypen geschuldet:

- AM Münchberg: Aebi Schmidt Stratos S50C-30 VCLN-660 CSW und
- AM Greding: Küpper-Weisser IMSSN E 44080 HFA.

In Greding (Bild 5-1) war ein MARWIS-Sensor (mobiler, multifunktionaler Fahrbahnsensor) der Firma Luftt, bereits vorinstalliert und schon im Einsatz.

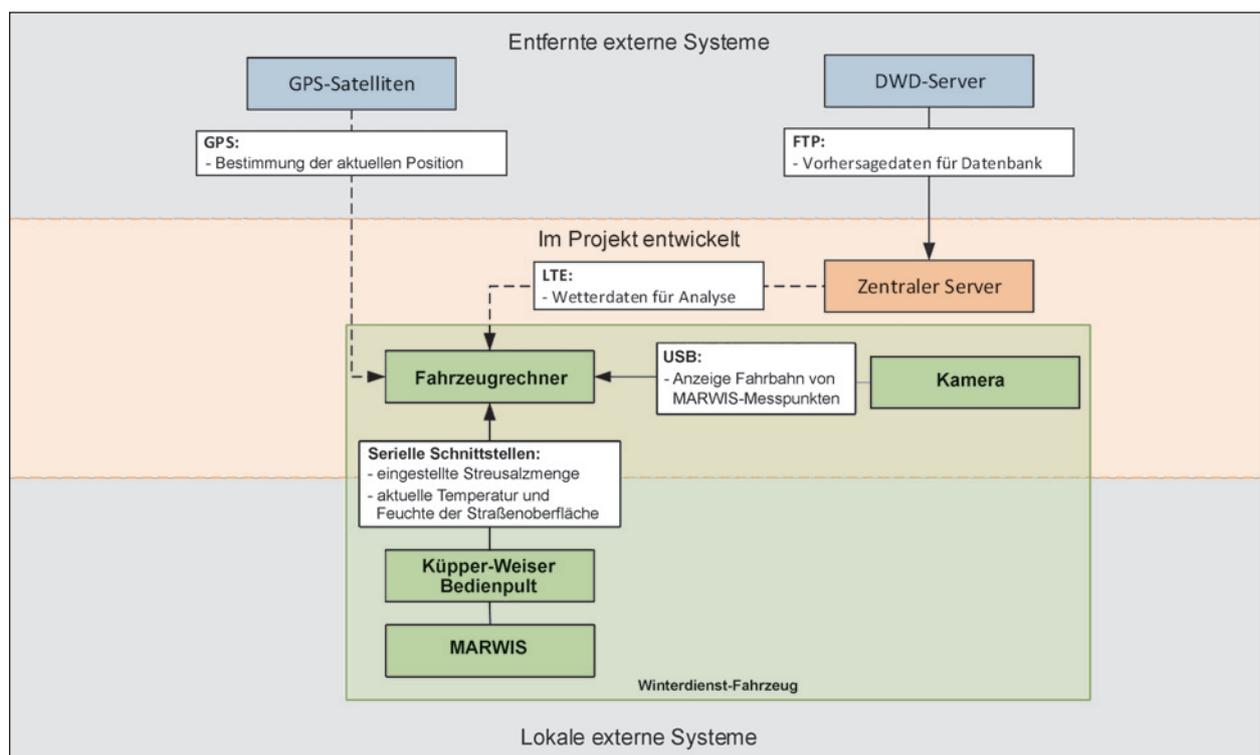


Bild 5-1: Systemübersicht Greding

Hier wurde über das Küpper-Weisser Bedienpult (Vpad), die tatsächliche Streumenge für spätere vergleichende statistische Auswertungen erfasst. Darüber hinaus war die Installation der Kamera zur Überwachen des vom MARWIS erfassten Bereichs notwendig.

In Münchenberg (siehe Bild 5-2) hingegen wurde neben der Kamera auch der MARWIS neu an das Winterdienst-Fahrzeug angebracht und über eine Kabelverbindung in das System eingebunden. Bei der dort eingesetzten Aebi Schmidt Streumaschine

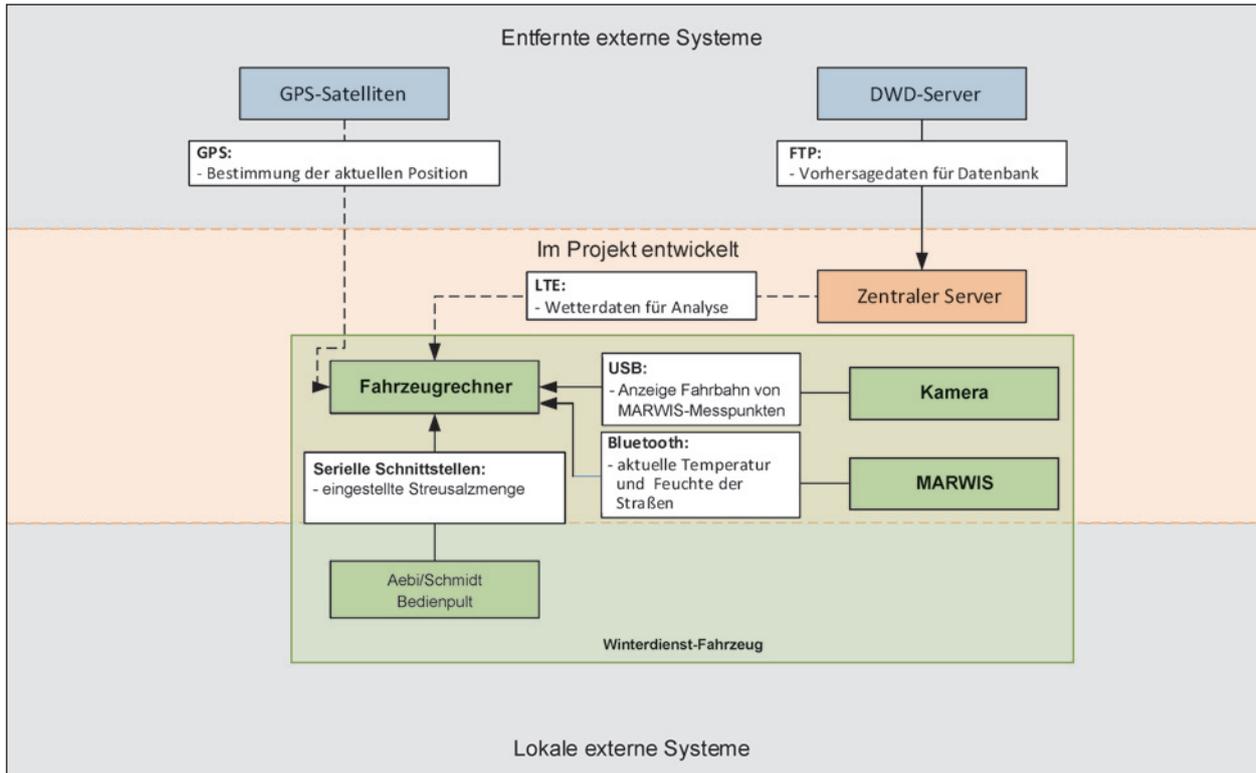


Bild 5-2: Systemübersicht Münchenberg

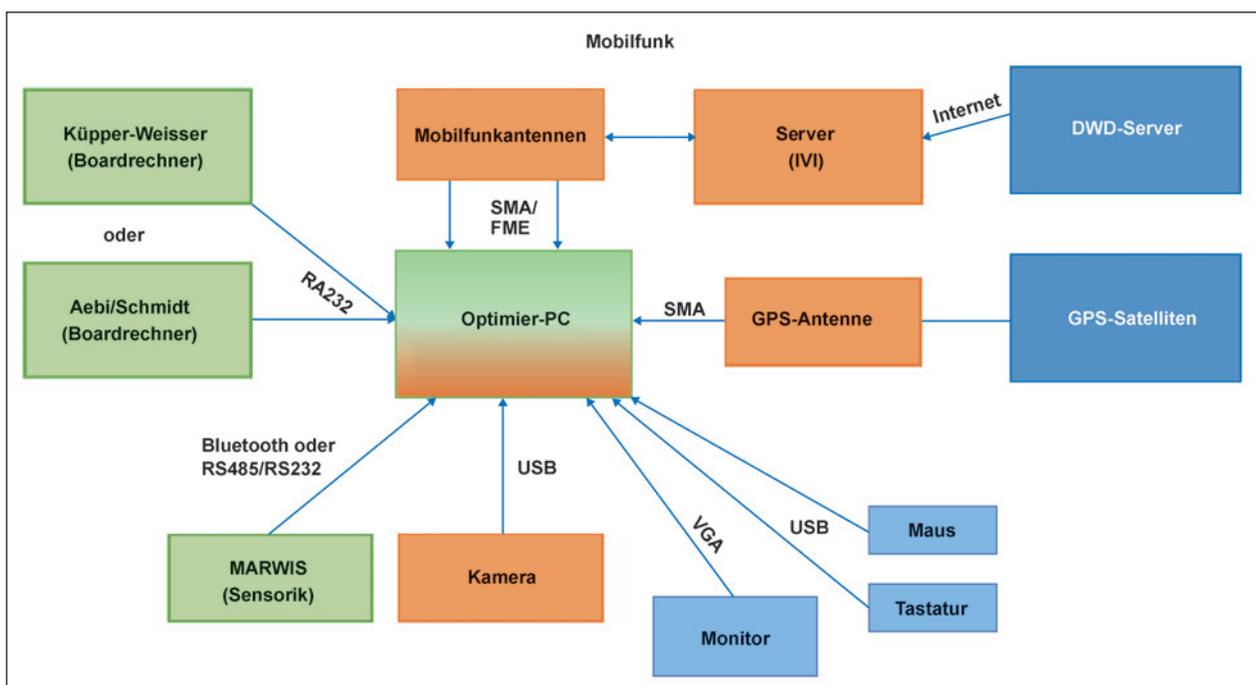


Bild 5-3: Allgemeine Komponentenübersicht für Einbau mit Schnittstellen und Anschlüssen

musste eine andere Datenanbindung realisiert werden, als am Fahrzeug der AM Münchberg.

Die zweite Kategorie der innerhalb dieses Projekts entwickelten Komponenten bestand vornehmlich aus zwei Komponenten: dem Fahrzeugrechner auf dem Winterdienstfahrzeug sowie dem zentralen Server für die Zwischenspeicherung und Weiterleitung der Daten des Deutschen Wetterdienstes. Eine allgemeine Komponentenübersicht für den Einbau ist dem Bild 5-3 zu entnehmen.

### 5.2.2 Fahrzeugrechner und umgesetzter Algorithmus

Auf dem Fahrzeugrechner findet die eigentliche Berechnung der Prognose für die Bestimmung der optimalen Streudichte statt. Bild 5-4 stellt die beteiligten Komponenten noch einmal etwas detaillierter dar. Zudem spiegelt sie den technischen Systemaufbau wider.

Das Winterdienstfahrzeug ist mit grünem Umriss dargestellt. Das System ist über drei Antennen, zwei Mobilfunkantennen und eine GPS-Antenne, mit der Außenwelt verknüpft. Außen am Fahrzeug

befindet sich der MARWIS, der neben der Oberflächentemperatur und dem Straßenzustand auch die Wasserfilmdicke auf der Straße ermittelt. Um den Messbereich des MARWIS zu überwachen, wurde eine Kamera im gleichen Bereich angebracht, die in einem definierten Intervall ein Bild des Messbereiches aufzeichnet. Die beiden Server befinden sich vor Ort beim Deutschen Wetterdienst (DWD) bzw. am Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI (FHG).

Der auf dem Fahrzeug befindliche Prognoserechner ist rot hervorgehoben. Auf ihm befinden sich der GPS-Empfänger, das zur Verortung nötige Kartenmaterial inkl. Konfigurationsdaten, eine Logdatei, in der die ermittelten Werte gespeichert werden und das eigentliche Prognoseprogramm. Dieses ist blau dargestellt und erhält die zuvor genannten Daten aus den verschiedenen Geräten, um sie weiterzuverarbeiten. Dabei wird zunächst ein Vorschritt ausgeführt: die vom GPS-Empfänger ermittelten Koordinaten werden auf die GIS-Daten (geografische Informationssysteme), extrahiert aus OpenStreet-Map, abgebildet und verortet. Somit kennt der Rechner den exakten Straßenabschnitt, auf dem sich das Fahrzeug befindet und kann auf das für

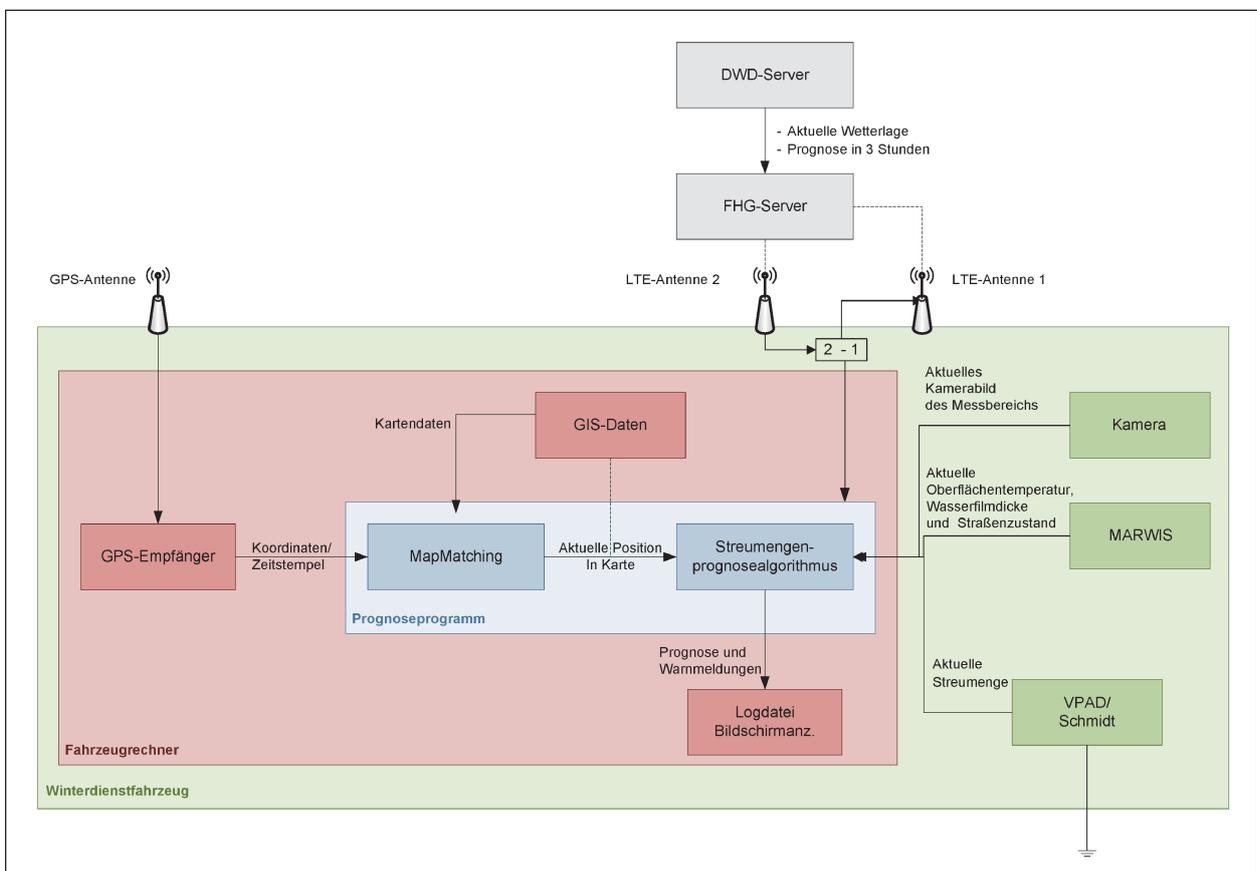


Bild 5-4: Detaillierte Darstellung der Komponenten der Streudichtenprognose

diesen Abschnitt hinterlegte Metawissen zurückgreifen. Zu das Metawissen setzt sich u. a. aus den Erfahrungen der Fahrer zusammen, so können bestimmte Streckenabschnitte mit Korrekturwerten für Streumengen versehen werden bzw. kann eine gezielte Anforderung an den DWD-Server erfolgen.

Der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgabe des Algorithmus wird schematisch in Bild 5-5 dargestellt. Dieser setzt sich aus folgenden Teilen zusammen:

- den aktuell erfassten Zustandsdaten,
- der aktuellen Position des Fahrzeuges und
- den an der Position abgespeicherten Erfahrungen der Fahrer.

Für die Berechnung werden zwei verschiedene Arten von Eingangsgrößen benötigt:

- Fest vorkonfigurierte Größen  
Diese sind bereits vor Start der Prognose bekannt und ändern sich nicht in deren Verlauf. Sie sind entweder fest im Programm kodiert oder werden über eine Konfigurationsdatei bei Programmstart eingelesen. In dieser Gruppe gibt es folgende Werte (in Bild 5-5 blau hinterlegt):
  - Das erstellte Straßennetz wurde mithilfe von GIS-Daten aus OpenStreetMap und sog. Ereignispunkten zusammengestellt. Es handelt sich hierbei um reduziertes Kartenmaterial, das sich auf den Teil des Netzes beschränkt,

auf dem das Streufahrzeug eingesetzt wird. Die Daten werden benötigt, um festzustellen, in welchem Gebiet sich das Fahrzeug befindet. Dieses wiederum hat Einfluss darauf, für welche DWD-Zone Prognosedaten abgefragt werden. Zudem lassen sich damit Korrekturen vornehmen, die sich aufgrund lokaler Begebenheiten ergeben (z. B. auf Brücken).

- Zur Laufzeit gemessene Größen  
Diese werden während des Programmablaufs in mehr oder weniger regelmäßigen Intervallen (u. a. in Abhängigkeit von der Empfangsqualität) immer wieder neu bestimmt und nehmen damit unmittelbaren Einfluss auf die berechnete Prognose. In dieser Gruppe gibt es folgende Werte (in Bild 5-5 grün hinterlegt):
  - Die aktuelle Position wird über den GPS-Empfänger im Fahrzeugrechner bestimmt und auf das Kartenmaterial verortet.
  - Die aktuelle Streusalzmenge wird entweder vom Bedienpult der Küpper-Weisser Streumaschine oder vom Bedienpult der Aebi Schmidt Streumaschine abgegriffen.
  - Die aktuelle Oberflächentemperatur, die aktuelle Wasserfilmdicke und der Straßenzustand werden über eine einerseits (Greding) über die serielle Schnittstelle und andererseits (Münchberg) über Bluetooth vom am Fahrzeug installierten MARWIS ausgelesen.

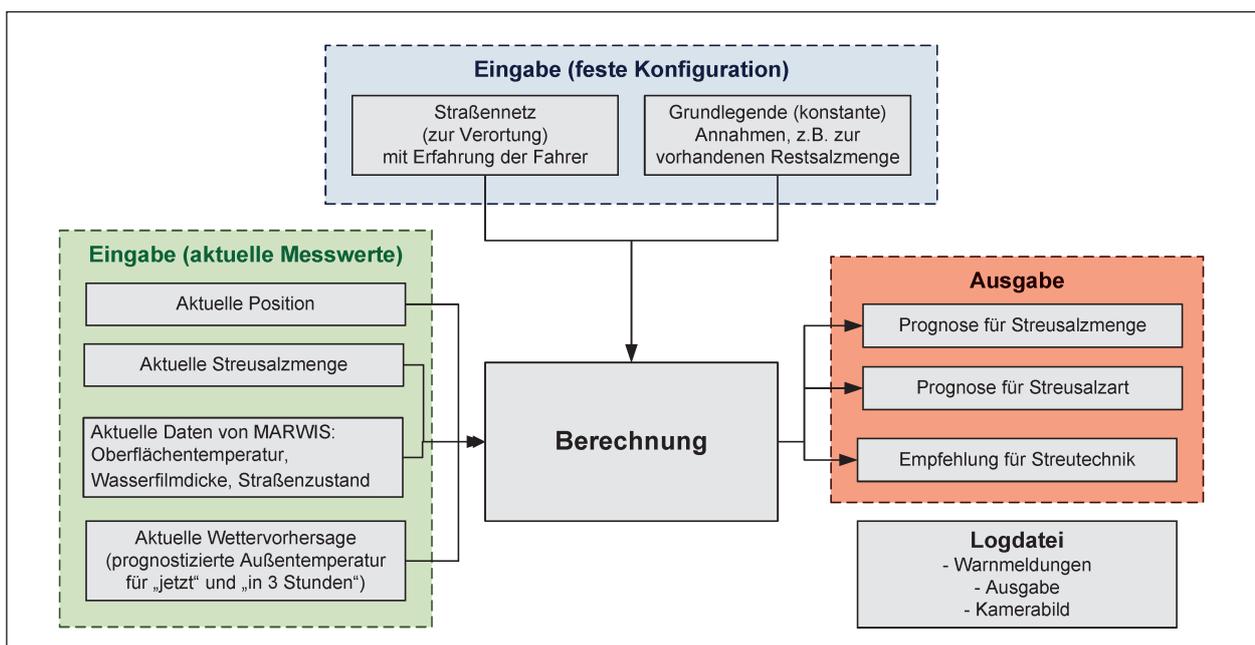


Bild 5-5: Grundprinzip der optimalen Streudichtepronose

- Die Prognosedaten des Deutschen Wetterdienstes (in Abhängigkeit von der aktuellen Position). Diese holt sich der Fahrzeugrechner über Mobilfunk (LTE) von einem bei Fraunhofer IVI installierten Server.
- Lokale Korrekturwerte (in Abhängigkeit von der aktuellen Position) basierend auf den Erfahrungswerten der Fahrer werden über das vorgegebene Kartenmaterial bestimmt. Sie ist nötig, um auf lokale Charakteristiken einzugehen, für die das vom Deutschen Wetterdienst gelieferte Material zu grob gegliedert ist.

Aus diesen Eingabewerten berechnet der Algorithmus die folgende Prognoseausgabe (in Bild 5-5 rot hinterlegt):

- benötigte Streusalzmenge,
- einzusetzende Streusalzart sowie
- Empfehlung der einzusetzenden Streutechnik.

Aktuell werden neben den Zustandsdaten und den Ausgabedaten auch Warnungen und das Kamerabild, das den vom MARWIS erfassten Straßenbereich aufnimmt, in einer Datei abgelegt.

### 5.2.3 Zentralserver

Der Zentralserver erfüllt zwei Aufgaben:

1. Regelmäßige Abfrage der Wettervorhersagedaten vom Server des Deutschen Wetterdienstes. Dies geschieht über eine FTP-Verbindung. Die Daten liegen auf dem DWD-Server als CSV-Dateien vor und werden stündlich aktualisiert. Einmal in der Stunde werden sie heruntergeladen, geparkt und in einer MySQL-Datenbank auf dem Zentralserver gespeichert.
2. Zur Verfügungstellung der gesammelten Daten für den Fahrzeugrechner. Der Zentralserver bietet Webservices an, mit dem der Fahrzeugrechner Daten für eine bestimmte DWD-Zone abfragen kann. Es wird die sowohl die Prognose für den aktuellen Zeitpunkt als auch für den Planungszeitraum (in drei Stunden) zurückgegeben. Der Fahrzeugrechner sollte sich allerdings die Ergebnisse für wiederholte Berechnungen merken, da die Abfrage über LTE langsam ist (ca. 5 – 10 Sekunden pro Anfrage) und den Analysealgorithmus sonst unnötig ausbremst.

Der Zentralserver wurde beim Fraunhofer IVI gehostet.

### 5.2.4 Technische Änderungen nach der Winterperiode 2016/2017

#### Server Wetterdaten

Bei der Auswertung der Daten des ersten Winters zeigte sich, dass es in der Funkverbindung Lücken gibt, wodurch eine ständige sichere Abfrage der aktuellen Wetterdaten nicht immer gewährleistet war. Aus diesem Grund wurde die Erfassung der DWD-Daten auf dem Server so umgestaltet, dass die Daten in einer Form gespeichert sind, dass sie auch nachträglich noch zur Berechnung verwendet werden können. Es waren also für jede Wetterstation die zu jeder Stunde veröffentlichten aktuellen Werte und die zu dieser Stunde erstellten Prognosen für die nächsten 4 Stunden zu speichern. Die Zahl von 4 Stunden ergab sich aus der Tatsache, dass im Algorithmus die Daten für einen Prognosezeitraum von 3 Stunden zur Berechnung herangezogen werden.

Die vom DWD gelieferten Daten umfassen in jeder Lieferung (stündlich) für jede im Auswertebereich liegende Messstation eine Prognose für jede Stunde für die nächsten 24 Stunden. Alle diese Daten in der Datenbank zu hinterlegen, erschien bei der Menge der Datensätze nicht zielführend. Immerhin sind dies schon bei der reduzierten Datenmenge (Prognose für 4 Stunden der benötigten Messstationen) noch ca. 9 Millionen Datensätze für eine Winterdienstsaison. Es wurden jedoch alle empfangenen DWD-Daten, soweit sie eine verwendete Erfassungsstation betrafen, als komprimierte Textdatei gespeichert.

#### Programmwerkzeuge

Der auf dem Fahrzeugrechner hinterlegte Algorithmus zur Streudichteberechnung wurde als Bibliotheksfunktion umgestaltet. Damit konnte das bisher nur als Anzeigewerkzeug dienende Programm „PrognoseView“ um eine Komponente erweitert werden, die eine nachträgliche Berechnung der Streudichte ermöglicht unter Verwendung desselben Algorithmus wie auf dem Fahrzeug.

#### Elektrik

Die elektrische Verkabelung wurde komplett neugestaltet. Die im ersten Winter verwendete fest vercrimpte Installation (unlösbare Quetschverbindungen) wurde in ein modulares Stecker-Kabel-System unter Verwendung professioneller Komponenten geändert.

## Funkkomponente

Obwohl für den Fahrzeugrechner das System eines weltweit führenden Herstellers verwendet wurde, erwies sich insbesondere die Funkkomponente als sehr unzuverlässig, was im Wesentlichen an suboptimaler Treibersoftware lag. Aufgrund der Topografie an den Einsatzorten und der Art und Weise der Arbeit einer Autobahnmeisterei müssen Verbindungsabbrüche sowie ständige kurzzeitige Ein-Ausschalt-Zyklen vom System toleriert werden. Das in dem Rechner verbaute System erfüllte diese Anforderungen nicht und bedurfte dann einer manuellen Vor-Ort-Interaktion. Aus diesem Grund wurde ein externes Funksystem eingebaut, das nach Beginn der Spannungsversorgung eine stabile Internetverbindung aufbaut und über Ethernetkabel bzw. WLAN bereitstellt. Die obengenannten Systemanforderungen zu Verbindungsabbrüchen und Ein- und Ausschaltzyklen konnten so erfüllt werden.

## Bordrechneranbindung

Um die eigenen berechneten Werte besser einordnen zu können, wurde eine Abfrage der vom Winterdienst-Bordrechner erfassten Werte (Fahrbahnoberflächentemperatur, eingestellte Streumengen) umgesetzt.

Auf dem in Münchberg eingesetzten System der Firma Schmidt lässt sich außerdem der Betriebsablauf des Schild- und Streusystems nachverfolgen (Fahren, Streuen, Sprühen, Mengen etc.). Um diese Daten erfassen zu können, war eine Anbindung an das Bordrechnersystem notwendig und sollte jeweils über die serielle Schnittstelle erfolgen. Da diese Schnittstellen jedoch schon Verwendung fanden, mussten elektrische Verzweiger gebaut werden. Außerdem konnte nicht das bevorzugte DIN-EN-15430-Protokoll Verwendung finden. Nach Rücksprache mit dem Hersteller wurde dann das firmeneigene (binäre) AL-Protokoll programmiert, um die Werte abfragen zu können.

Bei dem in Greding eingesetzten System der Firma Küpper-Weisser wurden die Daten kontinuierlich auf einer seriellen Druckerschnittstelle ausgegeben und können dort mitgelesen werden. Dazu ist eine Auszweigung aus der seriellen Schnittstelle notwendig.

## Algorithmus

Nach Auswertung von Daten des ersten Winters ist der interne Berechnungsalgorithmus angepasst und auf die Bordcomputer übertragen worden.

## MARWIS

Der in Münchberg neu installierte MARWIS-Sensor sollte ursprünglich über Bluetooth angebunden werden. Aufgrund der Größe des Fahrzeuges (Strecke zwischen MARWIS und Rechner), verbunden mit der Position der Komponenten (Rechner hinter Beifahrersitz in Fahrerkabine aus Metall vs. MARWIS hinter großem Flüssigkeitstank) war eine stabile Kommunikation über Bluetooth nicht gewährleistet und wurde durch die Benutzung der Kabelverbindung zum Datenaustausch ersetzt.

## 5.3 Hardwarekomponenten auf den Testfahrzeugen

### 5.3.1 Spezifikation der Hardwarekomponenten

#### 1. Bordrechner

- Typ: VTC 7210-BK,
- Ausführung: lüfterloser Fahrzeugrechner,
- Abmessungen (B x L x H):  
260 mm x 206 mm x 79,5 mm,
- CPU: Intel Core processor dual core i5-4300U, 1.9 Ghz,
- Schnittstellen:  
RS-232; WLAN; SIM-Karte; GPS; CAN-Bus,
- Betriebssystem: MS Windows 7.

#### 2. Display (in den Testfahrzeugen nicht ständig installiert)

- Typ: VMD 2002-B,
- Bildschirmdiagonale: 8".

#### 3. Antennen

- Mimo-Set Magnethaftantenne,
- GPS-Antenne.

#### 4. Fahrbahnsensor

- Typ: MARWIS-UMB,
- Messdistanz zur Fahrbahn: 2 m.

#### 5. Kamera

- Typ: Luis USB-Rückfahrkamera,
- Technische Beschreibung: USB-Tag- und Nachtsichtkamera in Farbe. Die USB-Kame-

ra schaltet bei Dunkelheit automatisch ihre 18 Infrarot Nachtsicht LEDs zu. Somit ist ein klares helles Bild in einem Winkel von über 120° in einer Ausstrahlung von 5 m gewährleistet. Das Gehäuse mit Schutzart IP69K ist hermetisch dicht und verhindert das Beschlagen der Objektivscheibe von innen.

### 5.3.2 Fahrzeuginstallation in der Autobahnmeisterei Münchberg

Bei der Autobahnmeisterei Münchberg wurden die Hardwarekomponenten auf einem 4-Achs-Lkw des Typs TGS 35.480 von MAN installiert. Das Fahrzeug ist mit einer Kombinations-Streumaschine des Typs Stratos S50C-30 VCLN-660 CSW der Firma Aebi Schmidt ausgerüstet.

An dem Fahrzeug wird ein Pflug der Firma Bucher des Typs Assaloni.Com TE90 42/70X eingesetzt. Der Pflug ist nach links und rechts über die Fahrzeugbreite hinaus ausfahrbar und erreicht bei 32° Schrägstellung eine Räumbreite bis 6.030 mm.

Die Montage des MARWIS-Sensors und der Kamera erfolgte linksseitig an dem Spannprofil für die Solebehälter in etwa 2,00 m Höhe. Die Position der Kamera wurde nach der Winterdienstsaison 2016/17 so verändert, dass sie schräg nach hinten ausgerichtet war. Sie war dann zwar nicht mehr auf den Messfleck des Sensors ausgerichtet, aber die Aufnahmequalität wurde etwas besser.

Der Bordcomputer war hinter dem Beifahrersitz auf der Bodenplatte montiert. Die Dualantennen und die GPS-Antenne hatten ihren Platz rechts hinten auf der Fahrerkabine.

### 5.3.3 Fahrzeuginstallation in der Autobahnmeisterei Greding

Bei der Autobahnmeisterei Greding wurden die Hardwarekomponenten auf einem 3-Achs-Lkw des Typs 410 EEV von IVECO installiert. Das Fahrzeug ist mit einer Feuchtsalz-Streumaschine des Typs IMSSN E 44080HFA der Firma Küpper-Weisser ausgerüstet.

An dem Fahrzeug wird ein Pflug der Firma Zaugg des Typs G 50 K-550-5-45-10 eingesetzt. Der Pflug hat bei 35° Schrägstellung eine Räumbreite von 4.500 mm. In dieser Stellung wird etwa 500 mm über die linke Fahrzeugaußenkante hinaus geräumt.

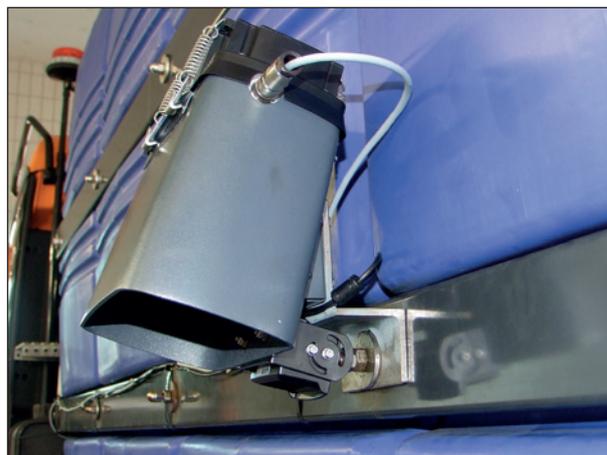


Bild 5-6: Kombinierte Befestigung von MARWIS-Sensor und Kamera. Die Kamera ist auf den Messfleck des Sensors ausgerichtet



Bild 5-7: Saison 2017/18 – Ausrichtung der Kamera schräg nach hinten



Bild 5-8: MARWIS-Sensor und daneben montierte Kamera der AM Greding. Ab Saison 2017/18 war die Kamera schräg nach hinten ausgerichtet

Die Montage der Kamera erfolgte linksseitig an dem Gerätekasten in etwa 1,60 m Höhe. Der MARWIS-Sensor war bereits an dem Gerätekasten installiert

und wurde in das System eingebunden. Der Bordcomputer war an der Rückwand der Fahrerkabine hinter dem Beifahrersitz montiert. Die Dual-Antennen und die GPS-Antenne hatten ihren Platz rechts hinten auf der Fahrerkabine.

## 6 Versuchsstrecken

### 6.1 Autobahnmeisterei Münchberg

#### 6.1.1 Charakteristik der Einsatzstrecke

Das Einsatzgebiet erstreckte sich über den gesamten Verantwortungsbereich der Autobahnmeisterei Münchberg. Südlichster Wendepunkt ist die Anschlussstelle Bindlach, die sich im Bereich der AM Trockau befindet. Nördlichster Wendepunkt ist die Anschlussstelle Lobenstein, die sich im Verantwortungsbereich der Via Gateway Thüringen befindet.

Die Autobahn A 9 ist im Bereich der Autobahnmeisterei Münchberg durchgängig 6-streifig. Im Bereich der AM Münchberg befinden sich mehrere Großbrücken (Tabelle 6-1) Die Autobahn befindet sich in Höhenlagen von 349 m (Talbrücke Lanzendorf) bis 650 m (AS Naila).

Bezeichnung	ca. Länge/m
Saaletalbrücke bei Rudolphstein	296
Straßenbrücke Nord im AD Bayrisches Vogtland	50
Straßenbrücke Süd im AD Bayrisches Vogtland	50
Talbrücke Münchberg	495
Talbrücke Rohrsreuth	180
Talbrücke Lanzendorf	1.092

Tab. 6-1: Großbrücken im Bereich der AM Münchberg

Punkt Nr.	Richtung Nord/ Süd	Art Start/ Ende	Koordinate		Bezeichnung der Zone	SWIS- Bereich DWD- Kennung	Korrektur- wert Kelvin	Beschreibung
			Breite	Länge				
09001	S	S	50.418331°	11.786574°	Rudolphstein	P 081	0	Nordgrenze WD AM Münchberg
09002	S	S	50.418051°	11.785767°	Rudolphstein	P 081	1	Talbrücke Rudolphstein
09003	S	E	50.417410°	11.784639°	Rudolphstein	P 081	1	Talbrücke Rudolphstein
09004	S	E	50.408460°	11.775457°	Rudolphstein	P 081	0	Südgrenze GMA Rudolphstein
09005	S	S	50.408460°	11.775457°	Bayr. Vogtland	P 083	0	Nordgrenze GMA Bayr. Vogtland
09006	S	S	50.326495°	11.790745°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Brücke Nord AD Bayr. Vogtland

Tab. 6-3: Schaltpunkte im Bereich der AM Münchberg

#### 6.1.2 Straßenwetterstationen im Einsatzgebiet

Für den Streckenabschnitt sind die Mess- und Vorhersagedaten der in Tabelle 6-2 aufgelisteten Straßenwetterstationen relevant.

Die Straßenwetterstationen (SWS) befinden sich ausnahmslos auf Großbrücken. Nach den Einsatz Erfahrungen der Autobahnmeisterei treten winterliche Bedingungen zuerst im Bereich des Autobahndreieckes Bayrisches Vogtland ein. Das ist durch die Höhenlage und topografische Bedingungen begründet.

Insofern haben die Daten der Straßenwetterstation AD Bayrisches Vogtland eine Leitfunktion für den gesamten Streckenabschnitt. Sie haben eine hohe Aussagekraft für das gesamte Netz der Autobahnmeisterei Münchberg.

Für die Standorte dieser Straßenwetterstationen werden vom DWD stündlich Punktwettervorhersagen erstellt, deren 3-Stunden-Wert in die Kalkulation der Streudichte einbezogen wird.

Für die Grenzen des Einflussbereiches der Straßenwetterstation wurden ebenso wie für die besonderen Einflüsse durch Brückenlage oder Wetterseide die Koordinaten der Schaltpunkte festgelegt (Tabelle 6-3).

Code	Station	Auto- bahn	SWIS- Nr.	Autobahn- meisterei
P 081	Rudolphstein	A 9	3944	Münchberg
P 083	AD Bayr. Vogtland	A 72	3846	Rehau
P 171	Rohrsreuth	A 9	3944	Münchberg
P 172	Lanzendorf	A 9	1172	Münchberg

Tab. 6-2: Straßenwetterstationen im Einsatzgebiet der Autobahnmeisterei Münchberg

Punkt Nr.	Richtung Nord/Süd	Art Start/Ende	Koordinate		Bezeichnung der Zone	SWIS-Bereich	Korrekturwert	Beschreibung
			Breite	Länge		DWD-Kennung	Kelvin	
09007	S	E	50.325849°	11.791029°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Brücke Nord AD Bayr. Vogtland
09008	S	S	50.322496°	11.792908°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Brücke Süd AD Bayr. Vogtland
09009	S	E	50.321740°	11.793617°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Brücke Süd AD Bayr. Vogtland
09010	S	S	50.196313°	11.770236°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Talbrücke Münchberg
09011	S	E	50.194722°	11.768706°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Talbrücke Münchberg
09012	S	E	50.081561°	11.665579°	Bayr. Vogtland	P 083	0	Südgrenze GMA Bayr. Vogtland
09013	S	S	50.081561°	11.665579°	Rohrersreuth	P 171	0	Nordgrenze GMA Rohrersreuth
09014	S	S	50.075787°	11.644657°	Rohrersreuth	P 171	1	Talbrücke Rohrersreuth-Köslar
09015	S	E	50.075505°	11.643053°	Rohrersreuth	P 171	1	Talbrücke Rohrersreuth-Köslar
09016	S	S	50.055066°	11.617951°	Rohrersreuth	P 171	0	Südgrenze GMA Rohrersreuth
09017	S	S	50.055066°	11.617951°	Lanzendorf	P 172	0	Nordgrenze GMA Lanzendorf
09018	S	S	50.048760°	11.616860°	Lanzendorf	P172	1	Talbrücke Lanzendorf
09019	S	E	50.047511°	11.616444°	Lanzendorf	P172	1	Talbrücke Lanzendorf
09020	S	E	50.014364°	11.605635°	Lanzendorf	P172	0	Südliche Einsatzgrenze AM Münchberg
09021	N	S	50.014895°	11.607288°	Lanzendorf	P172	0	Südliche Einsatzgrenze AM Münchberg
09022	N	S	50.035834°	11.608920°	Lanzendorf	P172	1	Talbrücke Lanzendorf
09023	N	E	50.039366°	11.612155°	Lanzendorf	P172	1	Talbrücke Lanzendorf
09024	N	E	50.055066°	11.617951°	Lanzendorf	P172	0	Nordgrenze GMA Lanzendorf
09025	N	S	50.055066°	11.617951°	Rohrersreuth	P 171	0	Südgrenze GMA Rohrersreuth
09026	N	S	50.074072°	11.638910°	Rohrersreuth	P 171	0	Talbrücke Rohrersreuth-Köslar
09027	N	E	50.074966°	11.641556°	Rohrersreuth	P 171	0	Talbrücke Rohrersreuth-Köslar
09028	N	E	50.081561°	11.665579°	Rohrersreuth	P 171	0	Nordgrenze GMA Rohrersreuth
09029	N	S	50.081561°	11.665579°	Bayr. Vogtland	P 083	0	Südgrenze GMA Bayr. Vogtland
09030	N	S	50.189825°	11.764655°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Talbrücke Münchberg
09031	N	E	50.191989°	11.766705°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Talbrücke Münchberg
09032	N	S	50.321516°	11.794104°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Brücke Süd AD Bayr. Vogtland
09033	N	E	50.322167°	11.793569°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Brücke Süd AD Bayr. Vogtland
09034	N	S	50.324668°	11.791635°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Brücke Nord AD Bayr. Vogtland
09035	N	E	50.325237°	11.791441°	Bayr. Vogtland	P 083	1	Brücke Nord AD Bayr. Vogtland
09036	N	E	50.408460°	11.775457°	Bayr. Vogtland	P 083	0	Nordgrenze GMA Bayr. Vogtland
09037	N	S	50.410606°	11.777291°	Rudolphstein	P 081	0	Südgrenze GMA Rudolphstein
09038	N	S	50.415349°	11.781388°	Rudolphstein	P 081	1	Talbrücke Rudolphstein
09039	N	E	50.416150°	11.782904°	Rudolphstein	P 081	1	Talbrücke Rudolphstein
09040	N	E	50.418349°	11.786694°	Rudolphstein	P 081	0	Nordgrenze WD AM Münchberg

Tab. 6-3: Fortsetzung

## 6.2 Autobahnmeisterei Greding

### 6.2.1 Charakteristik der Einsatzstrecke

Das Einsatzgebiet erstreckt sich über den gesamten Verantwortungsbereich der Autobahnmeisterei Münchberg auf der A 9. Südlichster Wendepunkt ist die Anschlussstelle Köschinger Forst, die sich im Bereich der AM Ingolstadt befindet. Nördlichster

Wendepunkt ist die Anschlussstelle Allersberg, die sich im Verantwortungsbereich der AM Fischbach befindet.

Die Autobahn A 9 ist im Bereich der Autobahnmeisterei Greding durchgängig 6-streifig. Im Bereich der AM Greding befinden sich ebenfalls mehrere Großbrücken (Tabelle 6-4). Die Autobahn befindet sich in

Höhenlagen von 375 m (AS Kinding) bis 525 m (bei AS Denkendorf).

Auf dem Streckenabschnitt befinden sich die in Tabelle 6-4 aufgelisteten Großbrücken.

Bezeichnung	ca. Länge/m
Brücke Main-Donau Kanal	120
Altmühlbrücke	70
Hangbrücke Kinding (Richtungsfahrbahn München)	630

Tab. 6-4: Großbrücken im Bereich der AM Greding

Code	Station	Autobahn	SWIS-Nr.	Autobahnmeisterei	Höhenlage/m
P 338	Allersberg	A 9	1102	Fischbach	398
P 423	Offenbau	A 9	804	Greding	452
P 438	Gelbelsee	A 9	404	Greding	523
P 533	Köschinger Forst	A 9	716	Ingolstadt	551

Tab. 6-5: Straßenwetterstationen an der A 9 im Bereich der AM Greding und angrenzender Autobahnmeistereien

Punkt Nr.	Richtung Nord/Süd	Art Start/Ende	Koordinate		Bezeichnung der Zone	SWIS-Bereich DWD-Kennung	Korrekturwert Kelvin	Beschreibung
			Breite	Länge				
09100	S	S	49.252221°	11.215559°	Allersberg	P338	0	Nordgrenze AM Greding/ GMA Allersberg
09101	S	S	49.192913°	11.246543°	Allersberg	P338	0	Brücke Main-Donau Kanal
09102	S	E	49.192240°	11.247333°	Allersberg	P338	0	Brücke Main-Donau Kanal
09103	S	E	49.185014°	11.253235°	Allersberg	P338	0	Südgrenze GMA Allersberg
09104	S	S	49.185014°	11.253235°	Offenbau	P423	0	Nordgrenze GMA Offenbau
09105	S	E	48.998601°	11.369250°	Offenbau	P423	0	Südgrenze GMA Offenbau
09106	S	S	48.998601°	11.369250°	Gelbelsee	P438	0	Nordgrenze GMA Gelbelsee
09107	S	S	48.992446°	11.382088°	Gelbelsee	P438	1	Brücke Altmühl
09108	S	E	48.991786°	11.382829°	Gelbelsee	P438	1	Brücke Altmühl
09109	S	S	48.977339°	11.396130°	Gelbelsee	P438	1	Hangbrücke Kinding
09110	S	E	48.976683°	11.396563°	Gelbelsee	P438	1	Hangbrücke Kinding
09111	S	E	48.917650°	11.469378°	Gelbelsee	P438	0	Südgrenze GMA Gelbelsee
09112	S	S	48.917650°	11.469378°	Köschinger Forst	P533	0	Nordgrenze GMA Köschinger Forst
09113	S	E	48.859368°	11.465556°	Köschinger Forst	P533	0	Südgrenze AM Greding/ GMA Köschinger Forst
09114	N	S	48.859376°	11.465761°	Köschinger Forst	P533	0	Südgrenze AM Greding/ GMA Köschinger Forst
09115	N	E	48.917594°	11.469531°	Köschinger Forst	P533	0	Nordgrenze GMA Köschinger Forst
09116	N	S	48.917594°	11.469531°	Gelbelsee	P438	0	Südgrenze GMA Gelbelsee
09117	N	S	48.990936°	11.384089°	Gelbelsee	P438	1	Brücke Altmühl
09118	N	E	48.991593°	11.383363°	Gelbelsee	P438	1	Brücke Altmühl
09119	N	E	48.998601°	11.369250°	Gelbelsee	P438	0	Nordgrenze GMA Gelbelsee
09120	N	S	48.998601°	11.369250°	Allersberg	P338	0	Südgrenze GMA Allersberg
09120	N	S	49.191138°	11.248297°	Allersberg	P338	0	Brücke Main-Donau Kanal
09121	N	E	49.191826°	11.247613°	Allersberg	P338	0	Brücke Main-Donau Kanal
09122	N	E	49.252221°	11.215559°	Allersberg	P338	0	Nordgrenze AM Greding/ GMA Allersberg

Tab. 6-6: Schaltpunkte im Bereich der AM Greding

## 6.2.2 Straßenwetterstationen im Einsatzgebiet

Für die Prognose der Wetterentwicklung sind die Daten von vier Straßenwetterstationen von Bedeutung. Sie befinden sich alle direkt an dem betreuten Streckenabschnitt (Tabelle 6-5).

Für die Grenzen des Einflussbereiches der Straßenwetterstation wurden ebenso wie für die besonderen Einflüsse durch Brückenlage die Koordinaten der Schaltpunkte festgelegt (Tabelle 6-6).

## 7 Eingangsdaten für die Berechnung der optimalen Streudichte

Das Projekt Autostreu II nutzt die neuen Möglichkeiten moderner Sensorik, um alle verfügbaren Informationen über aktuelle Umfeldbedingungen in die Berechnung der Streudichte einfließen zu lassen. In Tabelle 7-1 sind alle Eingangsdaten zusammengestellt, die im aktuellen Algorithmus verarbeitet werden.

Vollständigkeit und Qualität der Eingangsdaten sind unverzichtbare Voraussetzungen für eine qualifizierte Berechnung der Streudichte.

Weitere Eingangsdaten könnten das Ergebnis noch verbessern. Dazu gehören insbesondere die Restsalzmenge und der Reibwert. Für diese Da-

ten gibt es im Moment noch keine an Einsatzfahrzeugen verwendbaren bzw. hinreichend genauen Geräte.

Die große Zahl verschiedener Eingangsdaten aus unterschiedlichen Quellen stellten auch im Projekt eine besondere Herausforderung dar. Die Datenverfügbarkeit war im Versuchsstadium nicht in allen Phasen gewährleistet. Datenausfälle haben gelegentlich zu Problemen bei der Berechnung der optimalen Streudichte geführt. Derartige Hard- und Softwareprobleme wurden analysiert. Durch technische Veränderungen und Softwareanpassung konnten in der zweiten Winterdienstsaison des Projektes (2017/2018) Ausfälle weitgehend vermieden werden.

Ganz entscheidend war auch die Qualität der Eingangsdaten. Dazu werden in Kapitel 8 die wesentlichen Eingangsdaten im Detail untersucht.

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung	Datenquelle	Funktion im Algorithmus
FBT <sub>E</sub>	°C	Fahrbahntemperatur am Einsatzfahrzeug gemessen	MARWIS	Basiswert für die Ermittlung der Berechnungstemperatur
FBT <sub>0</sub>	°C	aktuellster Wert für die Fahrbahntemperatur aus der Punktwettervorhersage	DWD	Ermittlung der Tiefsttemperatur im Prognosezeitraum Ermittlung der für die Berechnung maßgeblichen Temperaturtendenz im Prognosezeitraum Ermittlung der optimalen Streutechnologie
FBT <sub>1</sub>	°C	Temperaturwert für den Prognosezeitpunkt 1 Stunde	DWD	
FBT <sub>2</sub>	°C	Temperaturwert für den Prognosezeitpunkt 2 Stunden	DWD	
FBT <sub>3</sub>	°C	Temperaturwert für den Prognosezeitpunkt 3 Stunden	DWD	
FBT <sub>K</sub>	K	Korrekturwert der Fahrbahntemperatur	Zentralserver	vorausschauende Berücksichtigung bekannter Temperaturbesonderheiten
WFD <sub>E</sub>	µm	Wasserfilmdicke am Einsatzfahrzeug gemessen	MARWIS	Basiswert für die Ermittlung der Berechnungsfilmdicke
FBZ <sub>E</sub>	-	am Einsatzfahrzeug erfasster Fahrbahnzustand	MARWIS	Ermittlung des Streumodus und der optimalen Streutechnologie
FBZ <sub>0</sub>	-	aktuellster Wert für den Fahrbahnzustand aus der Punktwettervorhersage	DWD	Ermittlung der optimalen Streutechnologie
FBZ <sub>3</sub>	-	Fahrbahnzustand für den Prognosezeitpunkt 3 Stunden aus der Punktwettervorhersage	DWD	Ermittlung der optimalen Streutechnologie
NI <sub>1</sub>	mm/h	Niederschlagsmenge pro Stunde (1. Stunde nach Prognosebeginn)	DWD	Ermittlung der im Prognosezeitraum zu erwartenden Wasserfilmdicke bei Schneefall oder Glatteisbildung
NI <sub>2</sub>	mm/h	Niederschlagsmenge pro Stunde (2. Stunde nach Prognosebeginn)	DWD	
NI <sub>3</sub>	mm/h	Niederschlagsmenge pro Stunde (3. Stunde nach Prognosebeginn)	DWD	
X; Y	DG	GPS-Daten in Dezimalgrad	GPS-Antenne	Positionsermittlung zur Aktivierung der Temperaturkorrekturwerte

Tab. 7-1: Eingangsdaten für die Berechnung der optimalen Streudichte

## 8 Qualität der Eingangsdaten

### 8.1 Einfluss von Messwertabweichungen auf die Streudichte

Die Fahrbahnoberflächentemperatur (FBT) und die Wasserfilmdicke (WFD) sind die wesentlichsten Einflussfaktoren auf die erforderliche Streudichte.

Beide Werte werden berührungslos über den MARWIS-Sensor ermittelt. In der TLS 2012 sind die folgende Festlegungen für die Messgenauigkeit enthalten:

#### Fahrbahnoberflächentemperatur FBT (Typ 49)

Messgenauigkeit im eingebauten Zustand:

- bei Strahlungsbilanz < 200 W/m<sup>2</sup>: ± 1 K,
- bei Temperaturen ≤ +5 °C und bei Strahlungsbilanz > 200 W/m<sup>2</sup> : ±1,5 K.

#### Wasserfilmdicke WFD (Typ 72)

Messgenauigkeit:

- ≤ 0,1 mm: mindestens > 0 mm,
- > 0,1 ... ≤ 0,5 mm ± 0,05 mm,
- > 0,5 ... ± 0,1 mm.

Die Kernformel für die Berechnung der Streudichte SD lautet:

$$SD = (FBT \times WFD) / -0,0637$$

Daraus leitet sich die Berechnungsvorschrift für den maximalen Dosierfehler (SDF) ab:

$$SDF = (FBT_{\text{Soll}} \times WFD_{\text{Soll}} / -0,0637) - (FBT_{\text{Toleranzgrenze}} \times WFD_{\text{Toleranzgrenze}} / -0,0637)$$

Die Formel gilt nur für negative Fahrbahntemperaturen.

Für einen Sollwert der Fahrbahntemperatur von -2 °C und eine Toleranz von 1 K ergibt sich das Diagramm in Bild 8-1: Die Linien für -1 °C und -3 °C stellen die oberen und unteren Toleranzgrenzen dar. Aus dem Abstand zwischen den Linien ist der Dosierfehler zu ermitteln.

Im Diagramm in Bild 8-2 ist der Dosierfehler markiert, der entsteht, wenn die Temperatur korrekt ermittelt wird, aber bei der Messung der Wasserfilmdicke eine Abweichung von 0,05 mm vorhanden ist.

Grundsätzlich muss auch damit gerechnet werden, dass bei beiden Messwerten Abweichungen auftreten. Im ungünstigsten Fall wirken beide Abweichungen in Richtung der Erhöhung des Dosierfehlers. Das ist in Bild 8-3 dargestellt.

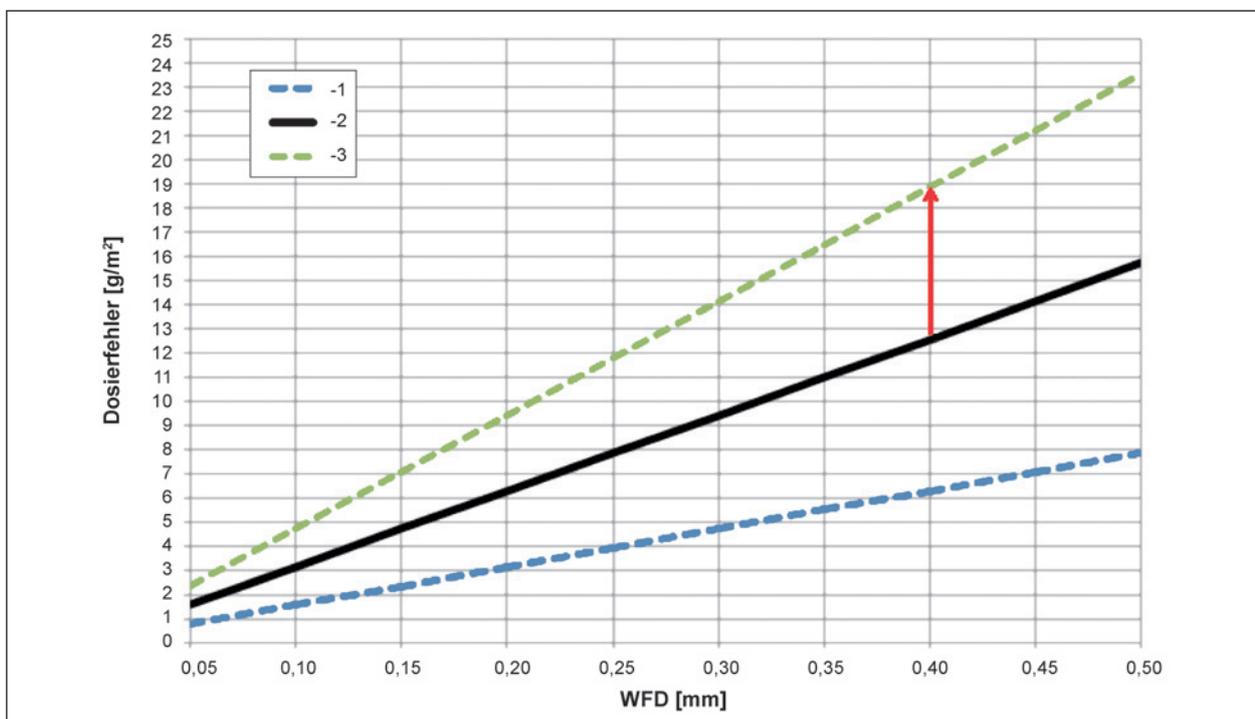


Bild 8-1: Dosierfehler in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke und Fahrbahntemperatur. Als Beispiel (roter Pfeil) eine korrekt gemessene Wasserfilmdicke und eine Messabweichung bei der Fahrbahntemperatur von 1 K. Resultierend ist ein Dosierfehler von 6,3 g/m<sup>2</sup>

Eine Übersicht über die Auswirkungen von Abweichungen der Messwerte von Fahrbahntemperatur und/oder Wasserfilmdicke ist dem Bild 8-4 zu entnehmen.

Im Ergebnis der Berechnungen ist festzustellen, dass insbesondere bei größeren Wasserfilmdicken durch relativ geringen Abweichungen von der Solltemperatur schon erhebliche Dosierfehler verursacht werden.

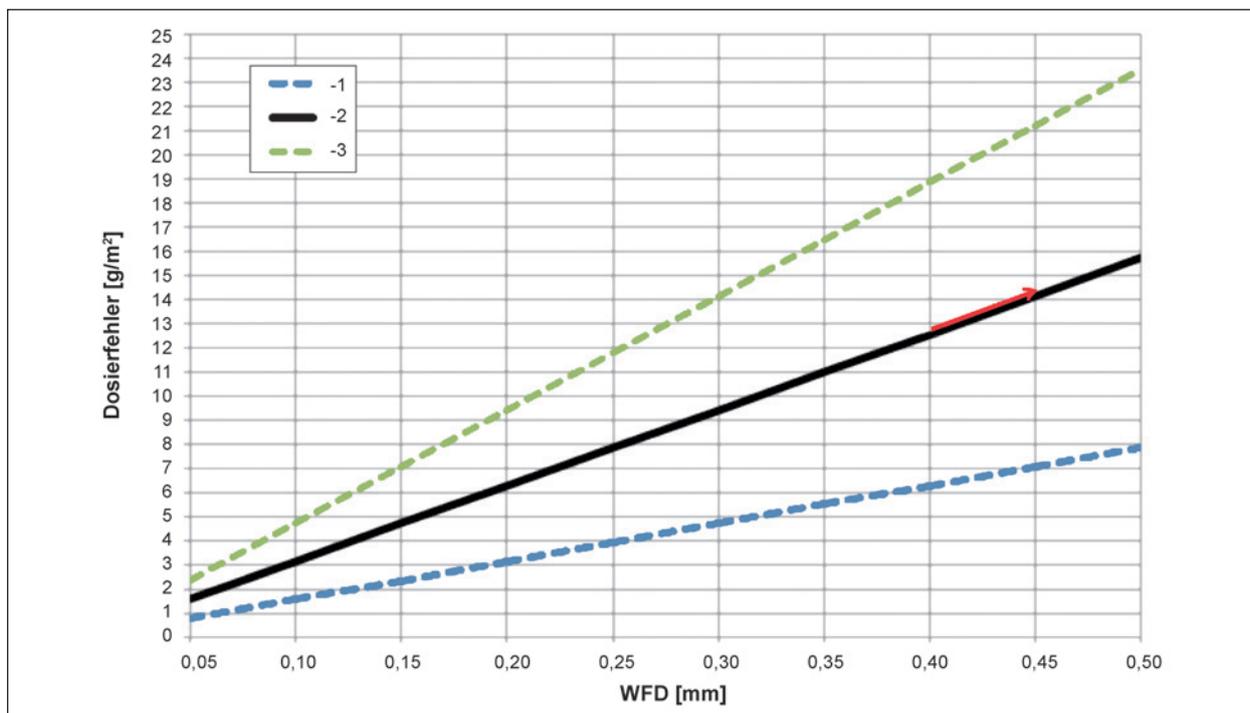


Bild 8-2: Dosierfehler in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke und Fahrbahntemperatur. Als Beispiel (roter Pfeil) eine korrekt gemessene Temperatur und eine Messabweichung bei der Wasserfilmdicke von 0,05 mm. Resultierend ist ein Dosierfehler von 1,6 g/m²

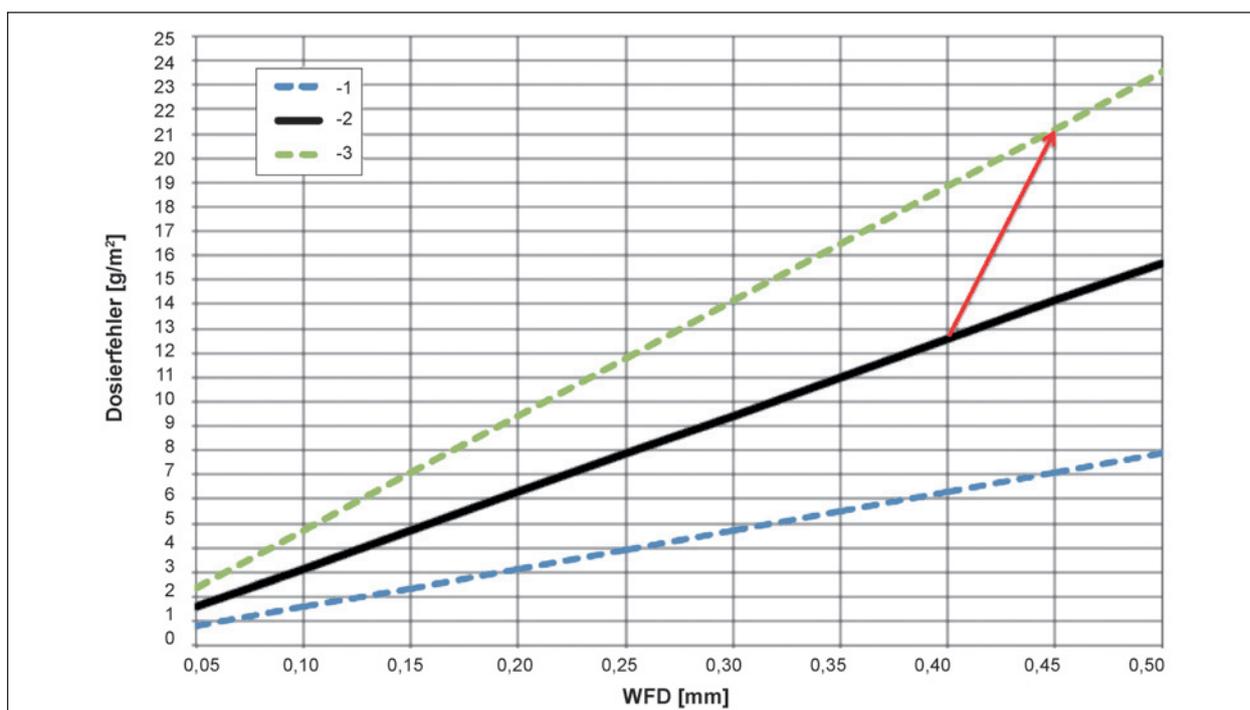


Bild 8-3: Dosierfehler in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke und Fahrbahntemperatur. Als Beispiel (roter Pfeil) Messabweichungen bei der Fahrbahntemperatur von 1 K und bei der Wasserfilmdicke von 0,05 mm (Sollwert 0,40 mm) in ungünstigster Kombination. Resultierend ist ein Dosierfehler von 8,6 g/m²

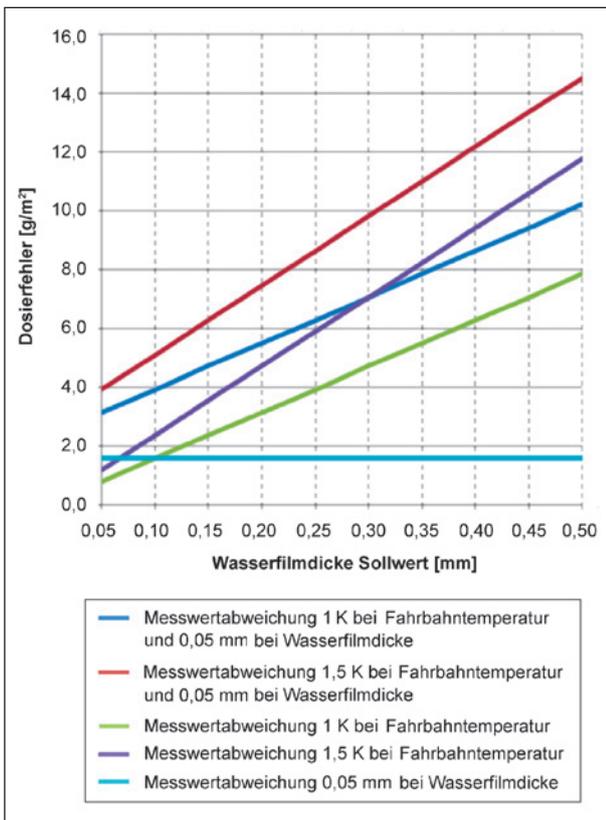


Bild 8-4: Dosierfehler bei unterschiedlichen Messwertabweichungen innerhalb der vorgeschriebenen Werte der Messgenauigkeit (FBT -2 °C ± 1,0 oder 1,5 K; WFD ± 0,05 mm)

## 8.2 Daten der Punktwettervorhersage

### 8.2.1 Fahrbahnzustand

Für den aktuellen Fahrbahnzustand werden im Algorithmus die Daten des MARWIS-Sensors verwendet.

Der prognostizierte Fahrbahnzustand (FBZ<sub>3</sub>) ist ebenfalls Entscheidungsgrundlage für die Streutechnologie. FS100 wird nur empfohlen, wenn trockene, feuchte, nasse Fahrbahn oder Reif zu erwarten sind. Die Sicherheit dieser Prognose ist insofern wichtig für eine optimale Streutechnologie. Außerdem hat der prognostizierte Fahrbahnzustand bei Reif, Schnee und Eis Einfluss auf die Berechnung der Wasserfilmdicke.

Die Auswertung der Daten der Punktwettervorhersage zeigt, dass der eintretende Fahrbahnzustand häufig von dem prognostizierten Fahrbahnzustand abweicht.

Kritisch sind die 37 (Tabelle 8-2) bzw. 26 Fälle (Tabelle 8-3), für die trockene Fahrbahn statt Eis bzw. Schnee vorhergesagt wurden. Das führt nach dem

Code	FBZ DWD
0	trocken
1	feucht
2	nass
3	Reif
4	Schnee
5	Eis

Tab. 8-1: Fahrbahnzustände nach DWD-Code

Prognostizierter Fahrbahnzustand	Eingetretener Fahrbahnzustand	Anzahl der Wertepaare (Stunden)
trocken	trocken	121
trocken	feucht	5
trocken	Eis	28
Schnee	Eis	9
Summe		163

Tab. 8-2: Abweichung vom prognostizierten Fahrbahnzustand für den Standort der SWS Talbrücke Münchenberg in der Zeit vom 26.02.18, 4:00 Uhr und 04.03.18 23:00 Uhr

Prognostizierter Fahrbahnzustand	Eingetretener Fahrbahnzustand	Anzahl der Wertepaare (Stunden)
trocken	trocken	144
trocken	feucht	1
trocken	Eis	16
Schnee	Eis	10
Summe		171

Tab. 8-3: Abweichung vom prognostizierten Fahrbahnzustand für den Standort der SWS Allersberg in der Zeit vom 28.02.18, 1:00 Uhr und 04.03.18 23:00 Uhr

Algorithmus dazu, dass bei den betreffenden Einsatzfahrten auf eine Streuung verzichtet oder unterdosiert wird.

### 8.2.2 Fahrbahntemperatur

Die Fahrbahntemperaturen aus der Punktwettervorhersage gehen nicht direkt in die Berechnung ein. Sie dienen vielmehr dazu, die Temperaturentwicklung im Zeitraum bis zu 3 Stunden in der Berechnung zu verarbeiten. Das heißt, dass für präventive Einsätze eine Berechnungstemperatur ermittelt wird, welche die Temperaturentwicklung der folgenden Stunden berücksichtigt.

Dazu gehen zu jedem Zeitpunkt zwei Temperaturwerte aus der Punktwettervorhersage in die Berechnung ein:

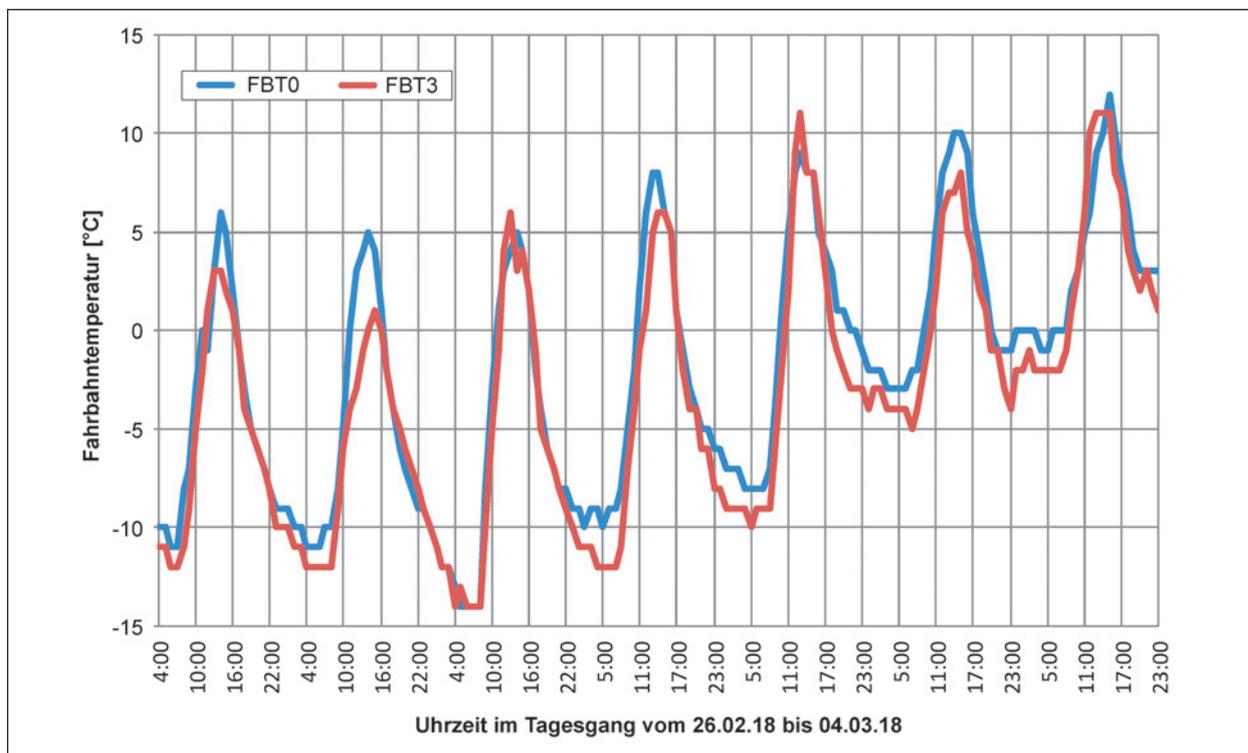


Bild 8-5: Prognostizierte (FBT3) und zur Prognosezeit (FBT0) eingetretene Fahrbahntemperatur in den Tagesgängen einer Woche an der SWS Allersberg (Code P338)

- FBT0 – aktueller Wert der Fahrbahntemperatur der Straßenwetterstation (SWS) im zugeordneten Bereich (aktuell heißt in diesem Fall letzter von der SWS übertragener Wert); die Übertragung erfolgt nur einmal stündlich.
- FBT3 – Prognosewert für die Fahrbahntemperatur in 3 Stunden.

Die tatsächlich eintretende Temperatur sollte möglichst nicht oder nur wenig von der prognostizierten Temperatur abweichen. Negativabweichungen (eingetretene Temperatur < prognostizierte Temperatur) sind besonders problematisch, da sie zur Berechnung einer zu geringen Streudichte führen können.

Die Häufigkeit der Abweichungen bei Temperaturvorhersagen für die Straßenwetterstationen Allersberg (DWD-Kennung P338) und Talbrücke Münchberg (DWD-Kennung P083) sind in Bild 8-6 und Bild 8-7 dargestellt. Dabei wurden nur die Wertepaare verglichen, bei denen die eingetretene Fahrbahntemperatur  $\leq 0$  °C war. Bei positiven Temperaturen gibt es keine negativen Auswirkungen auf die errechnete Dosierung. Problematisch können die Negativabweichungen sein. Das heißt: Die tatsächliche Temperatur nach drei Stunden ist niedriger als die für diesen Zeitpunkt prognostizierte

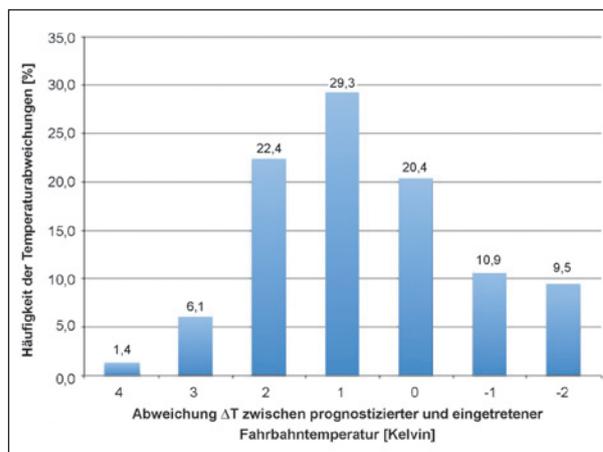


Bild 8-6: Häufigkeit der Differenzen zwischen prognostizierter und nach 3 Stunden eingetretener Temperatur an der SWS Allersberg (Vergleich von 147 Datenpaaren im Zeitraum vom 26.02.2018 bis 04.03.2018)

Temperatur. Dabei erscheint eine Negativabweichung von 1 K als unproblematisch. Unter diesem Aspekt sind 90,5 % bzw. 92 % der Temperaturprognosen sehr gut für die Berechnung der Streudichte geeignet. Die gelegentlich auftretende Differenz von 2 K kann immer noch als akzeptabel angesehen werden.

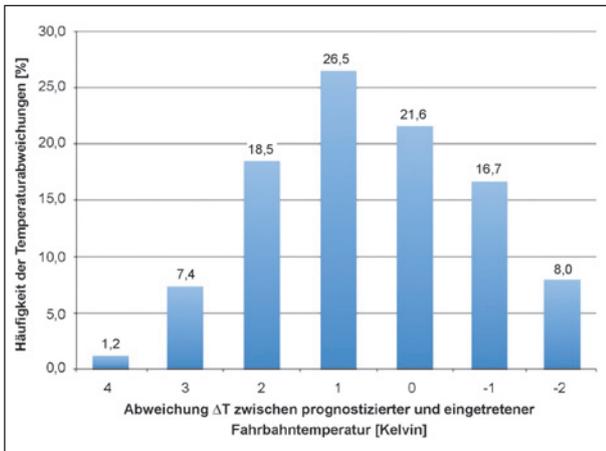


Bild 8-7: Häufigkeit der Differenzen zwischen prognostizierter und nach 3 Stunden eingetretener Temperatur an der SWS Talbrücke Münchberg (Vergleich von 162 Datenpaaren im Zeitraum vom 26.02.2018 bis 04.03.2018)

Prognostizierte Niederschlagsart	Eingetretene Niederschlagsart	Anzahl der Wertepaare
kein Niederschlag	kein Niederschlag	32
kein Niederschlag	Regen	3
kein Niederschlag	Schnee	10
Schnee	kein Niederschlag	9
Schnee	Regen	1
Schnee	Schnee	18

Tab. 8-4: Talbrücke Münchberg KW 05/18 28.01.18 bis 04.02.18 bei Temperaturen  $\leq 0$  °C

### 8.2.3 Niederschlagsmenge

In der Punktwettervorhersage wird die stündliche Niederschlagsmenge für die folgenden Stunden in mm/h angegeben. Die 3-Stunden-Summe dieser Werte geht bei Schneeniederschlag und Eisregen in die Berechnung der optimalen Streudichte ein.

Bild 8-8 zeigt einen Vergleich zwischen prognostizierten und eingetretenen Niederschlagsmengen für den Standort einer SWS. Verglichen werden die Vorhersagen der Niederschlagsmengen und die gefallenen Niederschlagsmengen für einen Zeitraum von 3 Stunden. Der Verlauf der Linien im Diagramm zeigt eine starke Ähnlichkeit. Zu einzelnen Zeitpunkten treten jedoch deutliche Abweichungen auf. Da der Fall nicht ausgeschlossen werden kann, dass kein Niederschlag und somit auch keine Niederschlagsmengen prognostiziert werden und dann doch Niederschlag auftritt, ist es problematisch, diese Vorhersagen im Algorithmus zu verarbeiten (siehe auch Tabelle 8.4).

### 8.2.4 Niederschlagsart

Die Prognose der Niederschlagsart geht nicht direkt in den Algorithmus ein. Sie hat aber direkten Einfluss auf den prognostizierten Fahrbahnzustand. Somit besteht ein Einfluss auf den Streumodus

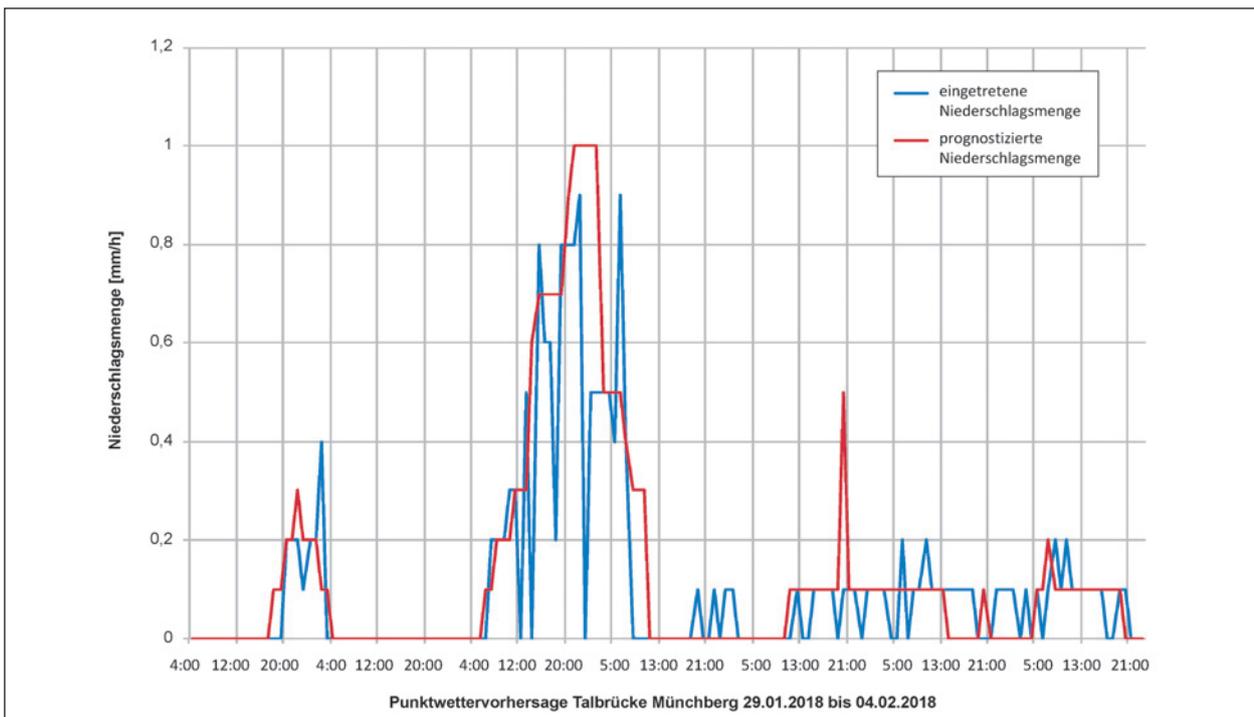


Bild 8-8: Prognostizierte und eingetretene Niederschlagsmengen in der Kalenderwoche 05/2018 an der Talbrücke Münchberg

(kurativ, präventiv), die Streutechnologie (FS30, FS100) und den Rechenwert für die Wasserfilmdicke.

## 8.3 MARWIS-Daten

### 8.3.1 Fahrbahnzustand

Der MARWIS-Sensor ermittelt Daten zur Bestimmung des aktuellen Fahrbahnzustandes. Diese Statusinformation geht in den Algorithmus als Fahrbahnzustand am Einsatzfahrzeug (FBZ<sub>E</sub>) ein. Die Information hat Einfluss auf den Streumodus (präventiv, kurativ) und auf die Streutechnologie (FS30, FS100). Unter anderem wird FS100 nur dann empfohlen, wenn der Fahrbahnzustand in der Punktewettervorhersage für den Zeitpunkt 0 mit trocken, feucht oder nass angegeben ist. Es ist also von wesentlicher Bedeutung, ob diese drei Fahrbahnzustände in sicherer Abgrenzung von den übrigen Fahrbahnzuständen (Reif, Schnee, Eis) ermittelt worden sind.

Darüber hinaus hat der durch den MARWIS-Sensor ermittelte Fahrbahnzustand Einfluss auf die Berechnung der Wasserfilmdicke bei Schneefall.

In Tabelle 8-5 sind die ermittelten Kategorien des Fahrbahnzustands aufgelistet.

Der Fahrbahnzustand „schnee-/eisbedeckt“ ist zu undifferenziert für die Dosierungssteuerung. Schnee bzw. Eis gehen im Algorithmus sehr unterschiedlich in die Berechnung ein. Es muss klar zwischen diesen beiden Zuständen unterschieden sein.

Zur Überprüfung der Funktion der Fahrbahnzustandserkennung wurden mehrere Testfahrten durchgeführt. Dabei wurde der Fahrbahnzustand mit einer Frontkamera dokumentiert und nach Au-

Kennung	FBZ MARWIS
0	trocken
1	feucht
2	nass
3	eisbedeckt
4	schnee-/eisbedeckt
5	chemisch nass
6	kritisch nass
8	schneebedeckt
99	undefiniert

Tab. 8-5: Fahrbahnzustände (FBZ) nach MARWIS-Code

genschein ausgewertet. Das ermöglichte einen Vergleich der Daten. Beispielhaft werden nachfolgend einige Fahrten dokumentiert.

#### Datum: 02.01.2017

- Uhrzeit: 07:48 bis 09:10 UTC,
- Maximaltemperatur: -0,2 °C,
- Minimaltemperatur: -4,4 °C,
- Streckencharakteristik:
  - 07:48 UTC bis 07:50 UTC Kommunalstraße, Höhenlage 267 bis 260 m,
  - 07:50 UTC bis 07:55 UTC Bundesstraße, Höhenlage 260 bis 210 m,
  - 07:55 UTC bis 08:12 UTC Autobahn, Höhenlage 210 bis 502 m,
  - 08:12 UTC bis 08:58 UTC Landesstraße, Höhenlage 502 bis 383 m,
  - 08:58 UTC bis 09:08 UTC Bundesstraße, 383 bis 284 m,
  - 09:08: UTC bis 09:09: UTC Kommunalstraße, Höhenlage 284 bis 267 m.

Der Straßenzustand ist in der Kartendarstellung als Farbcode dargestellt (Tabelle 8-6).

Vom MARWIS-Sensor werden 60 Werte pro Minute ausgegeben. Bei den Filmaufnahmen (rote Linie) gibt es aus technischen Gründen zwei zeitliche Lücken. Über den gesamten Zeitraum sind somit 4.277 Datensätze des MARWIS-Sensors im Vergleich mit den Filmaufnahmen auswertbar. Die Ergebnisse der Auswertung sind in Tabelle 8-7 und Tabelle 8-8 dargestellt.

trocken	0	
feucht	1	
nass	2	
eisbedeckt	3	
schnee-/eisbedeckt	4	
chemisch nass	5	
kritisch nass	6	
schneebedeckt	8	
undefiniert	99	

Tab. 8-6: Farbcode in der Darstellung der MARWIS-Map

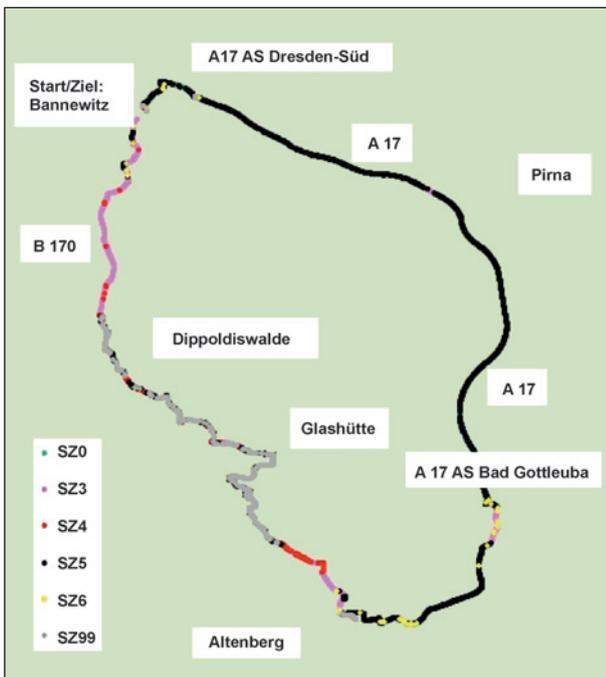


Bild 8-9: Fahrtverlauf am 02.01.2017

	Zahl der Datensätze	Anteil/%
Gesamt	4.277	100
MARWIS = Film	1.783	41,7
MARWIS „undefiniert“	1.011	23,6
MARWIS ≠ Film	1.483	34,7

Tab. 8-7: Vergleich der vom MARWIS-Sensor und der augenscheinlich ermittelten Fahrbahnzustände auf der Gesamtstrecke

Aus Tabelle 8-7 ist zu entnehmen, dass auf der Gesamtstrecke der Fahrbahnzustand nur bei 41,7 % der Zeitanteile richtig erkannt wurde. Insbesondere auf den Staats- und Kommunalstraßen waren auf vielen Abschnitten häufig wechselnde Fahrbahnzustände vorhanden, die auch bei der augenscheinlichen Beurteilung schwer zuzuordnen waren.

Bei abweichenden Fahrbahnzuständen wurde die Anzahl von Datensätzen in den einzelnen Kombinationen festgestellt (Tabelle 8-8).

In der detaillierten Auswertung in Tabelle 8-8 zeigt sich, dass insbesondere Fahrbahnen mit Schneeresten oft als eisbedeckt erfasst wurden. Auch auf feuchten Fahrbahnen wurde bei Minustemperaturen oft eine Eisbedeckung angenommen. Gelegentlich wurde eine Fahrbahn mit deutlichen Schneeresten auch als chemisch nass detektiert. Das sind Fälle, die auch in der augenscheinlichen Beurteilung als grenzwertig anzusehen waren. Nur in wenigen Fällen erfolgte eine Fehldetektierung, die ein Sicherheitsrisiko darstellen könnte (z. B. chemisch nass statt schnee-/eisbedeckt).

Der Fahrbahnzustand war auf dem befahrenen Autobahnabschnitt nach augenscheinlicher Beurteilung als „chemisch nass“ absolut konstant. Das wurde auch vom MARWIS-Sensor zu 92 % erkannt (Tabelle 8-9 und Tabelle 8-10).

Die festgestellten Abweichungen waren nicht sicherheitsrelevant.

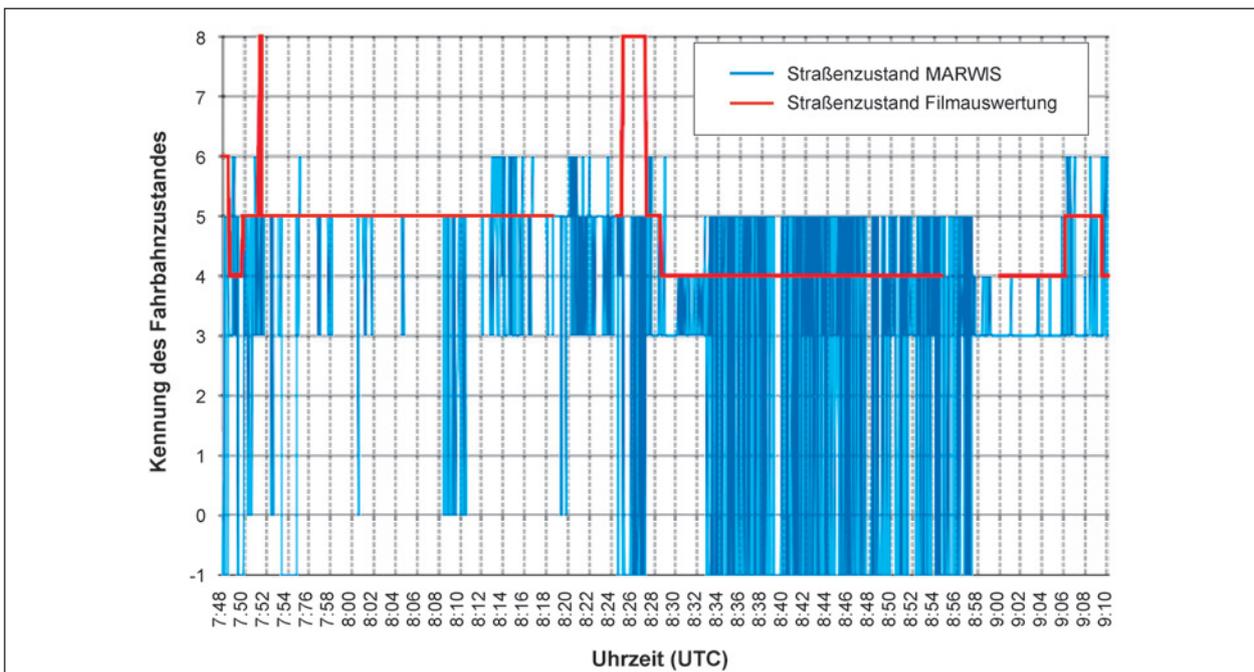


Bild 8-10: Testfahrt am 02.01.2017 – Vergleich des Straßenzustandes nach MARWIS-Aufzeichnungen und augenscheinlicher Filmauswertung – Die Kennung „undefiniert“ wird aus Gründen der übersichtlichen Darstellung mit -1 statt 99 angenommen

FBZ MARWIS	FBZ augenscheinlich	Anzahl der abweichenden Fahrbahnzustände
0 – trocken	5 – chemisch nass	55
3 – eisbedeckt	4 – schnee-/eisbedeckt	664
3 – eisbedeckt	5 – chemisch nass	408
3 – eisbedeckt	8 – schneebedeckt	11
5 – chemisch nass	4 – schnee-/eisbedeckt	312
5 – chemisch nass	8 – schneebedeckt	31

Tab. 8-8: Auswertung der abweichend festgestellten Fahrbahnzustände für die Gesamtstrecke

FBZ MARWIS	FBZ augenscheinlich	Anzahl der abweichenden Fahrbahnzustände
0 – trocken	5 – chemisch nass	29
3 – eisbedeckt	5 – chemisch nass	50

Tab. 8-9: Auswertung der am 02.01.17 abweichend festgestellten Fahrbahnzustände für den Autobahnanteil der Gesamtstrecke

	Zahl der Datensätze	Anteil/%
Gesamt	1.052	100
MARWIS = Film	969	92,0
MARWIS „undefiniert“	4	0,4
MARWIS ≠ Film	79	7,6

Tab. 8-10: Auswertung der am 02.01.17 festgestellten Fahrbahnzustände für den Autobahnanteil der Gesamtstrecke

**Datum: 03.01.2017**

- Uhrzeit: 07:32 bis 09:00 UTC,
- Maximaltemperatur: 0,3 °C,
- Minimaltemperatur: -4,2 °C,
- Streckencharakteristik:
  - 07:32 UTC bis 07:33 UTC Kommunalstraße, Höhenlage 267 bis 260 m,
  - 07:33 UTC bis 07:36 UTC Bundesstraße, Höhenlage 260 bis 210 m,
  - 07:36 UTC bis 07:55 UTC Autobahn, Höhenlage 210 bis 502 m,
  - 07:55 UTC bis 08:35 UTC Landesstraße, Höhenlage 502 bis 383 m,
  - 08:35 UTC bis 08:58 UTC Bundesstraße, 383 bis 284 m,
  - 08:58: UTC bis 09:00 UTC Kommunalstraße, Höhenlage 284 bis 267 m.

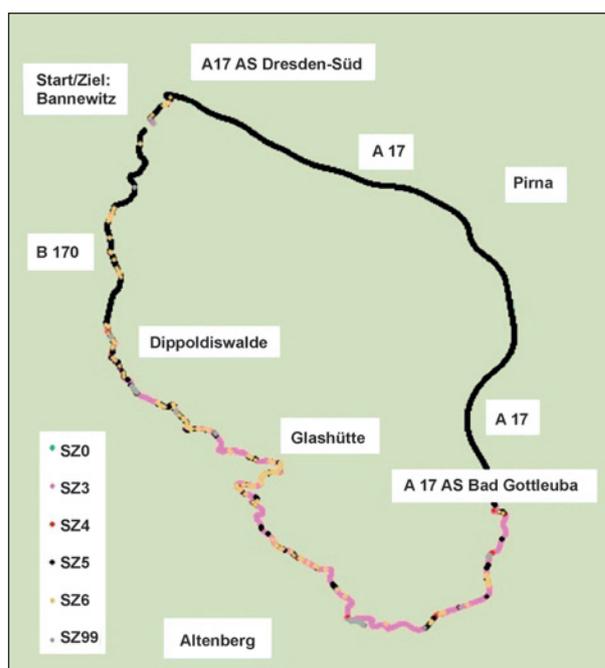


Bild 8-11: Fahrtverlauf am 03.01.2017

Aus Tabelle 8-11 ist zu entnehmen, dass auf der Gesamtstrecke der Fahrbahnzustand bei nur 46,5 % der Zeitanteile richtig erkannt wurde. Auch an diesem Tag waren auf den Staats- und Kommunalstraßen auf vielen Abschnitten wechselnde Fahrbahnzustände vorhanden.

Bei der detaillierten Betrachtung der Abweichungen kann festgestellt werden, dass nur in drei kurzen Zeiträumen von je 2 Sekunden eine sicherheitsrelevante Abweichung zu verzeichnen war. Das bewegt sich im Rahmen der Reaktionszeit des Sensors und ist als unproblematisch anzusehen.

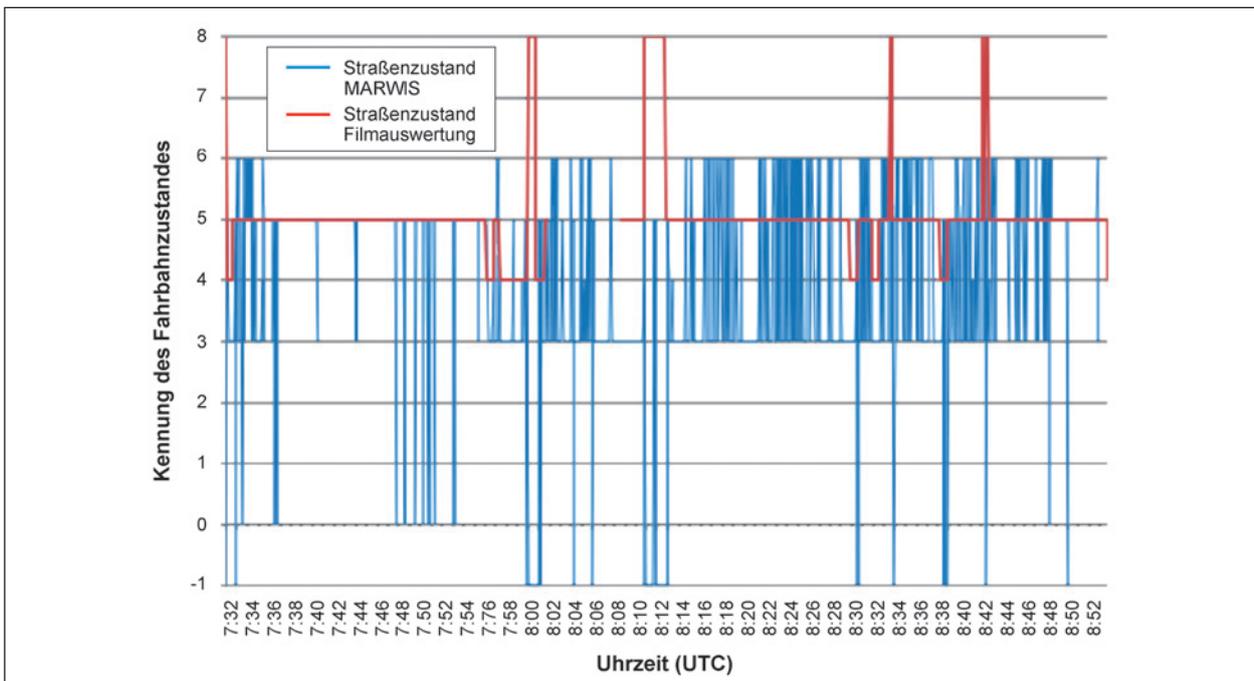


Bild 8-12: Testfahrt am 03.01.2017 – Vergleich des Straßenzustandes nach MARWIS-Aufzeichnungen und augenscheinlicher Filmauswertung – Die Kennung „undefiniert“ wird aus Gründen der übersichtlichen Darstellung mit -1 statt 99 angenommen

	Zahl der Datensätze	Anteil/%
Gesamt	4.501	100
MARWIS = Film	2.093	46,5
MARWIS „undefiniert“	253	5,6
MARWIS ≠ Film	2.155	47,9

Tab. 8-11: Vergleich der vom MARWIS-Sensor und der am 03.01.2017 augenscheinlich ermittelten Fahrbahnzustände auf der Gesamtstrecke

	Zahl der Datensätze	Anteil/%
Gesamt	1.200	100
MARWIS = Film	1.161	96,8
MARWIS „undefiniert“	0	0,0
MARWIS ≠ Film	39	3,2

Tab. 8-14: Auswertung der am 03.01.17 festgestellten Fahrbahnzustände für den Autobahnanteil der Gesamtstrecke

FBZ MARWIS	FBZ augenscheinlich	Anzahl der abweichenden Fahrbahnzustände
0 – trocken	5 – chemisch nass	33
3 – eisbedeckt	4 – schnee-/eisbedeckt	313
3 – eisbedeckt	5 – chemisch nass	1.349
3 – eisbedeckt	8 – schneebedeckt	5
4 – schnee-eisbedeckt	5 – chemisch nass	17
4 – schnee-eisbedeckt	8 – schneebedeckt	2
5 – chemisch nass	4 – schnee-/eisbedeckt	31
5 – chemisch nass	8 – schneebedeckt	36
6 – kritisch nass	5 – chemisch nass	363
6 – kritisch nass	8 – schneebedeckt	6

Tab. 8-12: Auswertung der am 03.01.17 abweichend festgestellten Fahrbahnzustände für die Gesamtstrecke

FBZ MARWIS	FBZ augenscheinlich	Anzahl der abweichenden Fahrbahnzustände
0 – trocken	5 – chemisch nass	28
3 – eisbedeckt	5 – chemisch nass	11

Tab. 8-13: Auswertung der am 03.01.17 abweichend festgestellten Fahrbahnzustände für den Autobahnanteil der Gesamtstrecke

Auf dem Autobahnabschnitt mit stabilen Fahrbahnverhältnissen ist eine sehr hohe Übereinstimmung von 96,8 % zwischen Sensor und augenscheinlicher Beurteilung festzustellen (Tabelle 8-14).

Die Abweichungen waren nicht sicherheitsrelevant.

### 8.3.2 Fahrbahntemperatur

Für die Verifizierung der vom MARWIS-Sensor gemessenen Fahrbahntemperatur können die Temperaturangaben der Bodensensoren bei Überfahrt des Einsatzfahrzeuges und die Temperaturmessungen mit dem parallel angeschlossenen Pyrometern der temperaturabhängigen Dosierung verwendet werden.

Aus dem Diagramm (Bild 8-13) wird eine erhebliche Differenz der gemessenen Temperaturen deutlich. Im Durchschnitt werden vom MARWIS-Sensor in dieser Zeit um 3,07 K höhere Temperaturen gemessen.

Auch an weiteren ausgewerteten Tagen bewegt sich die Temperaturdifferenz in dieser Größenordnung (Tabelle 8-15). Die in der Tabelle aufgeführten Werte der Punktwettervorhersage werden maximal 1 h vor der Überfahrt des Einsatzfahrzeuges kreiert und sind nur als grobe Orientierung anzusehen.

Aus Bild 8-14 ist zu entnehmen, dass sich die Temperaturdifferenz bei niedrigen Temperaturen erhöht.

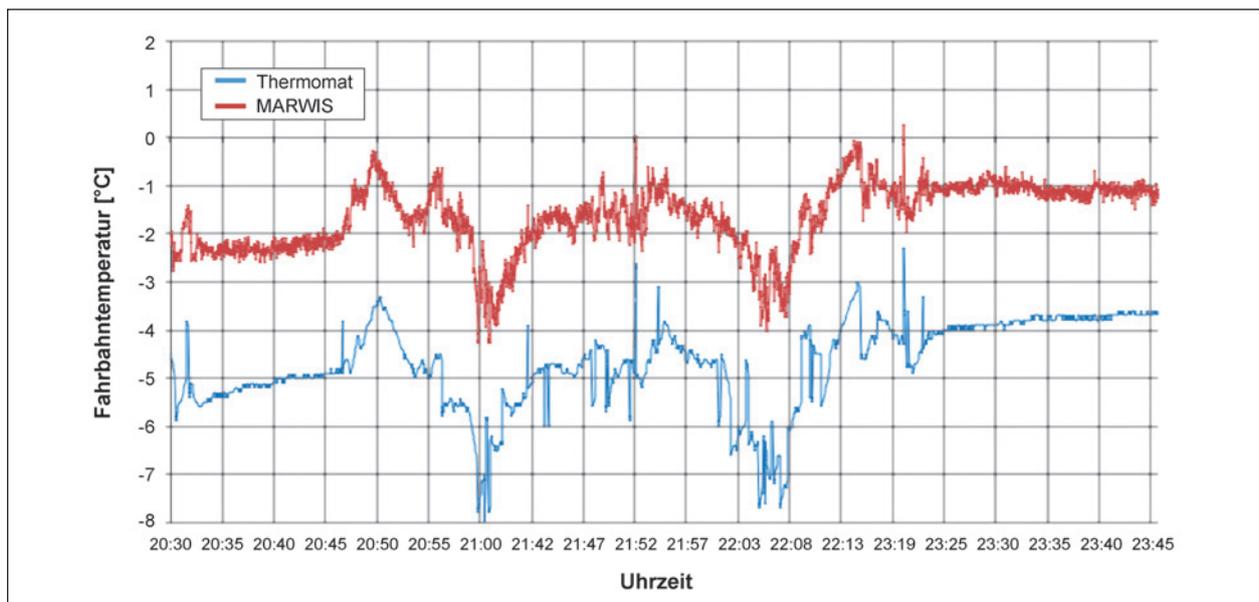


Bild 8-13: Vergleich der gemessenen Temperaturen bei einer Einsatzfahrt am 17.01.2017 im Bereich der Autobahnmeisterei Greding

Datum	von	bis	Mittelwert FBT <sub>E</sub> [°C]	Zahl der Messwerte FBT <sub>E</sub>	Mittelwert FBT <sub>EEEx</sub> [°C]	Zahl der Messwerte FBT <sub>EEEx</sub>	Mittelwert FBT <sub>0</sub> [°C]	$\Delta T$ (Mittelwert FBT <sub>E</sub> – Mittelwert FBT <sub>EEEx</sub> ) [°C]
16.01.17	09:29	23:51	1,60	10.518	-0,96	5.189	-3,13	2,56
17.01.17	20:29	23:49	-1,60	5.979	-4,67	3.139	-6,44	3,07
18.01.17	07:11	08:26	-0,23	3.928	-2,95	2.011	-9,37	2,72
19.01.17	07:10	08:12	-5,53	3.720	-9,71	1.839	-11,00	4,18
20.01.17	07:04	08:19	-5,00	4.403	-8,59	2.203	-12,00	3,59
21.01.17	03:55	08:34	-5,31	16.467	-9,13	8.238	-10,77	3,82

Tab. 8-15: Temperaturabweichungen zwischen MARWIS (FBT<sub>E</sub>) und Thermomat (FBT<sub>EEEx</sub>). Zum Vergleich Temperaturwert FBT<sub>0</sub> aus der Punktwettervorhersage für den Autobahnabschnitt

Einen kleinen Einfluss auf die Temperaturdifferenz könnte die unterschiedliche Lage des Messfleckes der beiden Systeme auf der Fahrbahn haben. Der MARWIS-Sensor ist linksseitig am Fahrzeug und das Pyrometer des Thermomat ist rechtsseitig am Fahrzeug angebracht. Daraus könnte unter bestimmten Bedingungen eine Temperaturdifferenz von 1 K entstehen.

Mit Beginn der Winterdienstsaison 2017/18 waren das Pyrometer des Thermomat-Systems und der MARWIS-Sensor an dem Fahrzeug der Autobahnmeisterei Greding neu justiert. Eine beispielhafte Auswertung der Temperaturaufzeichnungen im Ver-

gleich beider Systeme zeigte deutlich geringere Abweichungen als in der Vorsaison.

Die durchschnittliche Abweichung der Temperaturmesswerte beträgt nur 0,45 K (Bild 8-15). Das ist ein Wert, der sich gut mit der abweichenden Anbringung der Messsysteme am Fahrzeug erklären lässt und der als Messabweichung für die Einbringung des Temperaturwertes in den Dosieralgorithmus auch akzeptabel ist. Tendenziell waren die vom MARWIS gemessenen Temperaturwerte auch wieder höher als die Werte der Thermomatsteuerung.

Das Einsatzfahrzeug der AM Münchberg ist mit einer Thermologic-Steuerung der Fima Aebi Schmidt ausgestattet. Die Messwerte des dort installierten Pyrometers können ebenfalls mit den Werten des MARWIS-Sensors verglichen werden.

Die Abweichung der Temperatur beträgt während der in Bild 8-16 dargestellten Einsatzzeit im Durchschnitt 0,8 K. Die vom MARWIS gemessenen Temperaturwerte waren niedriger als die Werte der Thermologic-Steuerung.

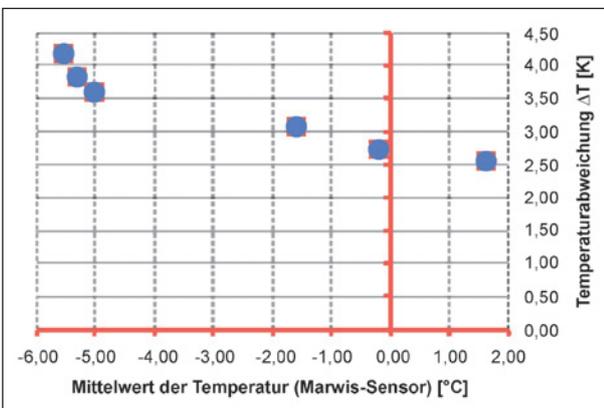


Bild 8-14: Temperaturabweichungen in Abhängigkeit von der mit dem MARWIS-Sensor gemessenen Temperatur

### 8.3.3 Wasserfilmdicke

Die Wasserfilmdicke wird vom MARWIS-Sensor optisch in einem Messbereich von 0 – 6 mm gemes-

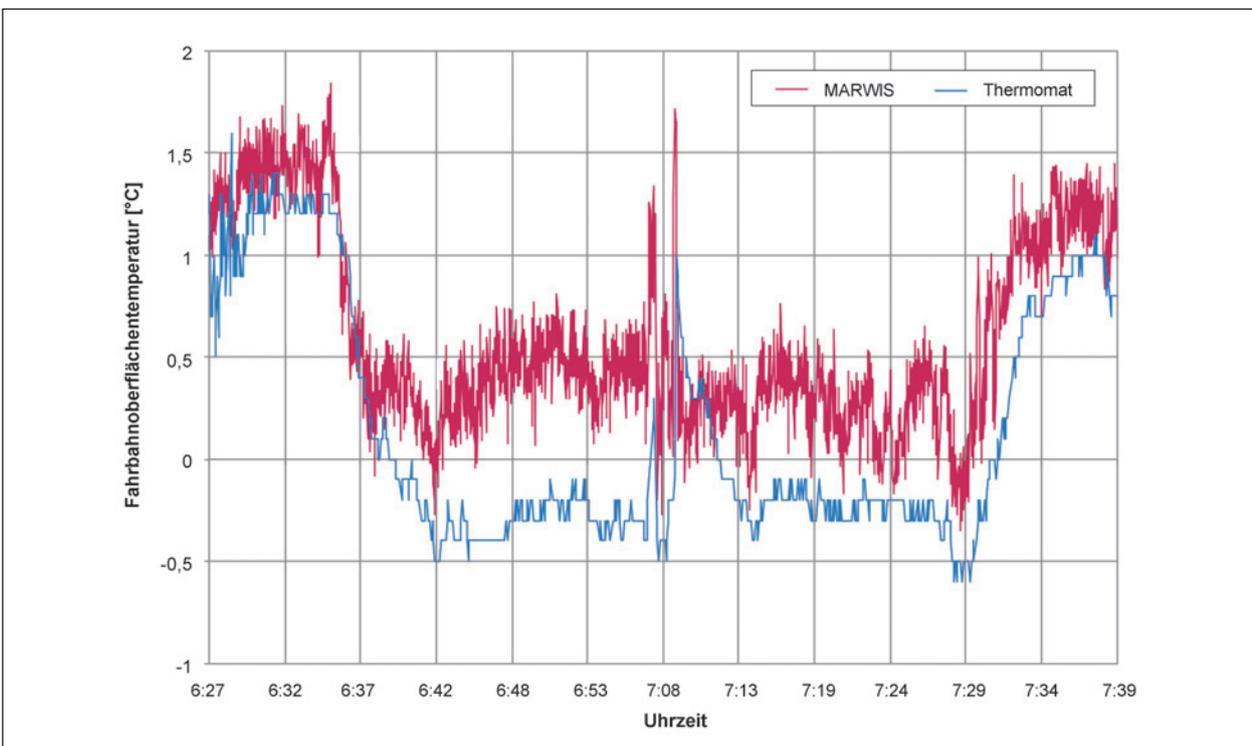


Bild 8-15: Vergleich der gemessenen Temperaturen bei einer Einsatzfahrt am 18.01.2018 im Bereich der Autobahnmeisterei Greding

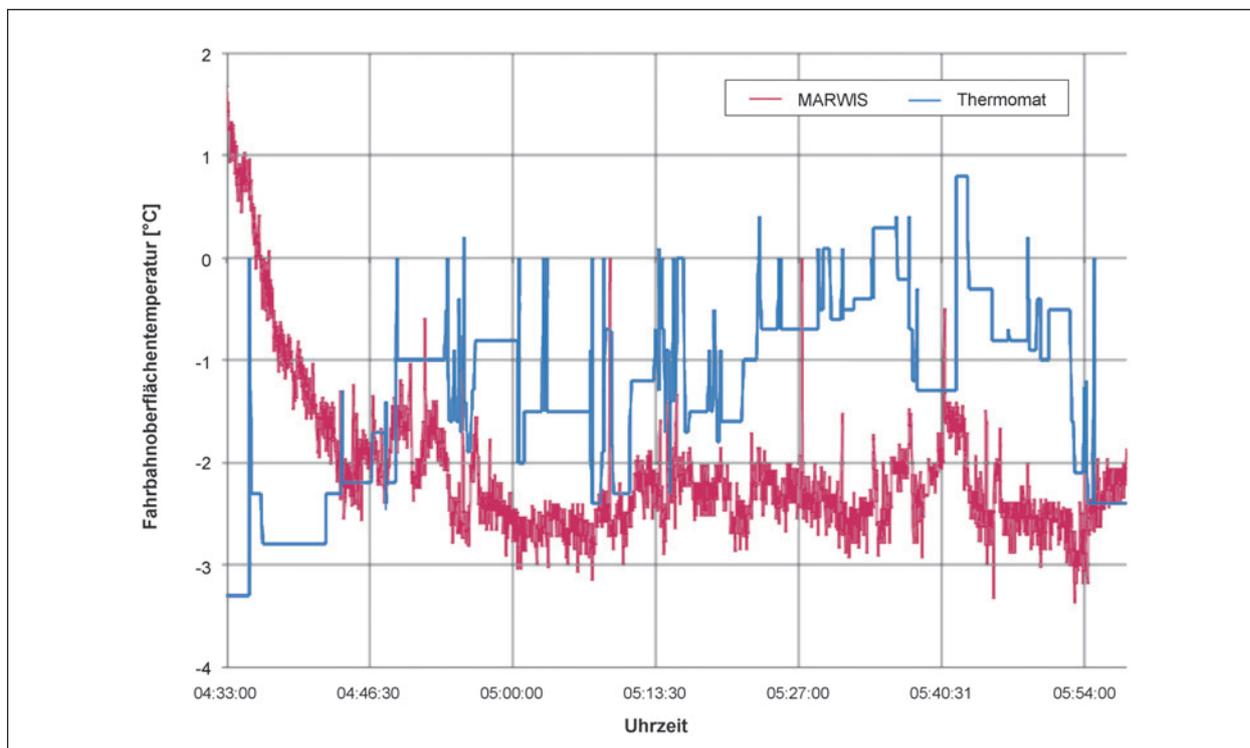


Bild 8-16: Vergleich der gemessenen Temperaturen bei einer Einsatzfahrt am 19.01.2018 im Bereich der Autobahnmeisterei Münchberg

sen. Die Auflösung beträgt 1  $\mu\text{m}$ . Angegeben wird der Anteil des flüssigen Wassers:

- Wasserfilm Feuchte – Schwelle: 10  $\mu\text{m}$ ,
- Wasserfilm Nass – Schwelle: 100  $\mu\text{m}$  (Werkseinstellung).

Aus fast allen vorliegenden Datenaufzeichnungen ist zu entnehmen, dass die gemessene Wasserfilmdicke sehr stark schwankt.

Bei einer Einsatzfahrt der AM Greding wurden am 16.01.2017 die in Bild 8-17 dargestellten Werte gemessen.

Die gemessene Wasserfilmdicke hat auch Einfluss auf die Ermittlung des Fahrbahnzustandes.

In der Bedienanleitung des MARWIS-Sensors ist dazu Folgendes ausgeführt:

- trocken  
Auf der Fahrbahn befindet sich kein flüssiges Wasser; die Wasserfilmdicke<sup>2</sup> liegt unterhalb der Feuchte-Schwelle.
- feucht  
Auf der Fahrbahn befindet sich flüssiges Wasser; die Wasserfilmdicke liegt unterhalb der Nass-Schwelle.

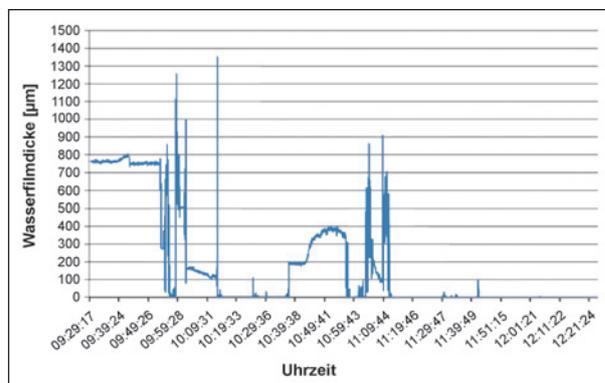


Bild 8-17: Gemessene Wasserfilmdicke bei einer Einsatzfahrt am AM Greding 16.01.2017

- nass  
Auf der Fahrbahn befindet sich flüssiges Wasser; die Wasserfilmdicke liegt auf oder über der Nass-Schwelle.
- eisbedeckt  
Auf der Fahrbahn befindet sich gefrorenes Wasser überwiegend in Form von Eis.

<sup>2</sup> In der Bedienungsanleitung des MARWIS Sensors wird der Begriff „Wasserfilmdicke“ benutzt. Die DIN EN 15518-3 spricht von „Wasserfilmdicke“. Dieser Begriff wird im Bericht ansonsten verwendet.

- schnee-/eisbedeckt  
Auf der Fahrbahn befindet sich gefrorenes Wasser, entweder in Form von Eis oder Schnee; eine genauere Differenzierung ist nicht möglich.
- chemisch nass  
Die Wasserfilmdicke liegt auf oder über der Feuchte-Schwelle und die Fahrbahntemperatur ist unter 1,5 °C; die Eisbildung wird durch den Einsatz von Taumitteln verhindert.
- kritisch nass  
Die Wasserfilmdicke liegt auf oder über der Feuchte-Schwelle und die Fahrbahntemperatur liegt unter 1,5 °C, bei einsetzender Eisbildung.
- schneebedeckt  
Auf der Fahrbahn befindet sich gefrorenes Wasser überwiegend in Form von Schnee.

Die Rückverfolgung der Wasserfilmdicke, ausgehend von dem ermittelten Fahrbahnzustand brachte für die Einsatzfahrt am 16.01.2017 im Einzelnen die in Bild 8-18 bis Bild 8-23 dargestellten Ergebnisse.

#### Fahrbahnzustand „trocken“ (Bild 18)

In wenigen kurzzeitigen Einzelfällen wurden Wasserfilmdicken gemessen, die über der in der Betriebsanleitung angegebenen Feuchte-Schwelle von 10 µm liegen. Möglicherweise hat das mit der Verarbeitungsgeschwindigkeit der Daten im MARWIS-Sensor zu tun. Diese Abweichungen stellen grundsätzlich kein Problem dar.

#### Fahrbahnzustand „feucht“ (Bild 19)

Die Wasserfilmdicken liegen ausnahmslos über der Feuchte-Schwelle. Sie liegen allerdings fast durchgängig auch über der Nass-Schwelle von 100 µm. Zwischen den Fahrbahnzuständen „feucht“ und „nass“ wird in der weiteren Verarbeitung der Daten im Algorithmus nicht unterschieden. Entscheidend ist der gemessene Wert für die Wasserfilmdicke. Insofern bereitet auch diese Abweichung keine Probleme.

#### Fahrbahnzustand „nass“ (Bild 20)

Der Fahrbahnzustand „nass“ wurde bei Wasserfilmdicken zwischen 400 und 650 µm angezeigt. Derartige Wasserfilmdicken stellen sich auf Fahr-

bahnen mit Autobahnverkehr nur bei starken Niederschlägen ein. Aus den Ortungsdaten ist zu entnehmen, dass diese Wasserfilmdicken auf dem Betriebshof der Autobahnmeisterei Greding und auf dem Parkplatz Göggelsbuch gemessen wurden. Auf den Hauptfahrbahnen wurde der Fahrbahnzustand „nass“ bei diesem Einsatz nicht angezeigt.

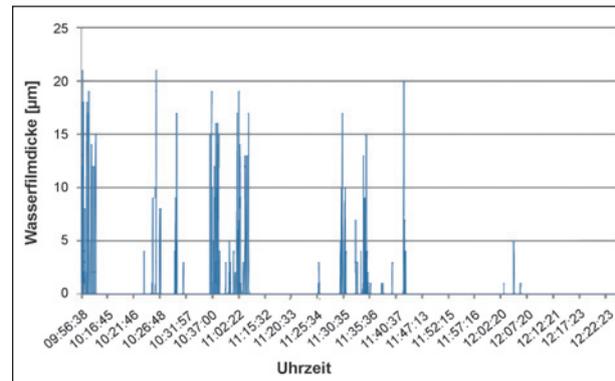


Bild 8-18: Beim Fahrbahnzustand „trocken“ gemessene Wasserfilmdicken

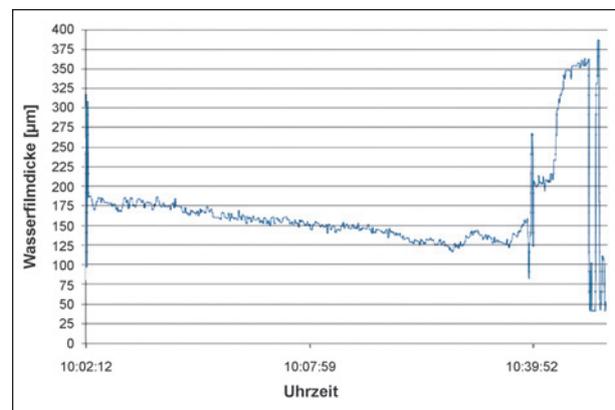


Bild 8-19: Beim Fahrbahnzustand „feucht“ gemessene Wasserfilmdicken

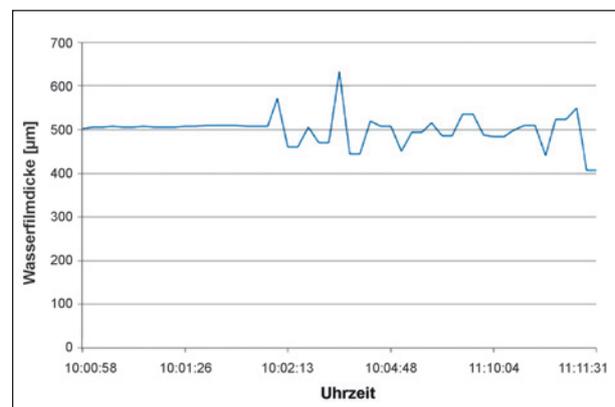


Bild 8-20: Beim Fahrbahnzustand „nass“ gemessene Wasserfilmdicken

### Fahrbahnzustand „eisbedeckt“ (Bild 21)

Der Fahrbahnzustand „eisbedeckt“ wurde ebenfalls lediglich auf dem Betriebshof der Autobahnmeisterei Greding und auf dem Parkplatz „Göggelsbuch“ angetroffen. Auf dem Parkplatz wurden sehr stark wechselnde Wasserfilmdicken gemessen.

### Fahrbahnzustand „schnee-/eisbedeckt“ (Bild 22)

Der Fahrbahnzustand „schnee-/eisbedeckt“ wurde auch auf dem Betriebshof der Autobahnmeisterei Greding und auf dem Parkplatz „Göggelsbuch“ angetroffen. Auf dem Parkplatz wurden sehr stark wechselnde Wasserfilmdicken gemessen.

### Fahrbahnzustand „chemisch nass“ (Bild 23)

Beim Fahrbahnzustand „chemisch nass“ wurden überwiegend Wasserfilmdicken von 200 bis 400  $\mu\text{m}$  gemessen. Dieser Fahrbahnzustand trat nur auf einem Teil der Hauptfahrbahn auf.

Die Fahrbahnzustände „kritisch nass“ und „schneebedeckt“ traten im gesamten Erprobungszeitraum auf keiner der Strecken auf.

Die Erkenntnisse aus der Winterdienstsaison 2016/17 wurden zum Anlass genommen, das Thema Messung der Wasserfilmdicke etwas ausführlicher zu untersuchen. Dazu wurden Informationen aus der Fachliteratur recherchiert und eigene Messungen durchgeführt.

In die Berechnung der Streudichte gehen die während der Fahrt gemessenen Wasserfilmdicken ein. Die Messgenauigkeit des betreffenden Sensors kann nur mit aufwändigen Verfahren unter statischen Bedingungen überprüft werden. Es wäre ein standardisiertes Verfahren zur Überprüfung der Messgenauigkeit der Sensorik für die Wasserfilmdicke notwendig, das ohne großen Aufwand durchzuführen ist.

In einem Vortrag von WAHLIN, der 2016 auf der Sirwec Konferenz in Colorado gehalten wurde, wurden Ergebnisse von Labormessungen gezeigt, aus denen hervorgeht, dass beim MARWIS-Sensor mit Messabweichungen von 40 – 60 % bei der Wasserfilmdicke gerechnet werden muss (Bild 8-24).

Die Messungen von WAHLIN fanden auf Asphalt statt. Bei Variationen der Messungen wurde außerdem festgestellt, dass die Farbe des Belages einen gravierenden Einfluss auf die Messwerte hat. Nach

WAHLIN vergrößerte sich der Messfehler beim Übergang von grauem auf schwarzen Asphalt ganz erheblich.

WAHLIN kommt zu dem Schluss, dass wegen der großen Spanne auftretender Wasserfilmdicken und mangels Alternativen die großen Messabweichungen der berührungslosen Sensoren momentan hingenommen werden müssen.

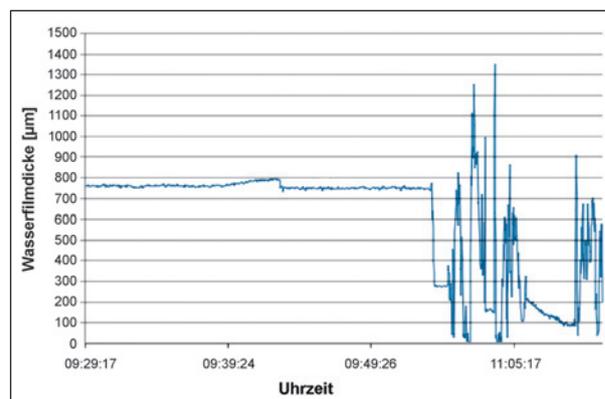


Bild 8-21: Beim Fahrbahnzustand „eisbedeckt“ gemessene Wasserfilmdicken

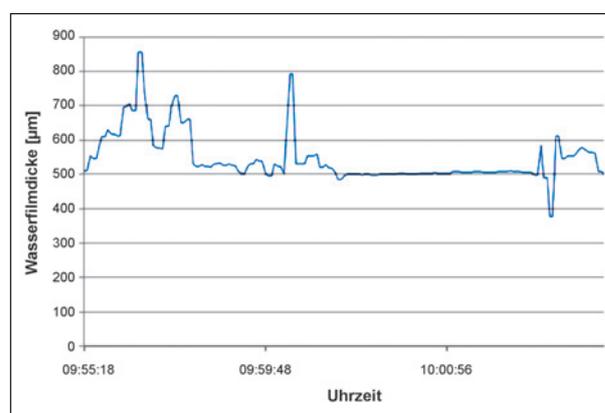


Bild 8-22: Beim Fahrbahnzustand „schnee-/eisbedeckt“ gemessene Wasserfilmdicken

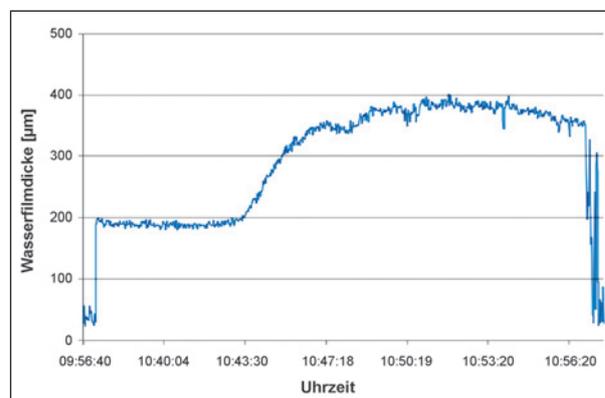


Bild 8-23: Beim Fahrbahnzustand „chemisch nass“ gemessene Wasserfilmdicken

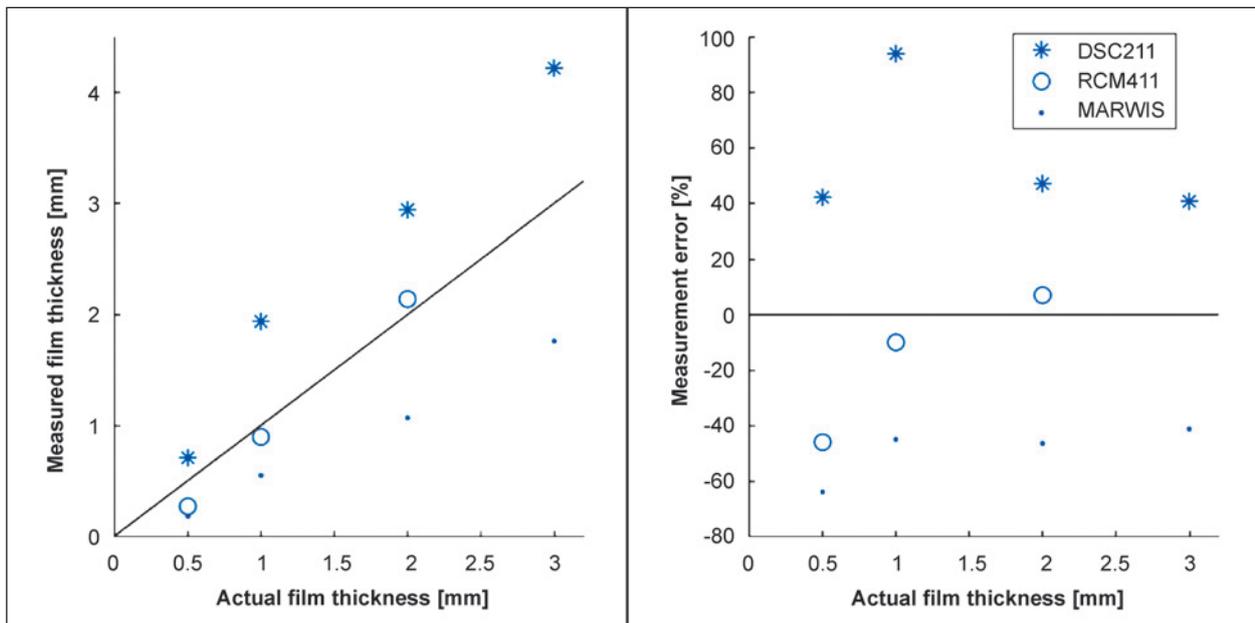


Bild 8-24: Fehler bei der Messung der Wasserfilmdicke mit unterschiedlichen berührungslosen Sensoren (Belag aus grauem Asphalt) WAHLIN 2016

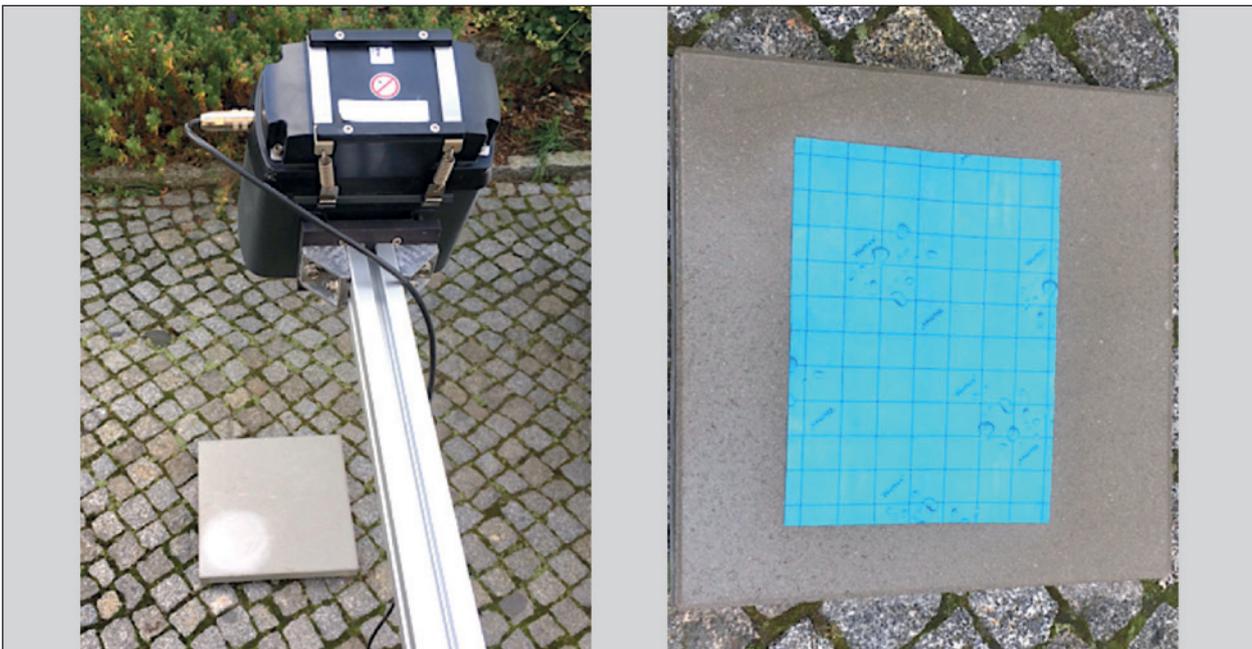


Bild 8-25: Anordnung des MARWIS-Sensors und des Wettex-Tuches

Eine Möglichkeit, die vom MARWIS-Sensor ermittelten Werte für die Wasserfilmdicke zu verifizieren, ist mit dem sogenannten „Wettex“-Test möglich.

Für den „Wettex“-Test wurde der MARWIS-Sensor über einer Betonplatte mit 50 x 50 cm Grundfläche positioniert. Die Messdistanz betrug 2,05 m. Dabei ist von einem Durchmesser des Messfleckes von ca. 20 cm auszugehen.

Die Betonplatte wurde mittels eines Lasers so ausgerichtet, dass sich der Messfleck in der Mitte be-

findet. Die mittlere Rautiefe der Betonplatte wurde mit der Sandfleckmethode ermittelt und betrug 0,24 mm. Das entspricht einer Größenordnung, die man auch auf Betonfahrbahnen von Autobahnen vorfindet (Bild 8-25).

Ablauf der Messungen:

1. Ablesung der Messung auf getrockneter Betonoberfläche (Sollwert 0  $\mu\text{m}$ ),

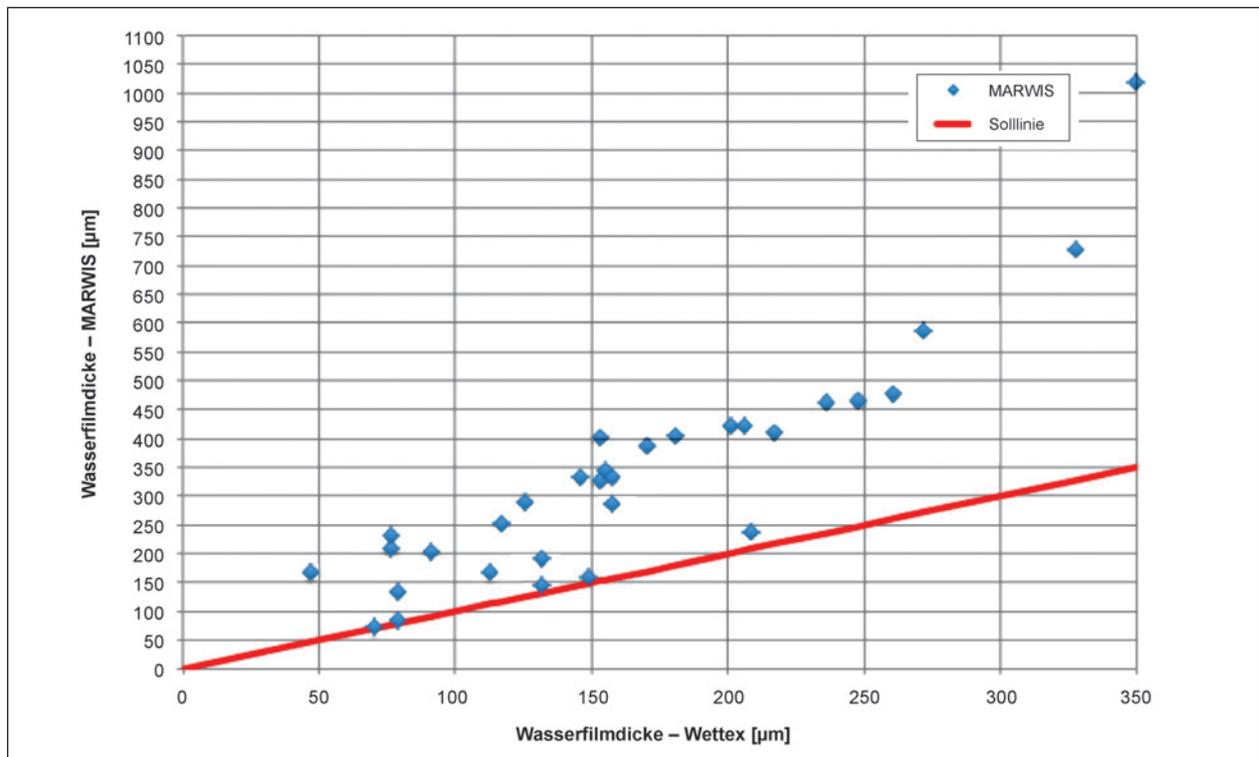


Bild 8-26: Abweichung der MARWIS-Messungen von der durch Wettex-Messungen ermittelten Solllinie

2. Auftrag eines möglichst gleichmäßigen Wasserfilms mittels einer Sprühflasche mit Druckpumpe,
3. Ablesung des Messwertes für die Wasserfilmdicke auf der benetzten Betonoberfläche,
4. Wägung des leicht angefeuchteten Wettex-Tuches,
5. Auflage des Wettex-Tuches auf die benetzte Oberfläche,
6. leichtes Andrücken des Wettex-Tuches auf die Oberfläche,
7. Abnahme des Tuches von der Betonoberfläche,
8. Ablesung des MARWIS-Messwertes für die Wasserfilmdicke auf der mit dem Wettex-Tuch entwässerten Betonoberfläche,
9. Wägung des Wettex-Tuches.

Eine obere Grenze für die Aufbringung des Wasserfilms war dadurch gegeben, dass bei einem Flüssigkeitsauftrag von mehr als 350 µm (Wettex-Wert), der Wasserfilm über die Außenkante der waagrecht justierten Platte zu fließen begann.

Zwischen den Messungen wurde das Wettex-Tuch mit einer Tuchpresse entwässert. Seine Abmessun-

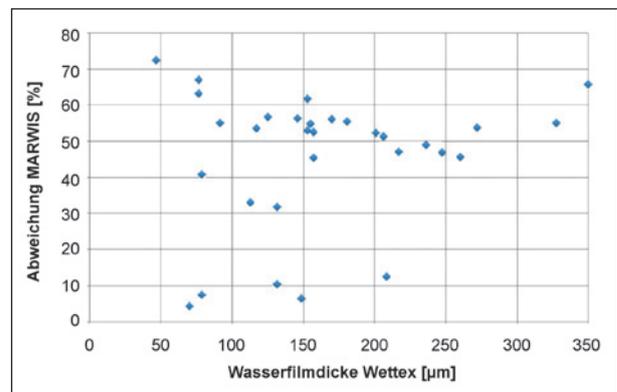


Bild 8-27: Prozentuale Abweichung der MARWIS-Messungen von den Wettex-Messungen

gen im entwässerten aber leicht feuchten Zustand, betragen 265 x 355 mm.

Es wurden insgesamt 31 Vergleichsmessungen durchgeführt. Dafür wurden nach visuellem Eindruck unterschiedliche Wasserfilmdicken aufgebracht.

Im Auswertediagramm sind die Messungen nach aufsteigendem MARWIS-Messwert für die Wasserfilmdicke sortiert (Bild 8-26).

Aus den Diagrammen (Bild 8-26, Bild 8-27) ist ablesbar, dass die absolute Abweichung zwischen Wettex und MARWIS bei steigendem Wettex-Messwert tendenziell deutlich zunimmt. Zumeist zeigt der

MARWIS-Sensor einen deutlich höheren Wert für die Wasserfilmdicke an, als mit dem Wettex-Test ermittelt wurde. In wenigen Fällen liegt der MARWIS-Messwert sehr nahe des Wettex-Wertes. Im Gegensatz zu den Labormessungen von WAHLIN liegen die Messabweichungen oberhalb der Wettex-Messungen. Am häufigsten in einem Bereich von 50 – 60 %.

Die relativen und absoluten Abweichungen sind zum Teil sehr erheblich und stellen damit die Verwendung dieses Wertes im Algorithmus infrage.

Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass die Messungen unter statischen Bedingungen durchgeführt wurden und der Wasserfilm wesentlich homogener war als er auf einer Autobahn unter Verkehrsbedingungen zu erwarten ist.

## 9 Ergebnisse der Feldversuche in der WD-Saison 2016/17

Für die im November 2016 begonnenen Feldversuche liegen Datenaufzeichnungen in folgendem Umfang vor:

- AM Münchberg: 88 Einsatztage im Zeitraum vom 22.11.2016 bis 27.04.2017,
- AM Greding: 101 Einsatztage im Zeitraum 18.11.2016 bis 28.04.2017.

Es muss jedoch erwähnt werden, dass aus unterschiedlichen Gründen an vielen Tagen nicht alle Eingangsdaten zur Verfügung standen und der Algorithmus somit nicht komplett funktionieren konnte.

Ungeachtet dessen verblieb eine ausreichende Zahl von Einsatztagen, die eine Beurteilung der Funktion des Algorithmus möglich machen.

Das im 20 Sekunden Takt aufgenommene Fotomaterial hat hinsichtlich des Fahrbahnzustandes nur eine sehr geringe Aussagekraft. Trotz Nachtsichtfähigkeit der Kameras sind die Nachtaufnahmen ausnahmslos nicht auswertbar. Tagaufnahmen zeigen nur dann auswertbare Ergebnisse, wenn sich Schnee auf der Fahrbahnoberfläche befindet. Das war allerdings auf den Hauptfahrbahnen kaum der Fall. Zudem führte die Ausrichtung der Kameras auf den Messfleck des MARWIS dazu, dass immer eine Unschärfe vorhanden ist. Es wurde daher festgelegt, dass die Kameras in der kommenden Saison so ausgerichtet werden, dass Schrägaufnahmen auf die Fahrbahn entstehen.

Über die Funktion des Gesamtsystems hinaus war es vor allem interessant, wie sich die große Zahl der Eingangsdaten aus unterschiedlichen Quellen auf die Schwankungsbreite der Streudichte auswirkt.

Aus der Vielzahl der aufgezeichneten Daten werden im folgenden beispielhaft nur einzelne ausgewertete Zeitabschnitte auf den Strecken der AM Greding und der AM Münchberg vorgestellt, die besonders aussagekräftig sind.

Der in Bild 9-1 dargestellte Verlauf der Streudichte beruht auf einer Einsatzfahrt im Bereich der AM Greding am 14.01.17. Startpunkt der Fahrt ist der Betriebshof in Greding. Der Einsatz auf der A 9 geht in Richtung Süden. Der Auswertzeitraum ist wegen der besseren Lesbarkeit der Diagrammdarstellung auf 30 Minuten begrenzt.

Die errechnete Streudichte wird bei der AM Greding ausschließlich für den Einsatz von FS30 ausgewiesen, da die dort eingesetzte Streumaschine nur für FS30 ausgelegt ist. Die Einsatzfahrt hatte präventiven Charakter, da die Fahrbahn trocken war. Minustemperaturen und angesagter Schneefall (erwartet wurden nur geringe Schneefallmengen) waren Anlass für den Einsatz. Die errechnete Streudichte schwankt im Wesentlichen zwischen 5 und 20 g/m<sup>2</sup>. Der Durchschnittswert für den ausgewerteten Zeitraum liegt bei 16 g/m<sup>2</sup>. Ergänzend muss noch erwähnt werden, dass abweichend von der auf dem Fahrzeug vorgenommenen Berechnung der Streudichte in der Nachbearbeitung ein um 2,8 K niedrigerer Wert bei den Temperaturen eingesetzt wurde. Das ist die nach Temperaturanalysen für diesen Temperaturbereich vorhandene Abweichung des bei der AM Greding eingesetzten MARWIS-Sensors gegenüber der Realtemperatur.

In einigen sehr kurzen Zeitabschnitten (z. B. um 02:41:00) wurde durch den MARWIS-Sensor Eis auf der Fahrbahn detektiert. Dann wechselt der Algorithmus in einen anderen Berechnungsmodus. In Abhängigkeit von der gleichzeitig gemessenen Wasserfilmdicke wird ggf. eine sehr hohe Streudichte oder auch eine besonders geringe Streudichte berechnet.

Beispiel:

Uhrzeit	Wasserfilmdicke	Errechnete Streudichte
02:41:10	629,5 µm	40 g/m <sup>2</sup>
02:41:13	2,2 µm	5 g/m <sup>2</sup>

Wegen der Reaktionszeit der Streumaschine (ca. 2 Sekunden) kann die erhöhte Dosierung nicht auf dem glatten Abschnitt ausgebracht werden. Es ist allerdings nicht zu verifizieren, ob sich tatsächlich Eis auf der Fahrbahn befand. Grundsätzlich besteht die Frage, ob auf solche extrem stark begrenzten Ereignisse reagiert werden sollte.

Diese Frage stellt sich auch in Zusammenhang mit einer Glättung der errechneten Werte. In Bild 9-1 ist der Verlauf der Streudichtekurve dargestellt, wenn eine Glättung durch die Berechnung des gleitenden Durchschnitts erfolgt. In der Darstellung wird jeweils der Durchschnittswert der vorangegangenen 60 Sekunden (Periode 60) errechnet. Das führt zu einer

verzögerten Reaktion auf veränderte Werte. Zum Vergleich der Auswirkungen des gleitenden Durchschnitts ist in Bild 9-2 der Verlauf der Linie des gleitenden Durchschnitts mit Periode 30 dargestellt.

Die Verarbeitung des gleitenden Durchschnitts von Eingangswerten (Wasserfilmdicke, Fahrbahnoberflächentemperatur) kann im Einzelfall dazu führen, dass auf wechselnde Fahrbahnbedingungen zu spät reagiert wird.

Die im realen Einsatz eingestellte Streudichte von 20 g/m<sup>2</sup> wurde nach Verlassen des Betriebshofes nicht mehr verändert. Die an dieser Streumaschine vorhandene temperaturabhängige Steuerung war

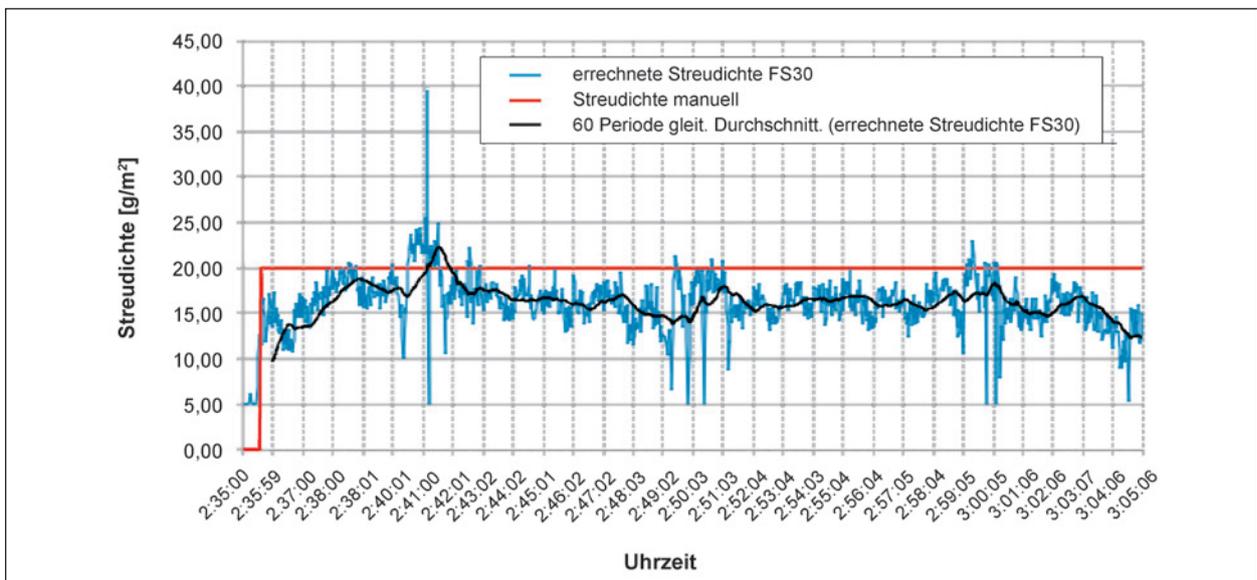


Bild 9-1: Manuell eingestellte Streudichte im Vergleich zu der mit Algorithmus errechneten Streudichte am 14.01.17 auf einer Hauptfahrbahn der A 9 im Bereich der AM Greding

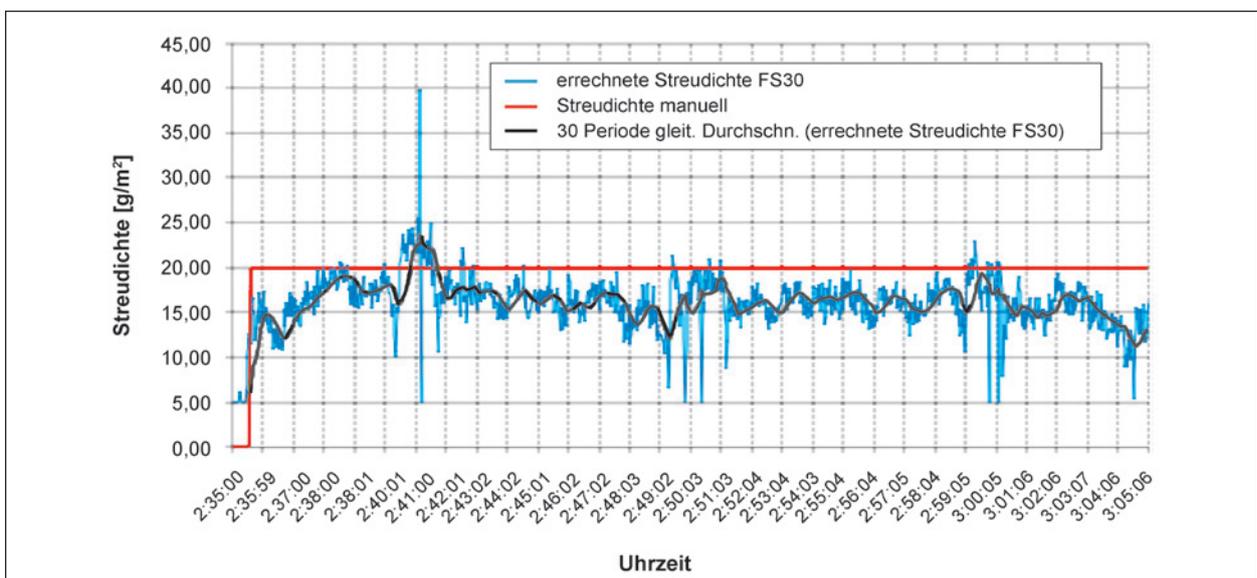


Bild 9-2: Gleitender Durchschnitt der Streudichte mit Periode 30

offensichtlich nicht aktiviert. Der Durchschnittswert der errechneten Streudichte betrug im ausgewerteten Zeitabschnitt 16,07 g/m<sup>2</sup>. Das ist knapp 20 % weniger Salzeinsatz.

Ein weiteres Beispiel basiert auf einer Einsatzfahrt der Autobahnmeisterei Münchberg am 04.02.2017. Befahren wurde ein Streckenabschnitt der A 9 von der Landesgrenze Bayern/Thüringen bis in die Höhe von Gefrees.

Die Bearbeitung der Strecke erfolgte, weil die Fahrbahn teilweise nass war und Minustemperaturen vorherrschten. Es war außerdem im Verlauf der Nacht mit fallenden Temperaturen zu rechnen.

Der Algorithmus ist derzeit so gestaltet, dass bei chemisch nasser Fahrbahn und den entsprechenden Temperaturverhältnissen präventiv gestreut wird. Allerdings wird für diesen Fall der Einsatz von FS30 empfohlen. Dahinter stehen die Überlegungen, dass schon eine gewisse Flüssigkeitsmenge auf der Fahrbahn vorhanden ist, welche die Haftung des Feuchtsalzes verbessert und FS100 durch die vorhandene Flüssigkeitsmenge evtl. zu stark verdünnt werden könnte.

Der Fahrbahnzustand auf der untersuchten Strecke wechselt sehr häufig zwischen chemisch nass und trocken. Aus diesem Grund wechselt die Empfehlung des Algorithmus ebenso häufig zwischen FS30 und FS100.

Die Darstellung in Bild 9-3 zeigt, dass es innerhalb kürzester Zeit eine Vielzahl von Technologiewechseln zwischen FS30 und FS100 gibt. Das ist technisch grundsätzlich möglich, erreicht jedoch durch die zeitliche Verzögerung der Wirkung nicht das beabsichtigte Ziel. Das trifft bis zu einem gewissen Grad auch auf häufige und starke Veränderungen der Streudichte zu.

Aus diesem Grund liegen Überlegungen nahe, den Algorithmus so zu verändern, dass technologisch letztlich nicht wirksame Sprünge vermieden werden.

In der Anfangsphase der rechnerischen Bestimmung der Streudichte für FS30 bis ca. 21:38 Uhr oszilliert die errechnete Salzmenge in kurzen Abständen. Danach wird der Minimalwert der Streudichte (5 g/m<sup>2</sup>) errechnet. Daher wird eine Mindeststreudichte von 5 g/m<sup>2</sup> ausgegeben. Ausschlaggebend dafür sind höhere Temperaturen auf dem betreffenden Streckenabschnitt.

Die Glättung der Streudichtewerte mittels gleitenden Durchschnitts für einen Teil des in Bild 9-4 dargestellten Zeitabschnittes ist in Bild 9-5 dargestellt. Es wird zu klären sein, ob eine auf diese Weise geglättete Streudichte den Anforderungen an eine wirkungsvolle Glättebekämpfung bzw. -vermeidung gerecht wird.

Tatsächlich wurde bei dem betreffenden Einsatz eine Kombination aus FS30 und FS100 verwendet.

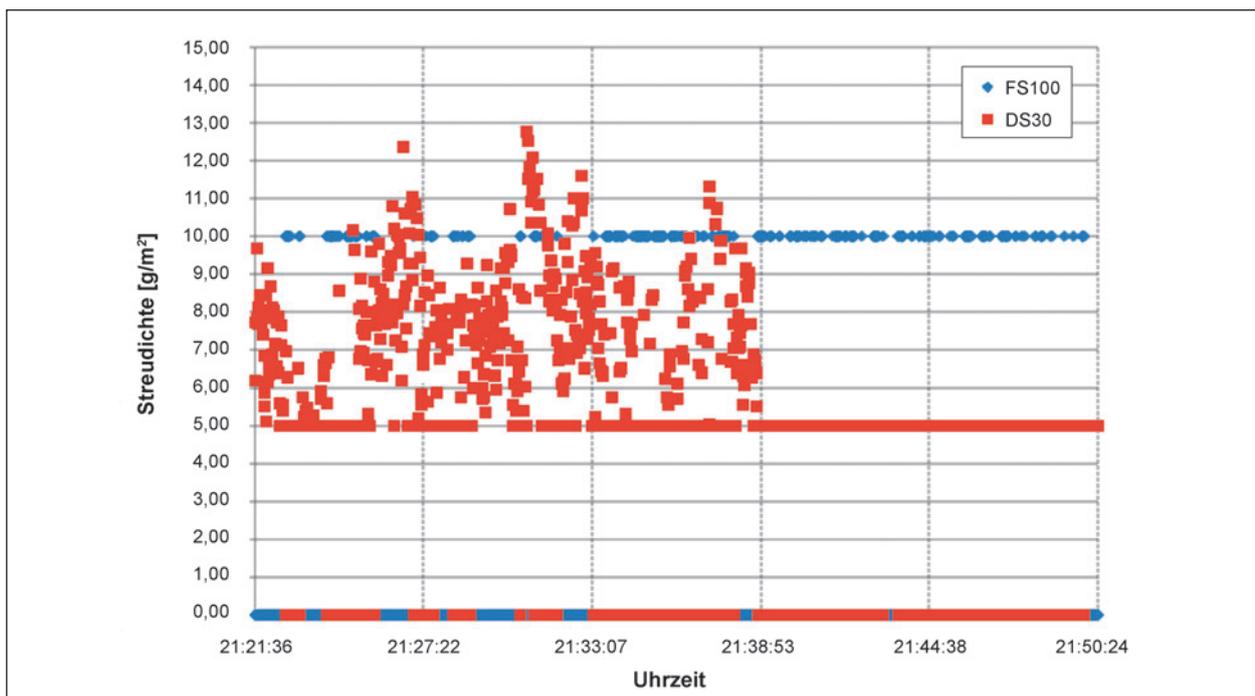


Bild 9-3: Mit dem Algorithmus errechnete Streudichtewerte und Technologiewechsel bei einer Einsatzfahrt am 04.02.17

Das heißt, zu dem über den Streuteller ausgebrachten Feuchtsalz wurde gleichzeitig Sole über Sprühdüsen ausgebracht. Das ist mit Kombinationsstreugeräten technisch möglich und technologisch unter bestimmten Umständen, insbesondere auf offenporigem Asphalt auch sinnvoll. Für den präventiven Einsatz auf offenporigem Asphalt wird bei kombinierter Streuung empfohlen 5 g/m<sup>2</sup> FS30 mit 10 g/m<sup>2</sup> FS100 auszubringen. Im Algorithmus war das noch nicht vorgesehen. Es wäre jedoch mithilfe der bekannten Koordinaten von Beginn und Ende der OPA-Strecken relativ einfach in den Algorithmus einzubauen.

Ein Vergleich der Ergebnisse des Algorithmus mit den tatsächlichen Werten ist bei dieser Art der

Streustoffausbringung nur über die absoluten Salzmenge und nicht über die eingestellte Streudichte möglich.

Aus dem Diagramm (Bild 9-5) sind kaum Ähnlichkeiten zwischen den errechneten und den tatsächlich eingestellten Werten hinsichtlich der Salzmenge zu erkennen. Die häufigen Schwankungen der errechneten Salzmenge (rote Linie) hängen mit dem Wechsel zwischen FS30 und FS100 zusammen. Ab ca. 21:40 Uhr werden nur noch die Minimalwerte der Dosierung als erforderlich angesehen, da die Temperatur im betreffenden Abschnitt höher als in der Zeit vorher war. Die geringen Werte erscheinen als gerechtfertigt. Allerdings kann der praktische Beweis nicht angetreten werden.

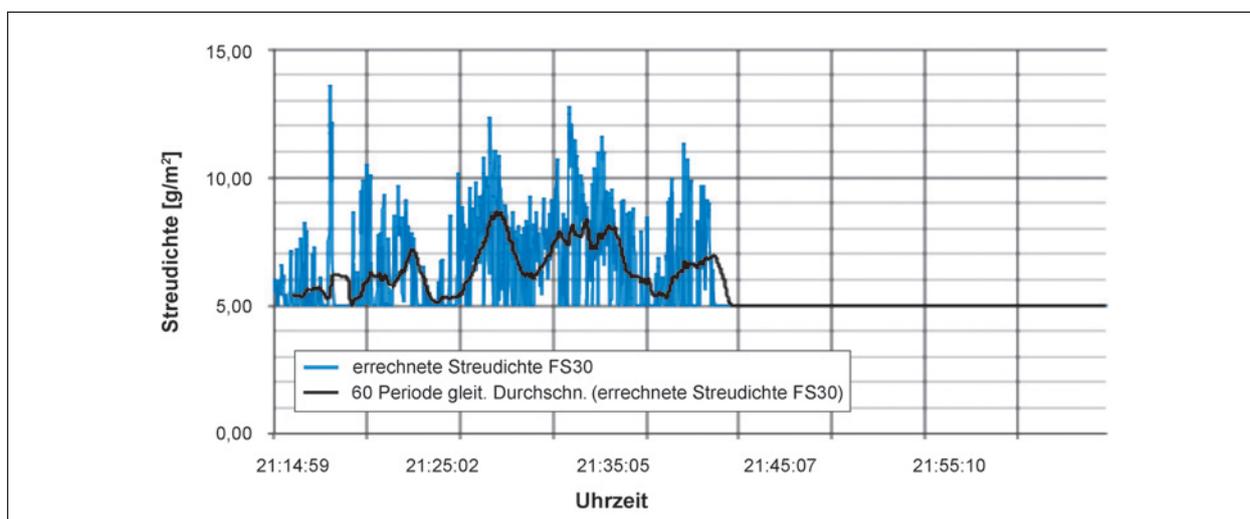


Bild 9-4: Glättung des Streudichteverlaufes durch gleitenden Durchschnitt mit Periode 60 Sekunden

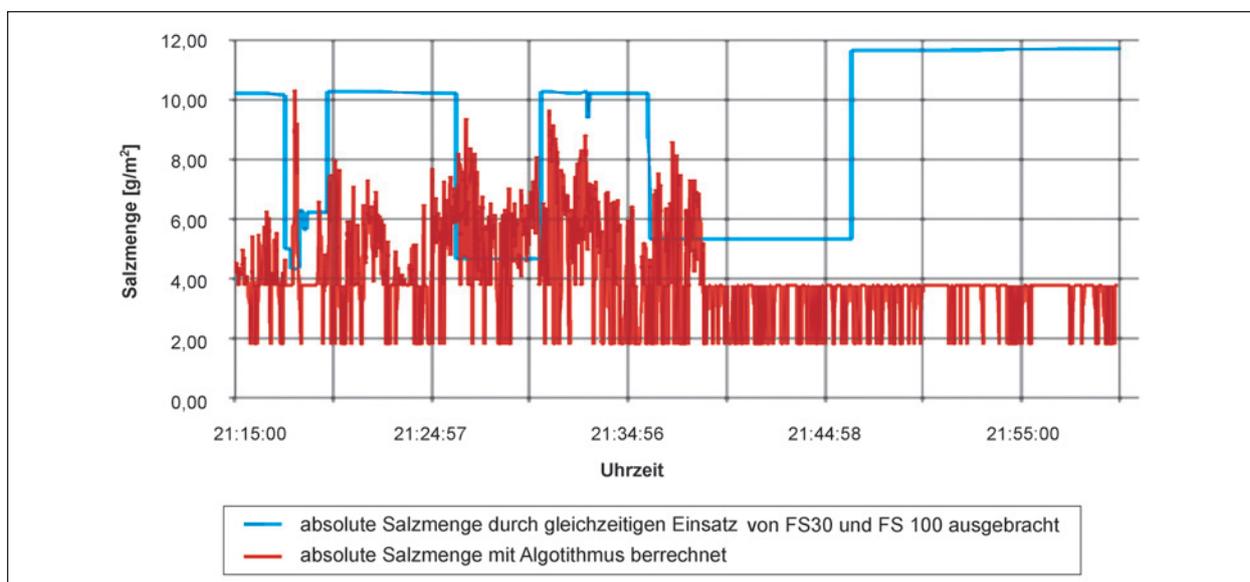


Bild 9-5: Errechnete Salzmenge bei Einsatzfahrt der AM Münchberg auf der A 9 am 04.02.17 im Vergleich zu den abschnittswisen Mittelwerten der Salzmenge aus dem Einsatzbericht

Die tatsächlich ausgebrachten Streustoffmengen stellen Durchschnittswerte über die jeweiligen Zeitabschnitte dar. Sie variieren auch hinsichtlich der Anteile von FS30 und FS100.

### Einsatzfahrt am 03.02.2017 von 05:30 Uhr bis 06:00 Uhr auf der A 9 von Hirschberg bis Münchberg

- Grunddaten
  - Fahrbahnoberflächentemperatur (am Fahrzeug gemessen): -1,2 bis +1,6 °C,
  - Prognose Temperatur (3h): -0,2 bis + 2,6 °C,
  - Streckenlänge: 26,9 km,
  - Durchschnittsgeschwindigkeit: ca. 55 km/h,
  - Fahrbahnzustand: überwiegend chemisch nass,
  - Prognose Fahrbahnzustand: feucht/trocken,
  - Streumodus: durchgängig präventiv,
  - Streutechnologie: FS30/FS100,
  - Einsatzgrund: Vermeidung des Überfrierens vorhandener Nässe.

Bild 9-6 bis Bild 9-8 zeigen einen grafischen Datenüberblick.

Die vorliegenden Daten legen einen Präventiveinsatz mit minimalem Salzeinsatz nahe. Das wird auch durch die errechneten Werte der Streudichten so ausgewiesen. Der Wechsel zwischen FS30 und

FS100 (Bild 9-9) basiert auf dem derzeitigen Zugschnitt des Algorithmus, der zu diskutieren ist.

Nach dem vorliegenden Einsatzbericht wurde bei dem untersuchten Einsatz FS30 und FS100 gleichzeitig ausgebracht. Damit eine Vergleichsbasis zu den errechneten Streudichten vorhanden ist, werden im Bild 9-10 die reinen Salzmengen gegenübergestellt. Das bedeutet 76 % des eingestellten bzw. errechneten Dosierwertes bei FS30 und 20 % bei FS100.

Der Vergleich der errechneten mit den tatsächlich ausgebrachten Salzmengen zeigt teilweise erhebliche Unterschiede. Nach den im Algorithmus verarbeiteten Daten wurde im Wesentlichen Minimaldosierung errechnet. Das bedeutet Streudichten von 5 g/m<sup>2</sup> bei FS30 (Salzanteil 3,8 g/m<sup>2</sup>) und 10 g/m<sup>2</sup> bei FS100 (Salzanteil 1,8 g/m<sup>2</sup>). Für einige Zeitpunkte wurde kein Streubedarf errechnet, da die Prognosetemperatur > 2 °C war.

Die Unterschiede bei den verwendeten Salzmengen sind für diesen und weitere Einsätze derzeit noch nicht erklärbar. Es könnte sein, dass bei den Dosierungsentscheidungen auf dem Fahrzeug noch weitere Informationen eingegangen sind, die im Algorithmus nicht zur Verfügung stehen. Auch eine unterschiedliche Kalibrierung der Temperaturmesssysteme ist nicht auszuschließen.

Grundsätzlich ist zu verzeichnen, dass die mit dem Algorithmus berechneten Streudichten insbesondere bei präventiven Einsätzen deutlich unter den tatsächlich eingestellten Streudichten liegen.

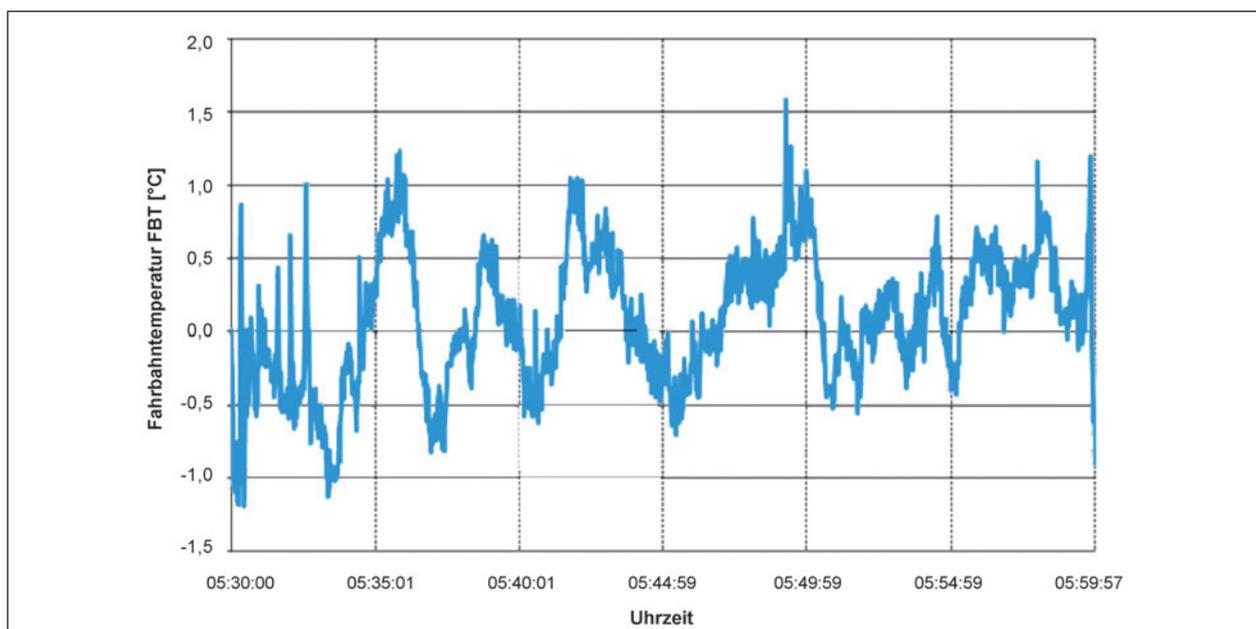


Bild 9.6: Temperaturverlauf (MARWIS-Messung)

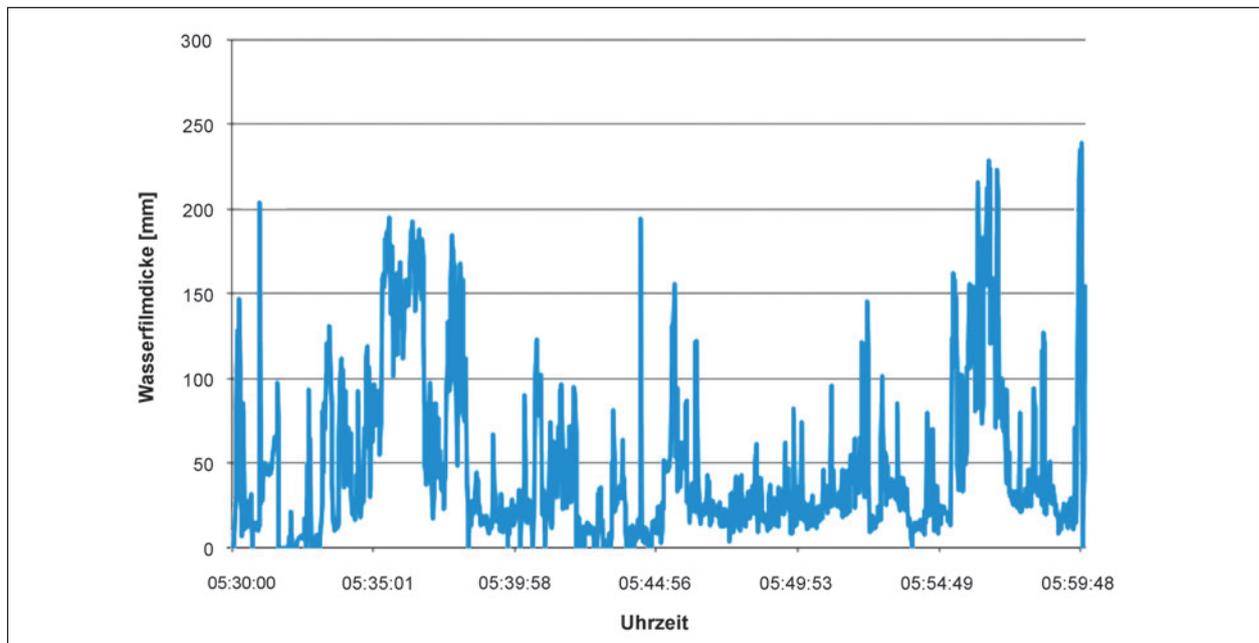


Bild 9.7: Verlauf der Wasserfilmdicke (MARWIS-Messung)

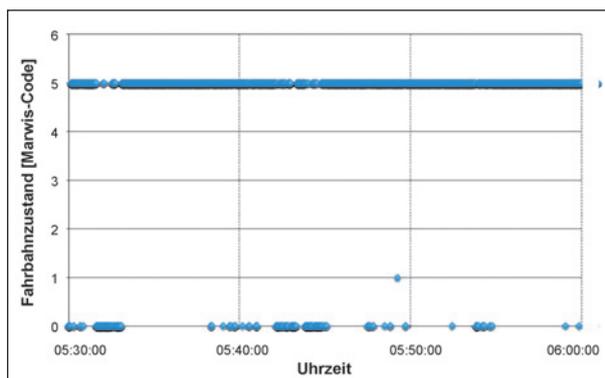


Bild 9.8: Verlauf des Fahrbahnzustandes (0 – trocken, 1 – feucht, 5 – chemisch nass)

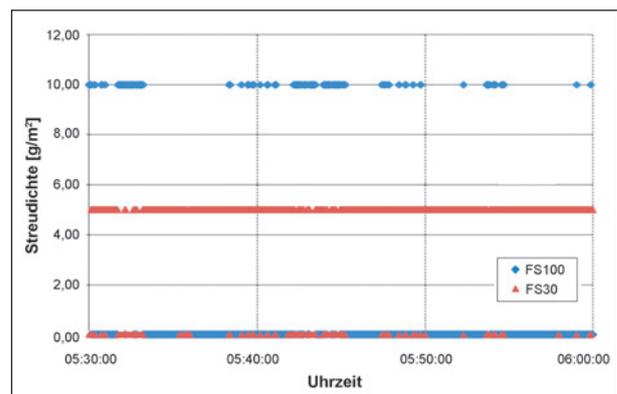


Bild 9.9: Errechnete Streudichte

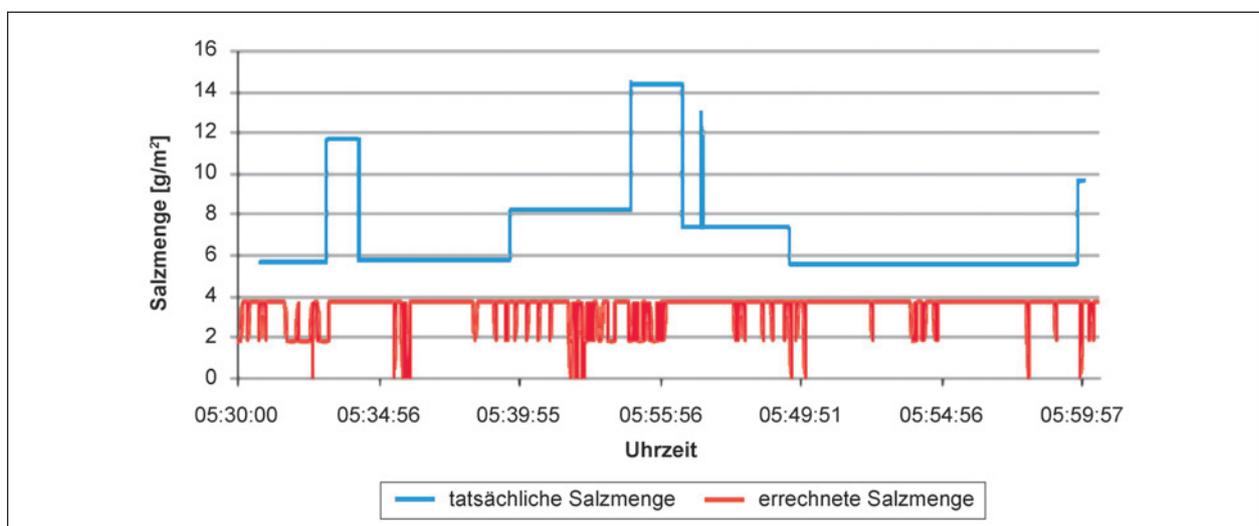


Bild 9.10: Vergleich der tatsächlich ausgebrachten Salzmenge mit der errechneten Salzmenge

## 10 Ergebnisse der Feldversuche in der WD-Saison 2017/18

### 10.1 Überblick über die Saisonergebnisse

Für die im Dezember 2017 fortgesetzten Feldversuche liegen Datenaufzeichnungen in folgendem Umfang vor:

- AM Münchberg: 36 Einsatztage im Zeitraum vom 12.12.2017 bis 18.03.2018 mit 90 Umläufen,
- AM Greding: 27 Einsatztage im Zeitraum 09.12.2017 bis 18.03.2018 mit 94 Umläufen.

Die im Vergleich zur Vorsaison geringere Zahl der dokumentierten Einsatztage ist auf den milden Winter zurückzuführen.

Die Sicherheit der Datenbereitstellung und der Datenübertragung konnte gegenüber der vorherigen Saison wesentlich verbessert werden. Für fast alle Einsatztage liegen auch komplette Datensätze vor.

Die Funktion des Algorithmus in Verbindung mit den Eingangsdaten konnte für fast alle denkbaren winterlichen Witterungssituationen getestet werden.

Das im 20 Sekunden Takt aufgenommene Fotomaterial (ca. 50.000 Aufnahmen) hat durch die veränderte Kameraposition (Schrägaufnahmen) hinsichtlich des Fahrbahnzustandes eine etwas größere Aussagekraft als in der vorherigen Saison. Durch Flüssigkeitstropfen an der Optik ist jedoch häufig eine Auswertung der Bilder nicht möglich. Anhand der Aufnahmen kann lediglich festgestellt werden, ob sich Schnee oder Schneematsch auf der Fahrbahn befinden. Eine differenzierte Bewertung entsprechend des vom MARWIS-Sensor angezeigten Fahrbahnzustandes (z. B. Unterscheidung zwischen nass und chemisch nass) ist naturgemäß nicht möglich.

Die Bildserie 10-1 bis 10-3 zeigt drei von den besseren Bildern und verdeutlicht, dass eine differenzierte Beurteilung des durch den MARWIS-Sensor festgestellten Straßenzustandes nur schwer möglich ist. Die Bilder zeigen sehr ähnliche Verhältnisse auf der Straßenoberfläche, die vom MARWIS unterschiedlich zugeordnet werden (Schnee, schnee-/eisbedeckt, chemisch nass). Der Grund für die unterschiedliche und schnell wechselnde Charakterisierung des Straßenzustandes liegt sicher auch an der kleinen Fläche des Messfleckes. Nach den Bildern ist keine Zuordnung absolut falsch, aber für die

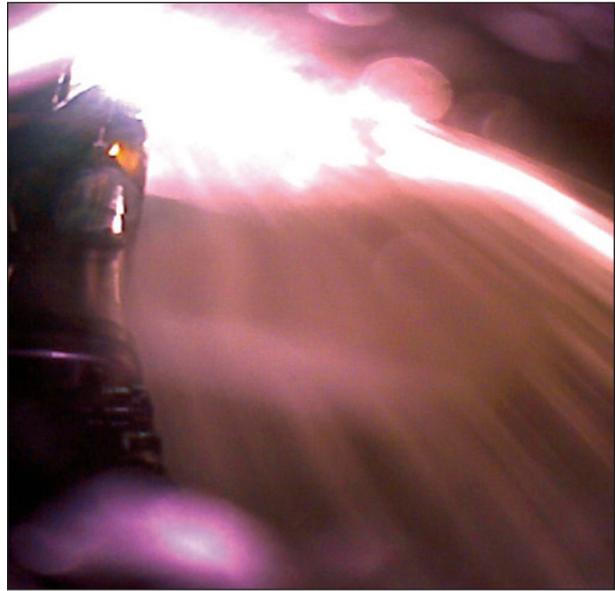


Bild 10-1: AM Greding, 29.12.2017, 23:31:44, MARWIS FBT -0,2 °C; WFD 1.101 µm, FBZ Schnee

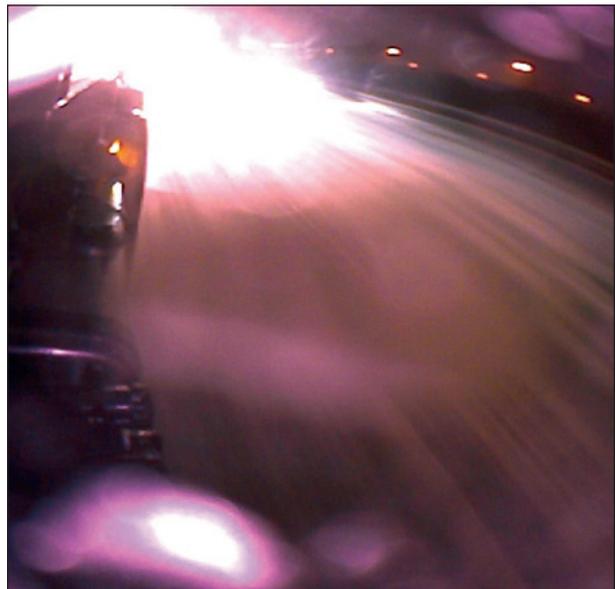


Bild 10-2: AM Greding, 29.12.2017, 23:33:04, MARWIS FBT -0,2 °C; WFD 1.489 µm, FBZ schnee-/eisbedeckt

Verwendung im Algorithmus im Einzelfall doch eher problematisch. Insbesondere dann, wenn es kurzzeitige Wechsel gibt.

Auf allen Bildern ist erkennbar, dass die Glätte-schichten über den Fahrbahnquerschnitt nicht homogen verteilt sind. Speziell in Bild 10-3 ist zu erkennen, dass im Querschnitt einen Wechsel zwischen nasser Fahrbahn und Schnee bzw. Schneematsch gibt. Der Sensor erfasst aber nur einen Durchmesser von 20 cm. Dieser Bereich muss nicht unbedingt repräsentativ für den gesamten Fahrbahnquerschnitt sein.

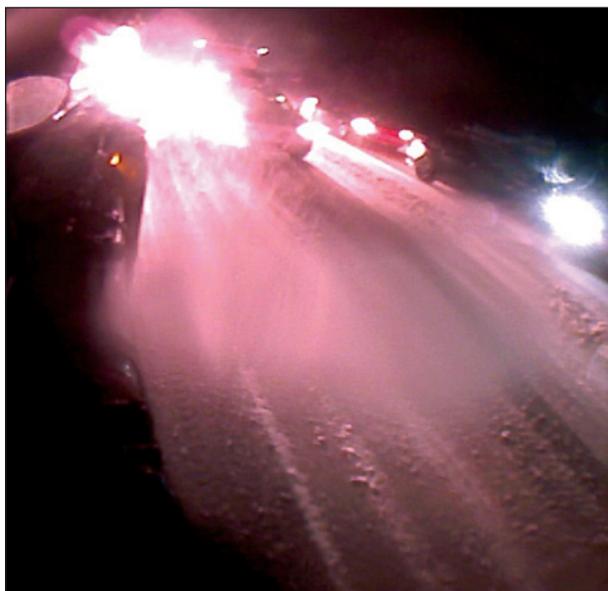


Bild 10-3: AM Greding, 29.12.2017, 23:36:24, MARWIS  
FBT -0,9 °C; WFD 1.085 µm, FBZ chemisch nass

## 10.2 Erhebungsdaten ausgewählter Einsatzfahrten

Die große Datenfülle der letzten Saison führte zu weiteren Erkenntnissen, wie sich die große Zahl der Eingangsdaten aus unterschiedlichen Quellen auf die Schwankungsbreite der Streudichte auswirkt.

Aus der Vielzahl der aufgezeichneten Daten werden im Folgenden beispielhaft nur einzelne ausgewertete Zeitabschnitte auf den Strecken der AM Greding und der AM Münchberg vorgestellt, die allgemeine Aussagekraft haben.

### Einsatzfahrt am 30.12.2017 von 00:00 Uhr bis 05:22 Uhr auf der A 9 zwischen AM Greding und TR (Tank- und Rastanlage) „Köschinger Forst“

- Grunddaten
  - Fahrbahnoberflächentemperatur (am Fahrzeug gemessen): -4,0 bis +1,8 °C,
  - Prognose Temperatur (3h): -1,0 bis + 0,0 °C,
  - Fahrbahnzustand (MARWIS): nass, chemisch nass, kritisch nass, schnee-/eisbedeckt, eisbedeckt (häufig wechselnd),
  - Prognose Fahrbahnzustand: Schnee,
  - Streumodus: kurativ, präventiv (häufig wechselnd),

- Streutechnologie: FS30 (am Einsatzfahrzeug [FS100 technisch nicht möglich),
- Einsatzgrund: Schneefall.

Die Bilder 10-4 und Bild 10-5 zeigen einen grafischen Datenüberblick.

Die Eingangsdaten haben den entscheidenden Einfluss auf die Berechnung der optimalen Streudichte. Aus diesem Grund ist zu analysieren, wie stark die Eingangsdaten, die durch Messung ermittelt werden, variieren.

Vor allem die Fahrbahnoberflächentemperatur und die Wasserfilmdicke sind für die Berechnung der optimalen Streudichte ausschlaggebend.

In Bild 10-4 ist die am Fahrzeug durch den MARWIS-Sensor in Bezug auf die Uhrzeit und die Position des Fahrzeuges gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur dargestellt. Die Fahrzeugposition kann wegen der Nord-Süd-Ausrichtung der A 9 sehr anschaulich durch Angabe der nördlichen Breite dargestellt werden. Das hat im Vergleich zur Darstellung in einer Karte den Vorteil, dass grafisch sehr anschaulich der Bezug zu weiteren Daten hergestellt werden kann.

Die Aufzeichnungen wurden immer automatisch nach Kalendertagen getrennt. Aus diesem Grund beginnen die Aufzeichnungen 0:00 Uhr an der TR Köschinger Forst, als das Fahrzeug dabei war, die Fahrtrichtung zu wechseln. Waagerechte Linien in der Darstellung entstehen, wenn es keine oder nur geringe Bewegung in Nord-Südrichtung gibt. Das ist beim Wenden, bei der Beladung oder der Bearbeitung von Anschlussstellen der Fall.

Im konkreten Fall lässt sich Folgendes ablesen:

- gegen 0:00 Uhr wenden in der TR Köschinger Forst,
- ca. 00:10 Uhr bis 00:50 Uhr kontinuierliche Rückfahrt bis zur AM Greding,
- bis ca. 01:50 Uhr Aufenthalt in der AM Greding (Wiederbeladung, Pause),
- ca. 01:50 Uhr bis ca. 02:40 Uhr kontinuierliche Fahrt bis zur TR Köschinger Forst,
- danach ca. 10 Minuten wenden in TR Köschinger Forst,
- ca. 02:50 Uhr bis 03:40 Uhr kontinuierliche Rückfahrt bis zur AM Greding,

- bis ca. 04:20 Uhr Aufenthalt in der AM Greding (Wiederbeladung, Pause),
- ca. 04:20 Uhr bis 05:00 Uhr Fahrt in Richtung TR Köschinger Forst mit Bearbeitung der Anschlussstellen Altmühltal und Denkendorf,
- nach kurzem Wendemanöver in der TR Köschinger Forst, Rückfahrt in Richtung AM Greding – Beginn der Bearbeitung der AS Denkendorf und
- 05:24 Uhr Ende der Aufzeichnung.

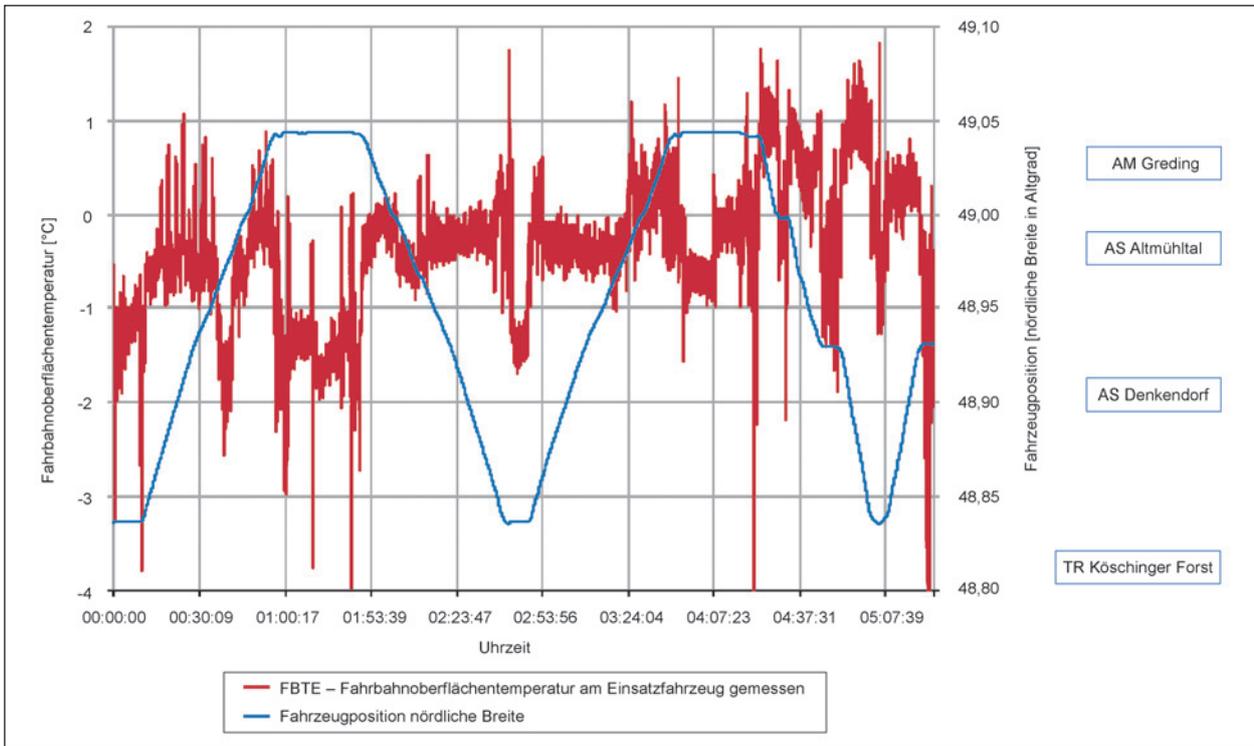


Bild 10-4: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 30.12.2017

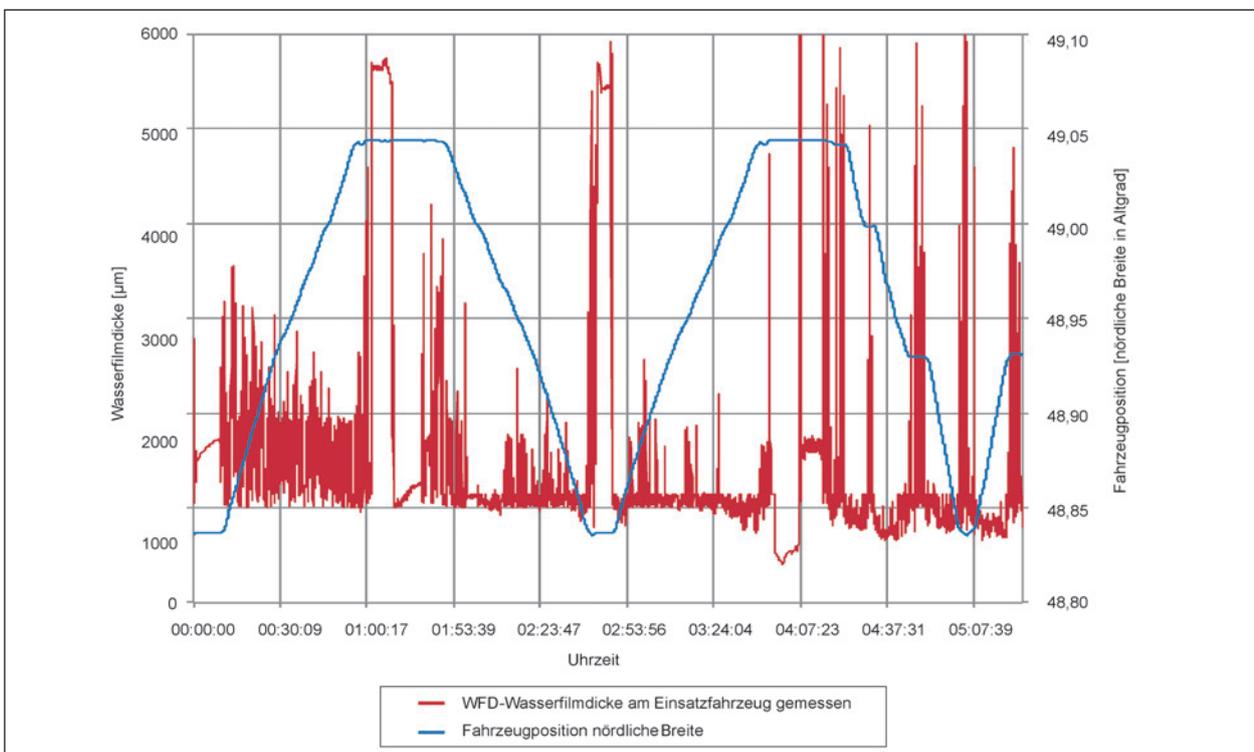


Bild 10-5: Gemessene Wasserfilmdicke bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 30.12.2017

Setzt man die Temperaturlaufzeichnungen in Bezug zu der Position des Fahrzeuges, so ist deutlich zu erkennen, dass die niedrigsten Temperaturen außerhalb der Hauptfahrbahn beim Wenden, auf dem Betriebshof oder an den Anschlussstellen auftreten.

Die gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur auf der Hauptfahrbahn oszilliert teilweise im Takt von wenigen Sekunden um 1 bis 2 K. Im Bereich um Gefrierpunkt hat das erhebliche Auswirkungen auf die Berechnung der optimalen Streudichte.

In Bild 10-5 ist zu erkennen, dass die Wasserfilmdicke zumeist über 1.000 µm beträgt. Damit wird bestätigt, dass es auf der Fahrbahn einen Belag aus Schnee oder Schneematsch gab. Wasserfilmdicken über 1.000 µm treten nur unter diesen Umständen auf. Auffällig ist, dass auf dem Betriebshof, an den Wendepunkten und an den Anschlussstellen noch wesentlich höhere Wasserfilmdicken gemessen wurden. Das ist nachvollziehbar, da dort wahrscheinlich größere Schnee- oder Matschhöhen angetroffen wurden. Auf der Hauptfahrbahn gab es Schwankungsbreiten von etwa 1.000 µm. Im Algorithmus hat das erhebliche Auswirkungen auf die Berechnung der optimalen Streudichte.

Im Algorithmus wird auf Grundlage des vom MARWIS-Sensor ermittelten Fahrbahnzustandes entschieden, ob die Berechnung der optimalen Streudichte nach den Regeln für kurative oder präventive Einsätze erfolgt.

Grundsätzlich könnte auch so verfahren werden, dass vor dem Einsatz entschieden wird, ob es sich um kurative oder präventive Streuung handelt.

Der getestete Algorithmus nutzt alle verfügbaren Sensorinformationen, auch um daraus Informationen über die Tauglichkeit der Daten für die Berechnung der optimalen Streudichte zu gewinnen.

Der MARWIS-Sensor unterscheidet die in Tabelle 10-1 aufgelisteten Fahrbahnzustände.

In folgender Weise dienen sie der Festlegung, in welchem Streumodus gearbeitet wird. Fahrbahnzustände, die vorhandene Glätte vermuten lassen, führen zur Entscheidung, dass die Streudichte nach dem Modus für kurative Streuung berechnet wird. Alle anderen Fahrbahnzustände führen zu der Entscheidung „präventiv“ oder „kein Einsatz“ (siehe auch Bild 4-10).

Fahrbahnzustände, bei denen winterliche Glätte zu vermuten ist sind: „eisbedeckt“, „schnee-/eisbe-

deckt“, „kritisch-nass“ und „schneebedeckt“. Unter „kritisch-nass“ ist eine nasse Fahrbahnoberfläche mit Eisanteilen zu verstehen.

Fahrbahnzustände ohne winterliche Glätte sind: „trocken“, „feucht“, „nass“ und „chemisch nass“. Aus den Datenaufzeichnungen, auch im Bereich der AM Greding am 30.12.2017 ist zu entnehmen, dass es einen sehr häufigen Wechsel des angezeigten Straßenzustandes gab. Wegen der besonderen Relevanz, ob es sich um einen Glättezustand handelt oder nicht, wurden die Glättezustände für eine grafische Darstellung kategorisiert. Für die grafische Darstellung wurden folgende Kategorien eingeführt:

- Kategorie 1  
keine winterliche Glätte („trocken“, „feucht“, „nass“ und „chemisch nass“) und
- Kategorie 2  
winterliche Glätte („eisbedeckt“, „schnee-/eisbedeckt“, „kritisch-nass“ und „schneebedeckt“).

Aus der Darstellung der Glättekategorie in Bild 10-6 ist zu entnehmen, dass es einen sehr häufigen Wechsel zwischen Abschnitten ohne und mit winterlicher Glätte gibt. Das ist zumindest das Ergebnis aus den Sensordaten.

Als Beispiel wird in Tabelle 10-2 ein Auszug aus der Datentabelle gezeigt.

Aus diesen Ergebnissen ergibt sich die Frage, ob bzw. wie die Sensoranzeige des Fahrbahnzustandes in den Algorithmus einzuordnen ist, um die optimale Streudichte zu errechnen.

In den folgenden Abschnitten werden weitere ausgewählte Daten von Einsatzfahrten bei unterschied-

Code	FBZ MARWIS
0	trocken
1	feucht
2	nass
3	eisbedeckt
4	schnee-/eisbedeckt
5	chemisch nass
6	kritisch nass
8	schneebedeckt
99	undefiniert

Tab. 10-1: Klassifizierung und Codierung der durch den MARWIS-Sensor ermittelten Fahrbahnzustände

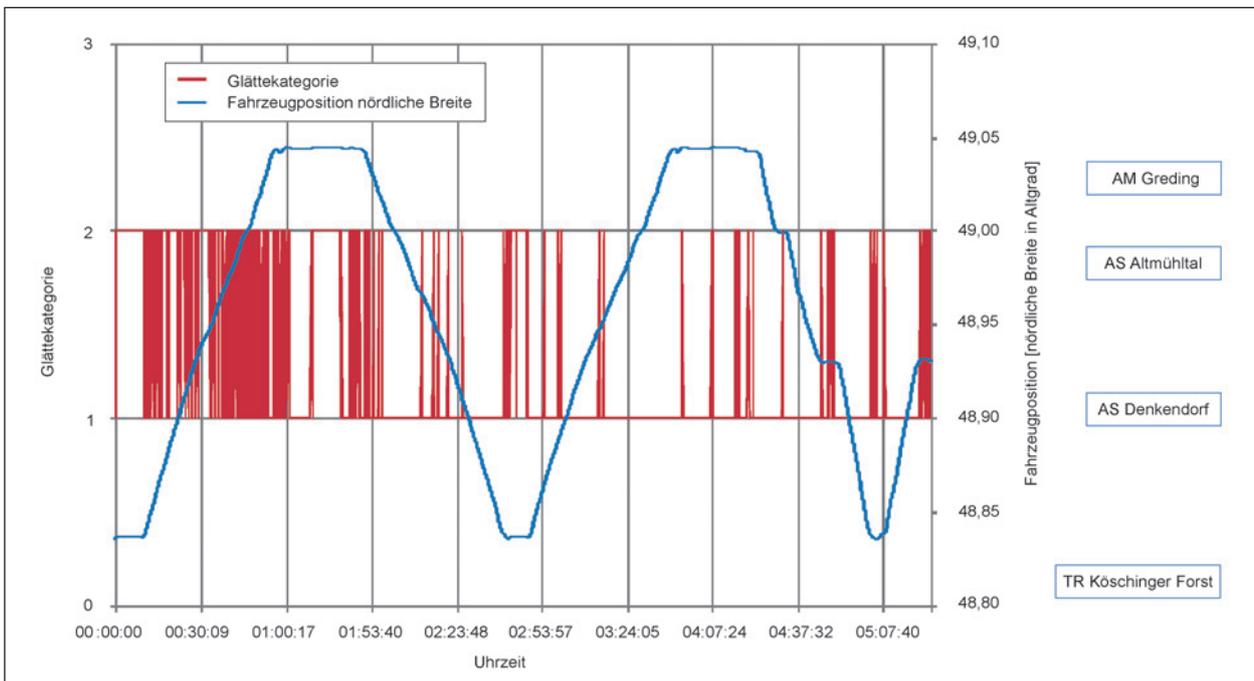


Bild 10-6: Häufiger Wechsel der Glättekatgorie bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 30.12.2017

Uhrzeit	Fahrbahnzustand	Glättekatgorie
00:37:39	schneeeisbedeckt	2
00:37:39	schneeeisbedeckt	2
00:37:40	schneeeisbedeckt	2
00:37:42	kritischnass	2
00:37:42	kritischnass	2
00:37:43	kritischnass	2
00:37:45	kritischnass	2
00:37:45	kritischnass	2
00:37:46	chemischnass	1
00:37:48	kritischnass	2
00:37:48	kritischnass	2
00:37:49	chemischnass	1
00:37:51	chemischnass	1
00:37:51	chemischnass	1
00:37:52	chemischnass	1
00:37:54	chemischnass	1

Tab. 10-2: Beispiel für den häufigen Wechsel von Fahrbahnzustand und Glättekatgorie

lichen Bedingungen nach dem gleichen Schema wie unter Kapitel 10.2 vorgestellt. Auf die bereits in Kapitel 10.2 gegebene allgemeine Erläuterung für die Interpretation der Diagramme wird dabei verzichtet.

**Einsatzfahrt am 29.12.2017 von 01:40 Uhr bis 03:07 Uhr auf der A 9 zwischen AM Greding und AS Allersberg**

- Grunddaten
  - Fahrbahnoberflächentemperatur (am Fahrzeug gemessen): ca. -2,0 bis -0,0 °C,
  - Prognose Temperatur (3h): -3,0 bis - 1,0 °C,
  - Fahrbahnzustand (MARWIS): chemisch nass,
  - Prognose Fahrbahnzustand: trocken,
  - Streumodus: präventiv,
  - Streutechnologie: FS30 (am Einsatzfahrzeug FS100 technisch nicht möglich),
  - Einsatzgrund: Gefahr des Überfrierens.

**Grafischer Datenüberblick**  
(Bild 10-7 bis Bild 10-9)

Die Fahrt beginnt in der Autobahnmeisterei Greding und verläuft in Richtung Süden bis zur Anschlussstelle Altmühltal. Dort wird gewendet, um dann durchgängig bis zur Anschlussstelle Allersberg zu fahren. Von dort geht es zurück bis zur Autobahnmeisterei Greding. Temperaturmaxima liegen beim Wenden in den Anschlussstellen. Auf der Hauptfahrbahn wird nur eine geringe Temperaturspanne gemessen.

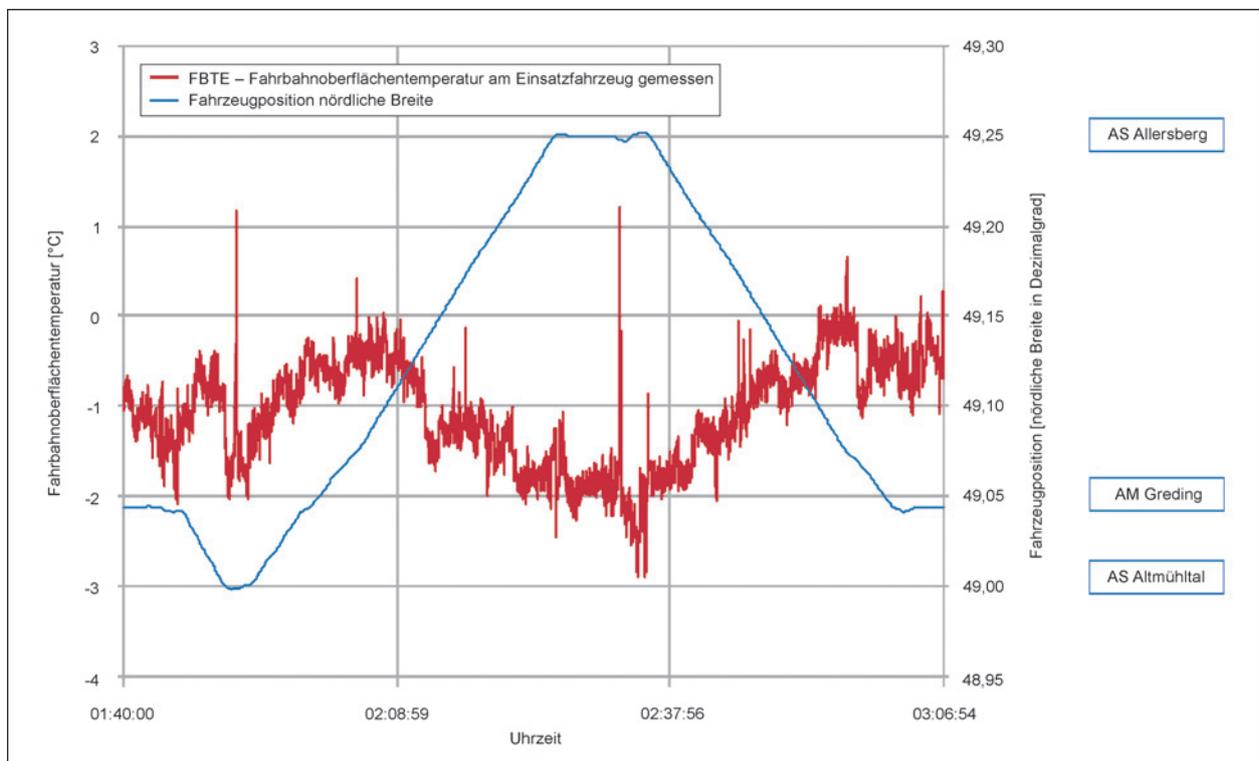


Bild 10-7: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 29.12.2017

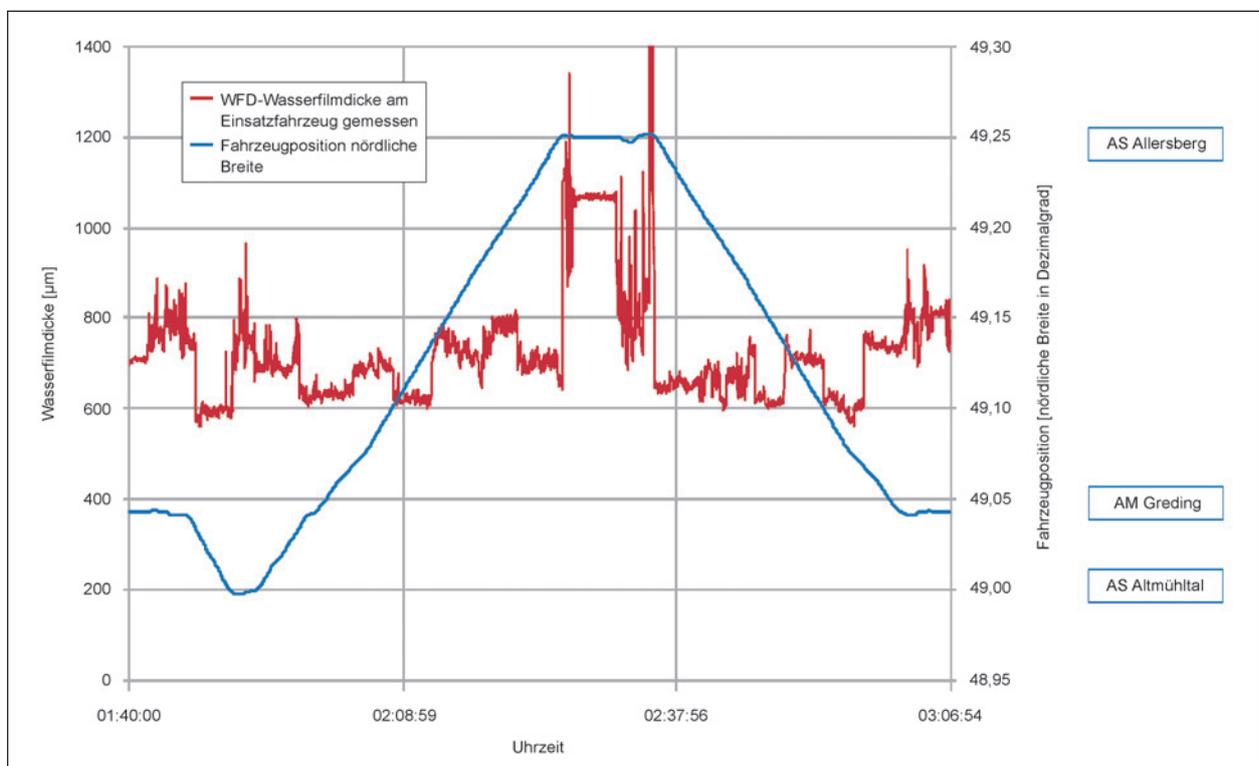


Bild 10-8: Gemessene Wasserfilmdicke bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 29.12.2017

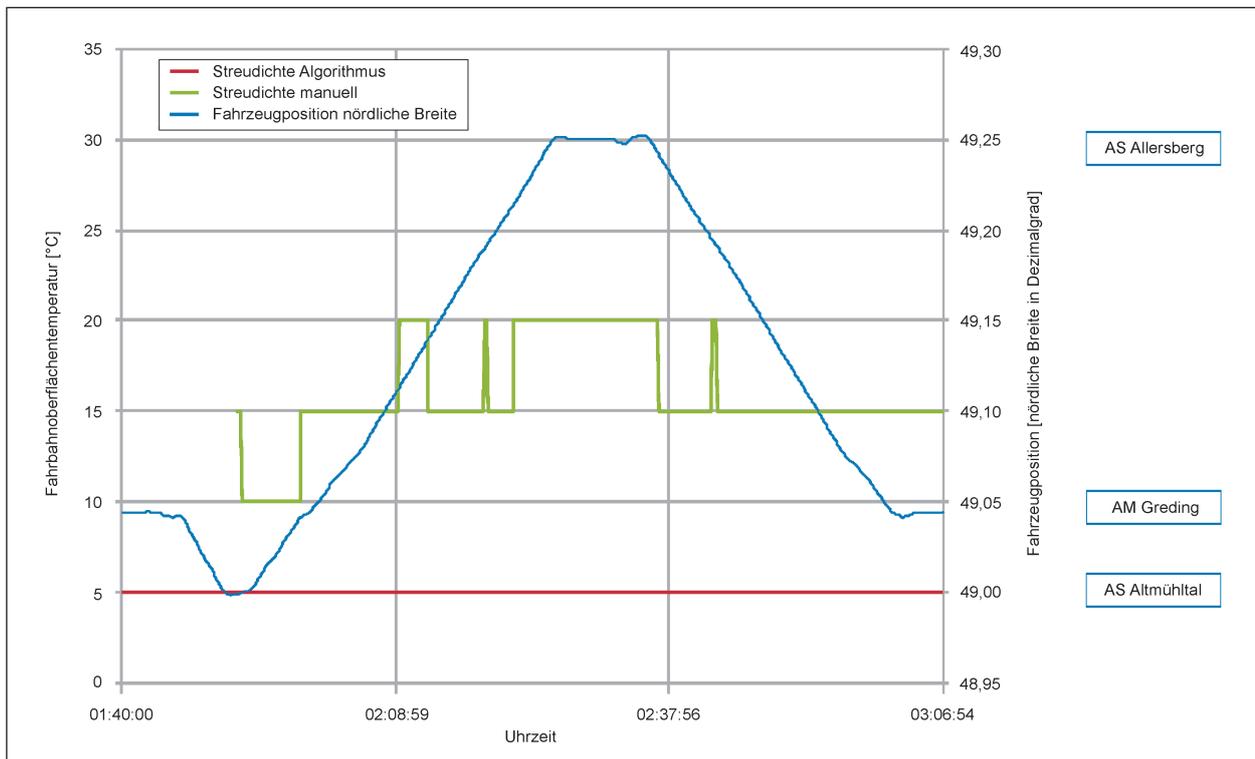


Bild 10-9: Vergleich zwischen berechneter und manuell eingestellter Streudichte bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 29.12.2017

#### Einsatzfahrt am 16.01.2018 von 15:45 Uhr bis 24:00 Uhr auf der A 9 zwischen AS Bindlacher Berg und AS Naila/Selbitz

- Grunddaten
  - Fahrbahnoberflächentemperatur (am Fahrzeug gemessen): ca. -3,0 bis +1,0 °C auf der Hauptfahrbahn,
  - Prognose Temperatur (3h): -1,0 bis + 2,0 °C,
  - Fahrbahnzustand (MARWIS): trocken, nass, chemisch nass, kritisch nass, schnee-/eisbedeckt, eisbedeckt, schneebedeckt (häufig wechselnd),
  - Prognose Fahrbahnzustand: nass, Eis, Schnee,
  - Streumodus: kurativ, präventiv (häufig wechselnd),
  - Streutechnologie: FS30 und FS100 (gelegentlich wechselnd),
  - Einsatzgrund: Schneefall.

#### Grafischer Datenüberblick (Bild 10-10 bis Bild 10-12)

#### Einsatzfahrt am 04.02.2018 von 04:35 Uhr bis 10:50 Uhr auf der A 9 zwischen AS Münchberg Süd und TRM „Hirschberg“

- Grunddaten
  - Fahrbahnoberflächentemperatur (am Fahrzeug gemessen): -7,5 bis +1,5 °C,
  - Prognose Temperatur (3h): -4,0 bis + 2,0 °C,
  - Fahrbahnzustand (MARWIS): trocken, nass, chemisch nass, kritisch nass, schnee-/eisbedeckt, eisbedeckt (häufig wechselnd),
  - Prognose Fahrbahnzustand: Schnee,
  - Streumodus: kurativ, präventiv (häufig wechselnd),
  - Streutechnologie: FS30 und FS100 (häufig wechselnd),
  - Einsatzgrund: Schneefall.

#### Grafischer Datenüberblick (Bild 10-13 bis Bild 10-16)

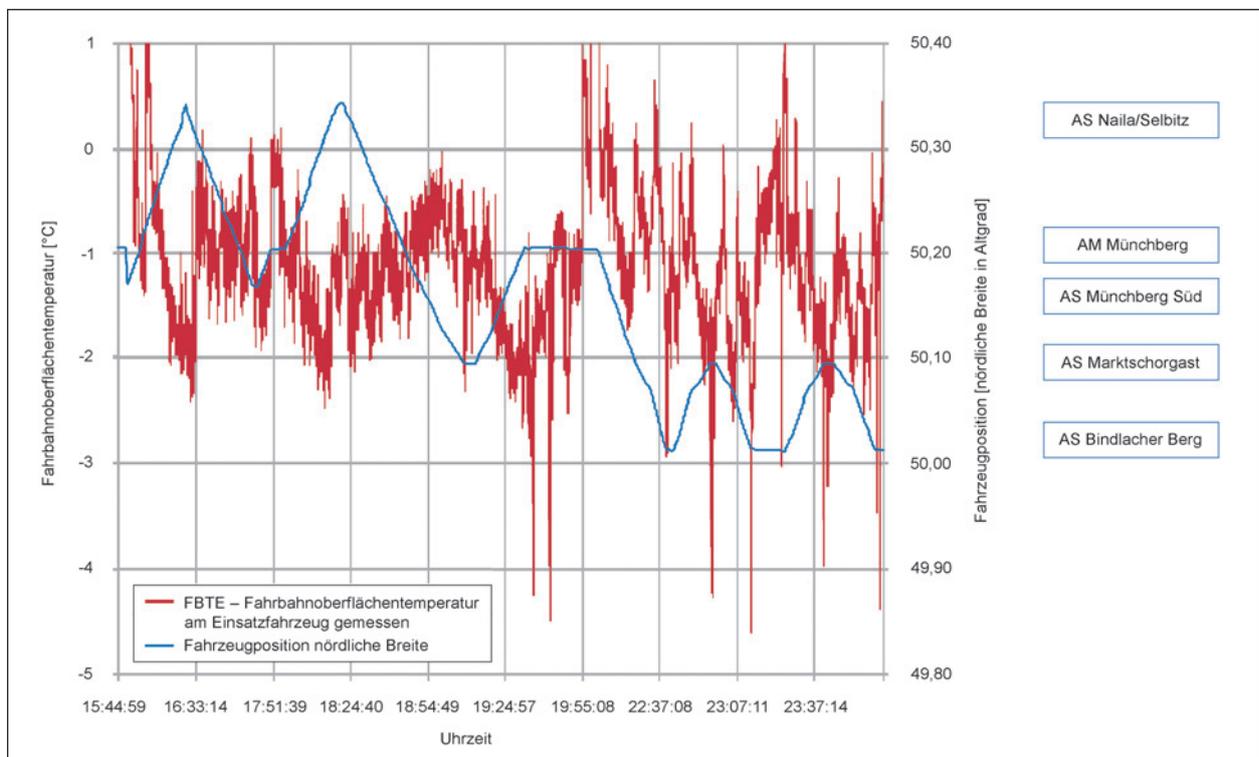


Bild 10-10: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 16.01.2018

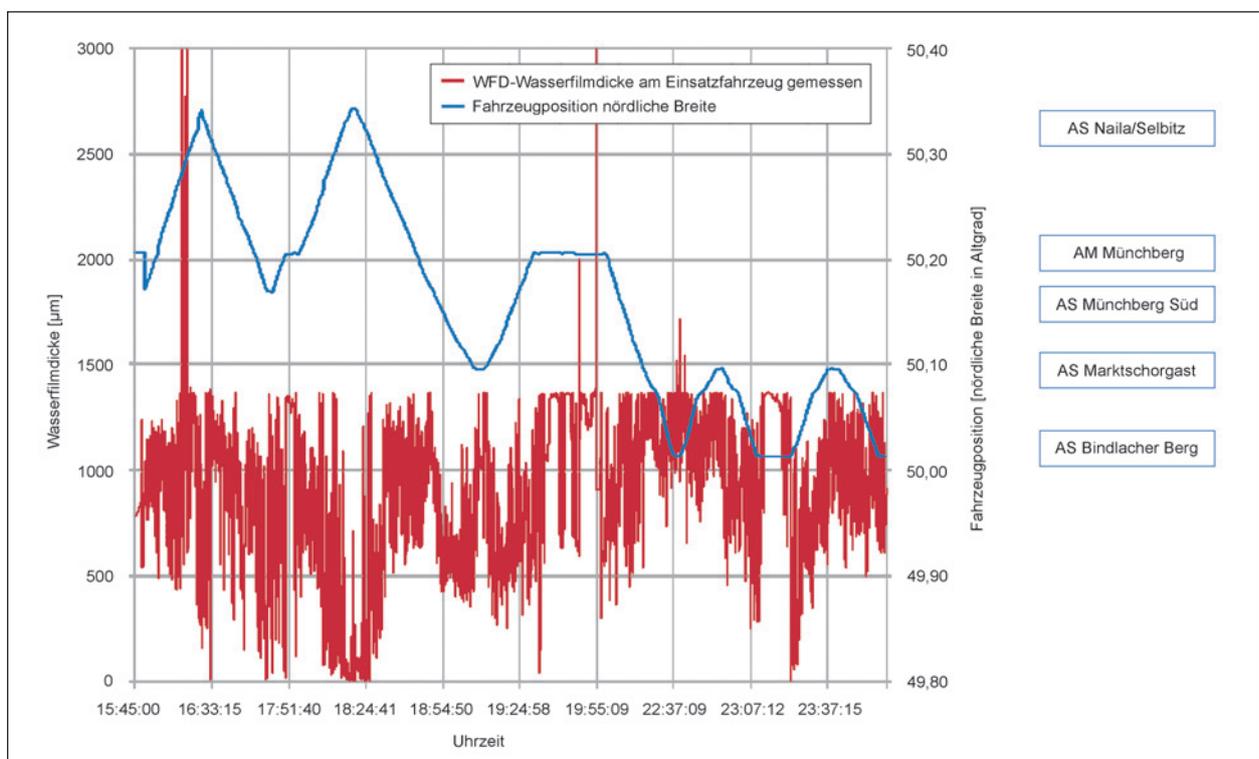


Bild 10-11: Gemessene Wasserfilmdicke bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 16.01.2018

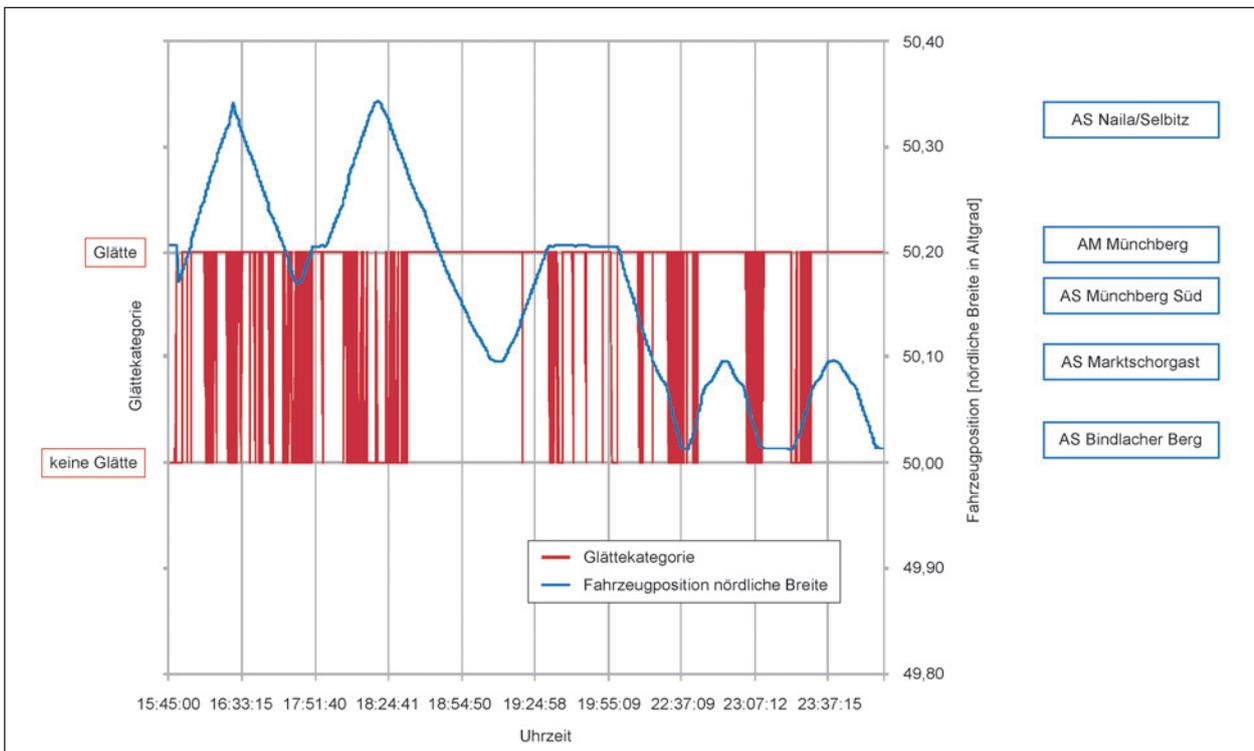


Bild 10-12: Häufiger Wechsel der Glätteategorie bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 16.01.2018

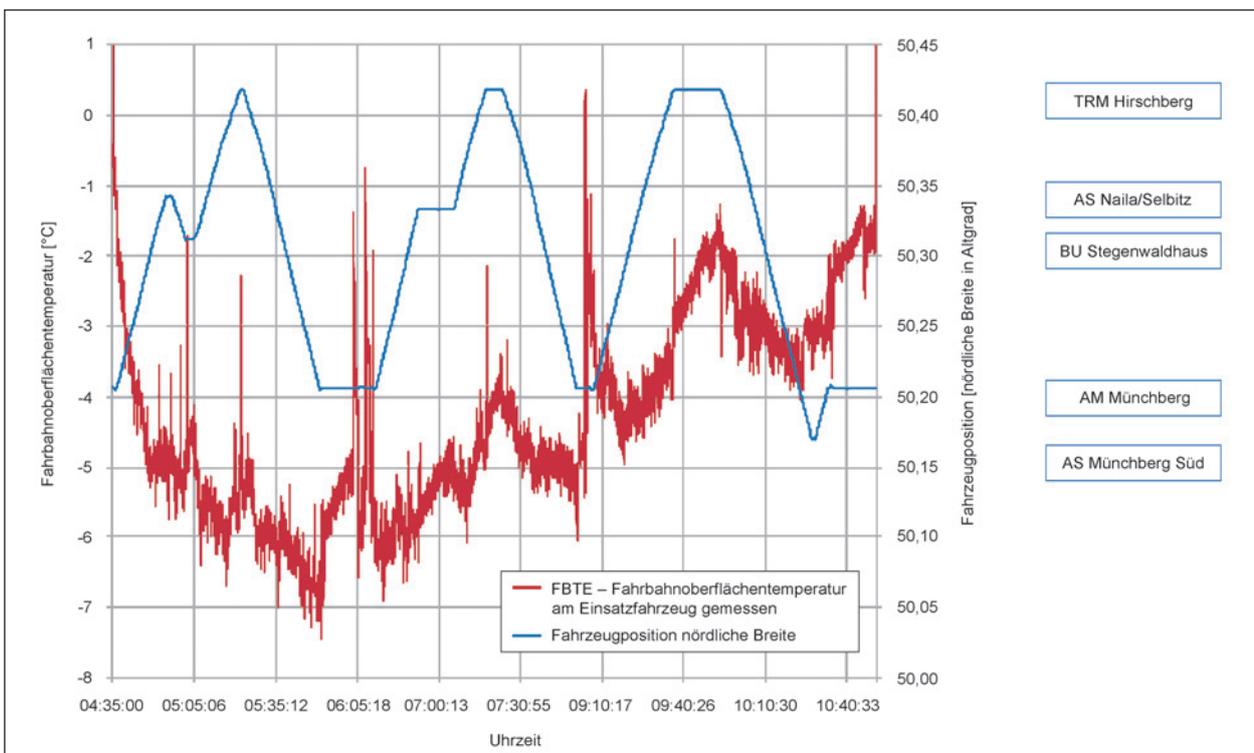


Bild 10-13: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 04.02.2018

Aus der grafischen Darstellung (Bild 10-13) ist zu entnehmen, dass die höheren Temperaturen auf dem Betriebshof und den Wendepunkten und Anschlussstellen auftreten. Die gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur oszilliert kurzzeitig um

ca. 1 K. Im gesamten Verlauf der Einsätze treten auf den Hauptfahrbahnen topografisch und zeitbedingt Schwankungen der Fahrbahnoberflächentemperatur von etwa 6 K auf.

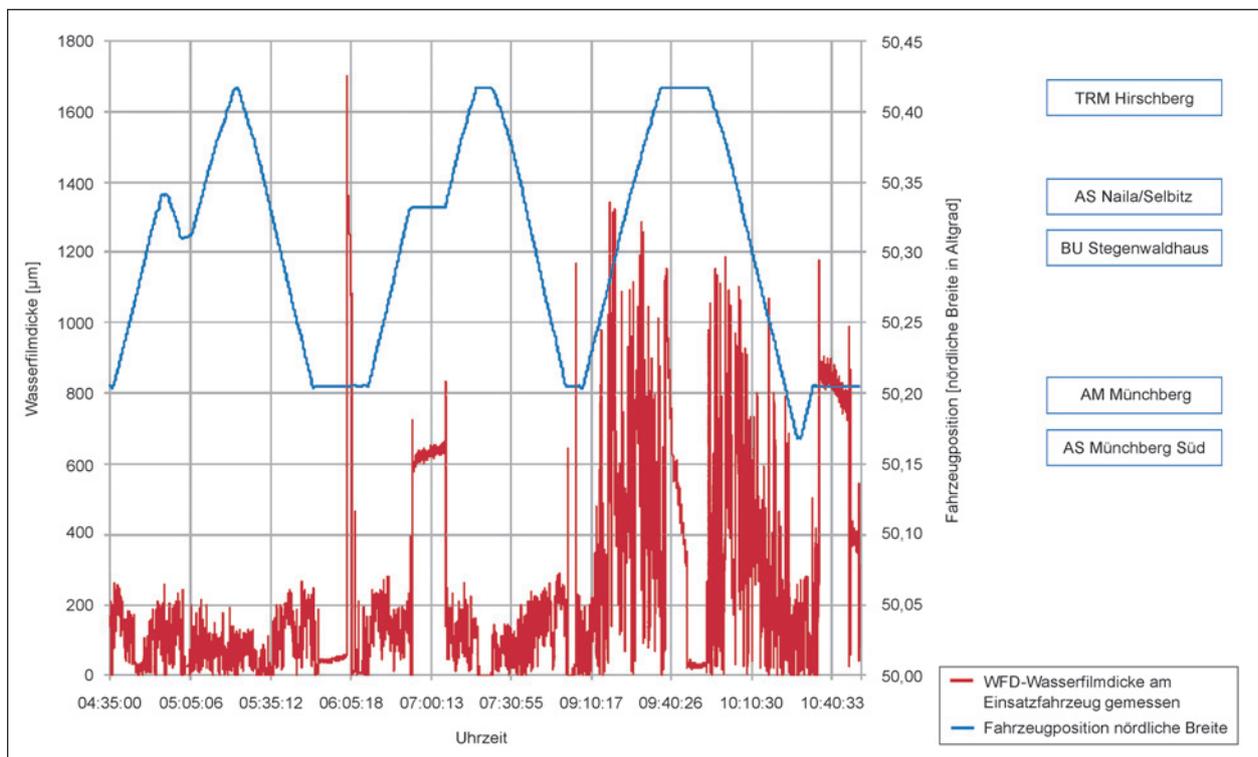


Bild 10-14: Gemessene Wasserfilmdicke bei einer Einsatzfahrt der AM Münchenberg am 04.02.2018

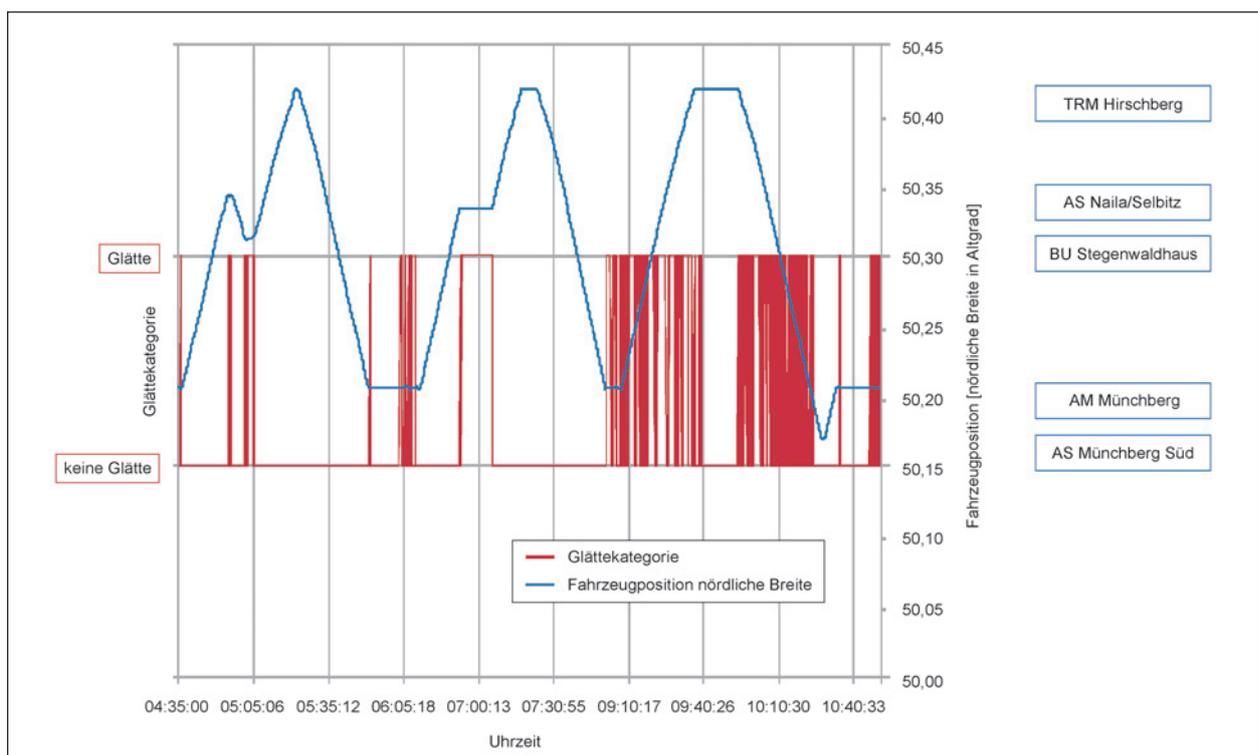


Bild 10-15: Häufiger Wechsel der Glätte-kategorie bei einer Einsatzfahrt der AM Münchenberg am 04.02.2018

Aus dem Diagramm (Bild 10-14) ist zu entnehmen, dass während der beiden ersten Umläufe nur Wasserfilmdicken bis ca. 200  $\mu\text{m}$  vorhanden sind. Das deutet darauf hin, dass in dieser Zeit kein oder nur

geringer Niederschlag fiel. Beim dritten Umlauf ab ca. 09:05 Uhr wurden wesentlich größere Wasserfilmdicken gemessen, die auf Schneeniederschlag hindeuten.

Als problematisch stellt sich die große Schwankungsbreite bei der Messung der Wasserfilmdicke dar. Sie wird während des Niederschlages besonders groß. Die Werte können dann wahrscheinlich nicht ungefiltert verarbeitet werden.

In Bild 10-15 ist die Glätteklasse in Abhängigkeit von Uhrzeit und Fahrzeugposition nach den gleichen Prinzipien dargestellt wie in Kapitel 10.2 beschrieben. Hier ist bemerkenswert, dass bei den ersten beiden Umläufen, abgesehen von den Betriebshöfen Anschluss- und Wendestellen stabil als „keine winterliche Glätte“ angezeigt wird. Das heißt „trocken“, „feucht“, „nass“ oder „chemisch nass“. Beim dritten Umlauf mit Schneeniederschlag gibt es einen sehr häufigen Wechsel der beiden Glätteklassen.

Der Wechsel der Glätteklasse führt beim Ergebnis der Streudichteberechnung zu erheblichen Schwankungen (Bild 10-16). In den Morgenstunden zwischen 04:00 und 09:00 Uhr wurde trockene Fahrbahn festgestellt und die Streudichte auf Basis des Rechenweges für präventive Streuung ermittelt. Durch einen beginnenden Niederschlag ab ca. 09:00 verändert sich der Straßenzustand. Damit wurde die Streudichte häufiger für kurative Streuung berechnet. Das führt in Verbindung mit Temperatur und Wasserfilmdicke zu höheren Werten, die jedoch stark schwanken, da der Fahrbahnzustand und die Wasserfilmdicken stark wechseln.

In Tabelle 10-3 ist das beispielhaft mit 20 von 16.828 Datenzeilen dargestellt, die in der Zeit von 04:35:00 Uhr bis 10:50:00 Uhr aufgezeichnet wurden.

Der Tabellenausschnitt (Tabelle 10-3) zeigt einen im Takt von einzelnen oder wenigen Sekunden wechselnden Fahrbahnzustand. Das hat deutliche Auswirkungen auf den Streumodus, die Streutechnologie und die Streudichte (Bild 10-16). Eine besonders deutliche Auswirkung des festgestellten Fahrbahnzustandes zeigt sich darin, dass ein Fahrbahnzustand, der präventive Streuung auslöst (hier chemisch nass), auch Einfluss auf die Berechnungstemperatur hat. Bei kurativer Streuung wird mit der aktuellen Temperatur gerechnet. Bei präventiver Streuung wird der prognostizierte Temperaturverlauf der folgenden 3 Stunden berücksichtigt. In diesem Fall wird ein Temperaturanstieg von 3 K erwartet. Damit ändert sich die Berechnungsgrundlage sehr deutlich. Damit stellt sich die Frage, ob der detektierte Fahrbahnzustand als Berechnungsgrundlage für den Algorithmus geeignet ist bzw. ob er auf andere Weise im Algorithmus verarbeitet werden sollte.

Es wäre auch denkbar, dass die Frage, ob der Einsatz auch im Detail als kurativ oder präventiv zu bewerten ist, wie bisher pauschal vom Einsatzpersonal vor Beginn des Einsatzes entschieden wird. Damit würde jedoch auf eine individuelle Berücksichtigung wechselnder Verhältnisse verzichtet.

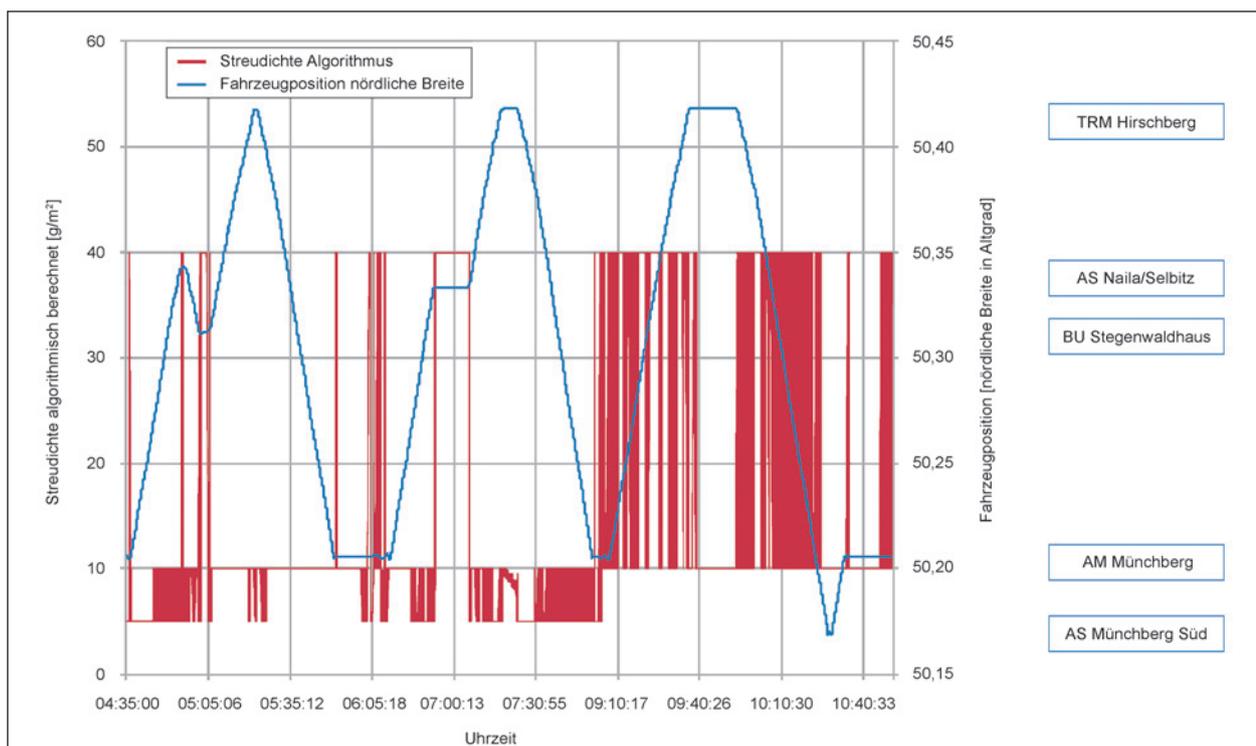


Bild 10-16: Berechnete Streudichte bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 04.02.2018

Uhrzeit	Fahrbahnzustand	Fahrbahnoberflächentemperatur	Wasserfilmdicke	Berchnungstemperatur	Streu-modus	Streu-technologie	Streudichte algorithmisch berechnet
09:12:25	eisbedeckt	-3,58	305,91	-3,58	kurativ	FS30	40
09:12:26	eisbedeckt	-3,62	210,07	-3,62	kurativ	FS30	40
09:12:28	chemischnass	-3,76	208,72	-0,76	praeventiv	FS100	10
09:12:28	chemischnass	-3,76	208,72	-0,76	praeventiv	FS100	10
09:12:29	eisbedeckt	-3,8	336,96	-3,8	kurativ	FS30	40
09:12:31	eisbedeckt	-3,28	250,71	-3,28	kurativ	FS30	40
09:12:31	eisbedeckt	-3,28	250,71	-3,28	kurativ	FS30	40
09:12:32	schneeeisbedeckt	-3,8	240,93	-3,8	kurativ	FS30	40
09:12:34	eisbedeckt	-3,76	206,29	-3,76	kurativ	FS30	40
09:12:34	eisbedeckt	-3,76	206,29	-3,76	kurativ	FS30	40
09:12:35	eisbedeckt	-3,8	151,53	-3,8	kurativ	FS30	40
09:12:37	eisbedeckt	-3,8	219,57	-3,8	kurativ	FS30	40
09:12:37	eisbedeckt	-3,8	219,57	-3,8	kurativ	FS30	40
09:12:38	schneeeisbedeckt	-3,63	224,62	-3,63	kurativ	FS30	40
09:12:40	schneeeisbedeckt	-3,84	215,19	-3,84	kurativ	FS30	40
09:12:40	schneeeisbedeckt	-3,84	215,19	-3,84	kurativ	FS30	40
09:12:41	eisbedeckt	-3,97	232,53	-3,97	kurativ	FS30	40
09:12:43	chemischnass	-3,97	45,74	-0,97	praeventiv	FS100	10
09:12:43	chemischnass	-3,97	45,74	-0,97	praeventiv	FS100	10
09:12:44	chemischnass	-4,02	30,94	-1,02	praeventiv	FS100	10

Tab. 10-3: Beispiel für kurzzeitig wechselnde Eingangsdaten

### Einsatzfahrt am 17.02.2018 von 18:35 Uhr bis 23:59 Uhr auf der A 9 zwischen AM Greding und AS Allersberg

- Grunddaten
  - Fahrbahnoberflächentemperatur (am Fahrzeug gemessen): +2,9 °C bis -1,7 °C,
  - Prognose Temperatur (3 h): +1,0 °C bis -2,0 °C (im Betrachtungszeitraum fallende Tendenz),
  - Fahrbahnzustand (MARWIS): nass, chemisch nass, kritisch nass, schnee-/eisbedeckt, eisbedeckt (häufig wechselnd),
  - Prognose Fahrbahnzustand: nass, Schnee, Eis,
  - Streumodus: kurativ, präventiv (häufig wechselnd),
  - Streutechnologie: FS30 (FS100 technisch nicht möglich),
  - Einsatzgrund: zeitweise Schneefall.

### Grafischer Datenüberblick

(Bild 10-17 bis Bild 10-19)

Aus dem Temperaturverlauf in Verbindung mit der Fahrzeugposition ist abzulesen, dass die niedrigsten Temperaturen auf dem Betriebshof Greding, beim Wenden in den Anschlussstellen (AS Altmühltal, AS Allersberg) und bei der Befahrung des Parkplatzes und der AS Hipoldstein gemessen werden. Die Befahrung des Parkplatzes und der AS Hipoldstein ist durch die leichte Stufung der blauen Positionslinie zu erkennen (Bild 10-17). Das sind zugleich auch die Positionen, auf denen die größten Wasserfilmdicken gemessen wurden (Bild 10-18). Das spricht dafür, dass dort Schneematsch oder Schnee angetroffen wurde.

Die errechnete Streudichte wechselt an den genannten Stellen sehr schnell von 5 auf 40 g/m<sup>2</sup>. Bei der manuell eingestellten Streudichte ist kaum eine Konformität mit der errechneten Streudichte zu erkennen. Es ist jedoch zu erkennen, dass aus nachvollziehbaren Umständen auf dem Betriebshof nicht und an den Wendepunkten nur teilweise gestreut wurde (Bild 10-19).

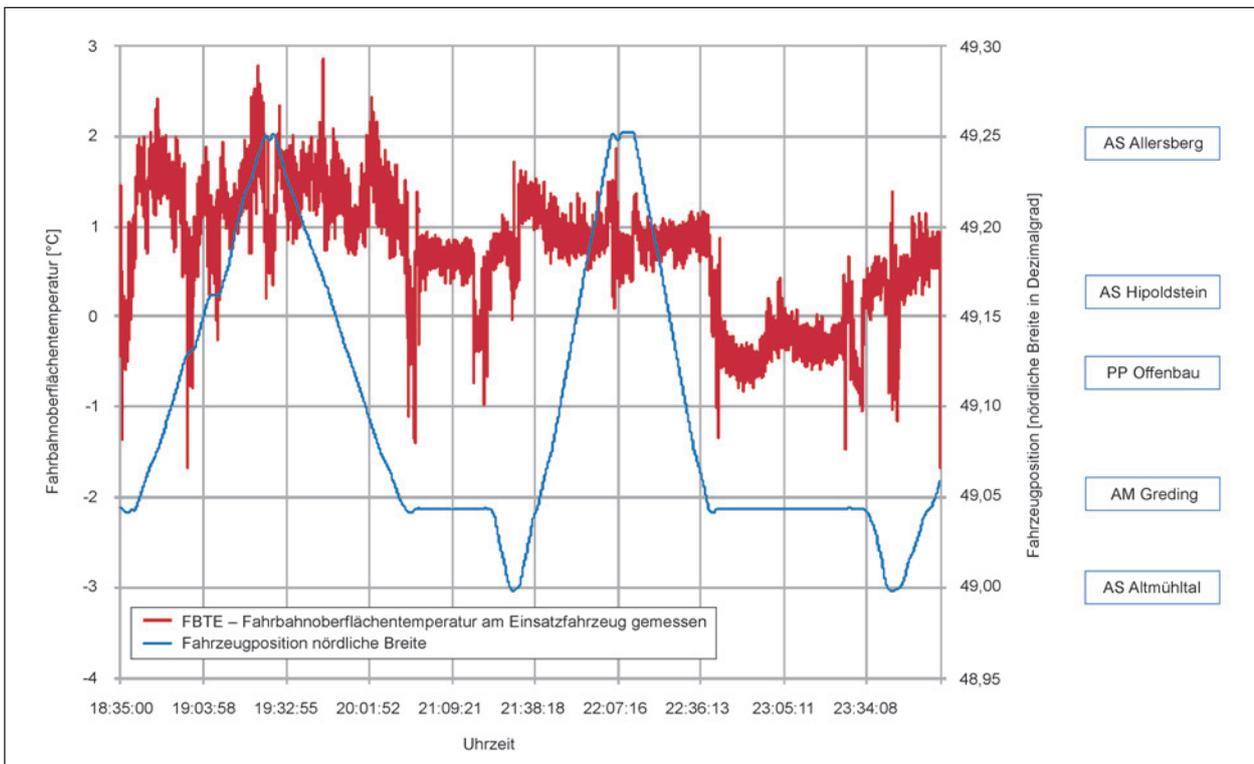


Bild 10-17: Verlauf der mit dem MARWIS-Sensor gemessenen Fahrbahnoberflächentemperatur bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 17.02.2018

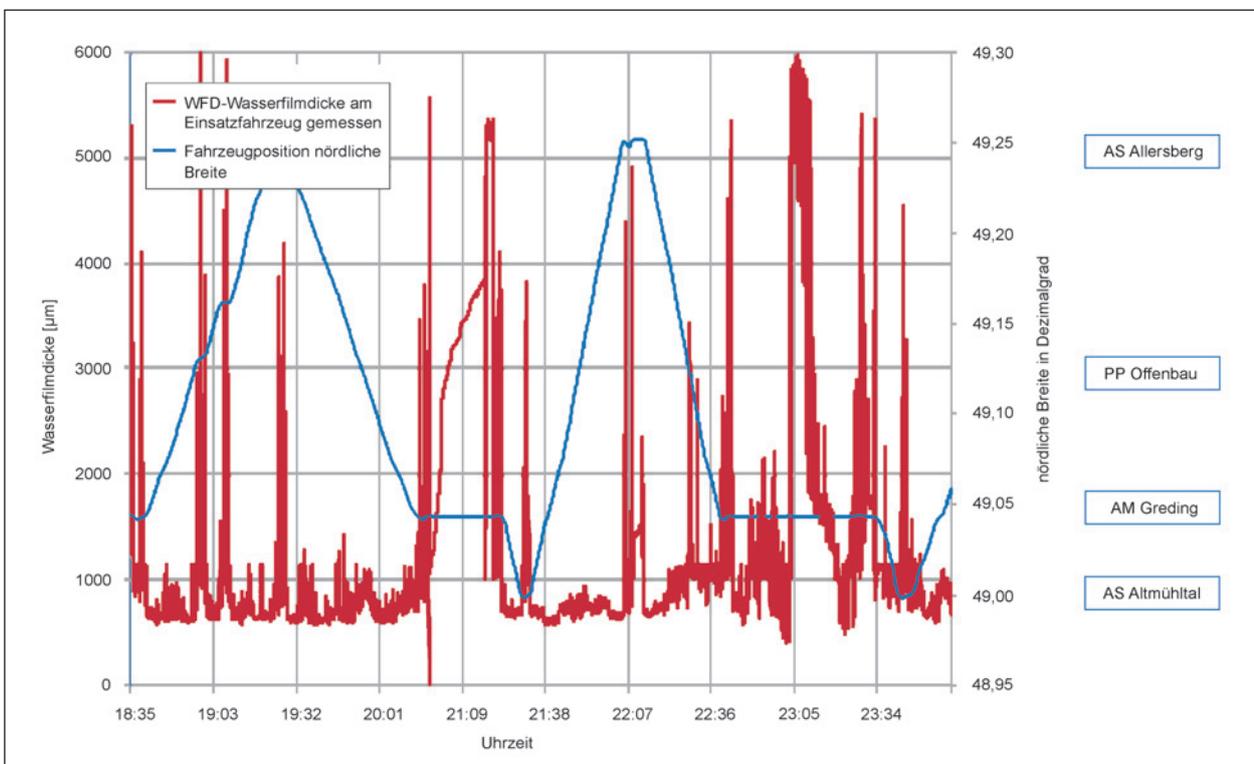


Bild 10-18: Mit dem MARWIS-Sensor gemessene Wasserfilmdicken bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 17.02.2018

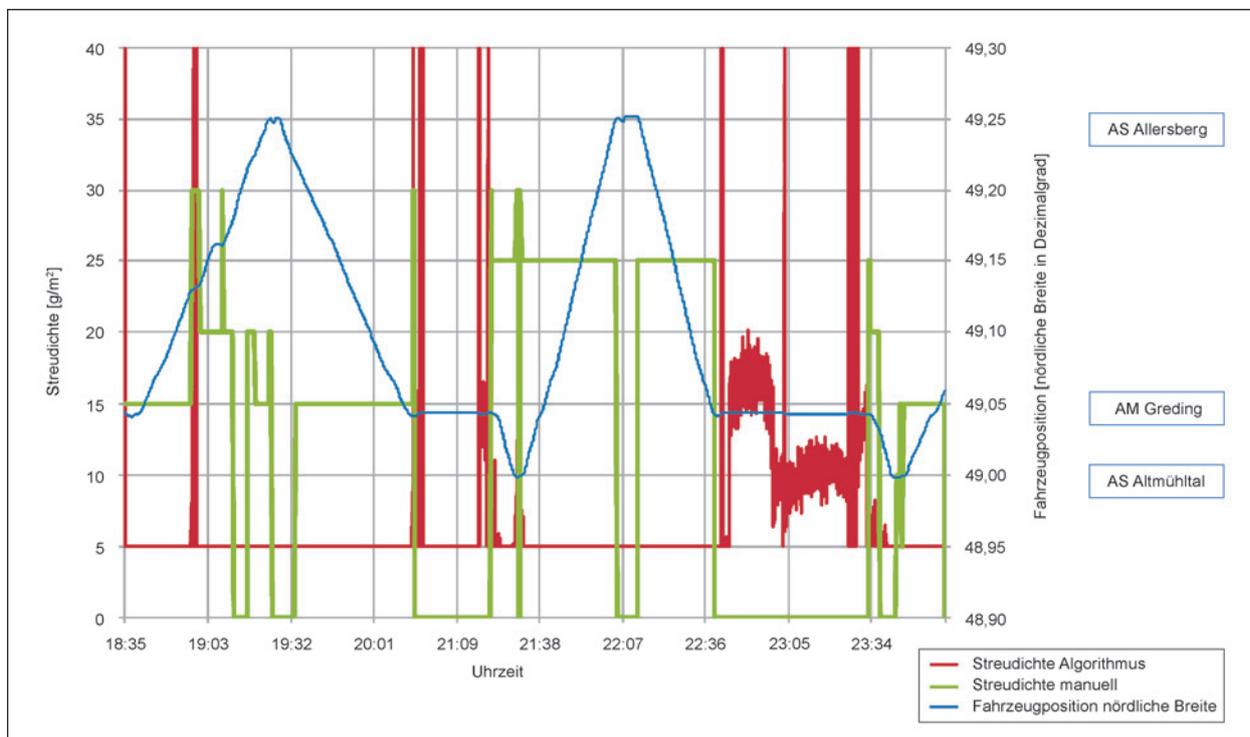


Bild 10-19: Gegenüberstellung der manuell eingestellten Streudichten mit den durch den Algorithmus errechneten Streudichten bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 17.02.2018

### 10.3 Vergleich der vom Fahrpersonal eingestellten Streudichte mit der über den Algorithmus errechneten Streudichte

Sowohl in der AM Greding als auch in der AM Münchenberg wird die Streudichte vom Fahrpersonal manuell eingestellt. Die vorhandenen temperaturabhängigen Steuerungen (Küpper Weisser – „Thermomat“; Aebi Schmidt – „Thermologic“) werden äußerst selten genutzt.

Auf dem Fahrzeug der AM Greding ist nur eine zeitlich äußerst kurze Sequenz aufgezeichnet worden, aus der hervorgeht, in welcher Spanne und in welchen kurzen Intervallen sich die durch Thermomat gesteuerte Streudichte bewegt. Die Werte bewegen sich zwischen 11 und 25  $\text{g}/\text{m}^2$  (Bild 10-20).

Die zusätzliche Einbeziehung der Wasserfilmdicke in die Berechnung der optimalen Streudichte hat zu einer wesentlich größeren Schwankungsbreite der Streudichte innerhalb von Sekunden geführt. Der über den Algorithmus errechnete Wert für die Streudichte ist unter diesen Umständen ebenfalls stark schwankend. Oft schwankt er innerhalb von Sekunden zwischen dem Minimalwert von 5  $\text{g}/\text{m}^2$  und dem Maximalwert von 40  $\text{g}/\text{m}^2$ . Der Messwert für die

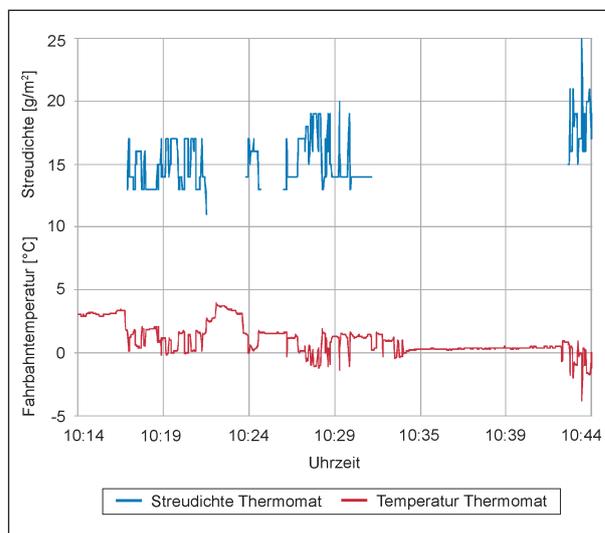


Bild 10-20: Einsatzfahrt AM Greding am 18.01.2018 – durch Thermomat gesteuerte Streudichte

Wasserfilmdicke kann zum Beispiel durch die Messung in der Rollspur erheblich nach oben gehen und ist dann für die gesamte Fahrbahnbreite nicht mehr repräsentativ.

Es besteht deshalb die Frage, wie dieser Wert so qualifiziert werden kann, dass eine optimale Verwendung im Algorithmus möglich ist. Im Einzelnen sind folgende Probleme zu lösen:

- Kontrolle und Sicherung der Qualität der Messung,
- Ermittlung eines repräsentativen Wertes der Wasserfilmdicke über den Fahrbahnquerschnitt (evtl. Anordnung mehrerer Sensoren) und
- Ermittlung eines repräsentativen Wertes der Wasserfilmdicke in Längsrichtung der Fahrbahn.

Ein weiterer Auslöser von großen Schwankungen der errechneten Streudichte ist der Wechsel von Straßenzuständen ohne Glätte auf Straßenzustände mit Glätte. Das ist grundsätzlich ein normaler Vorgang. Er wird jedoch dann zum Problem, wenn diese Wechsel in alle Richtungen im Sekundentakt erfolgen und damit kein verwertbares Gesamtbild des Straßenzustandes auf einem Streckenabschnitt erkennbar wird. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob der Straßenzustand tatsächlich über die gesamte Fahrbahnbreite so schnell wechselt oder der Sensor wegen des kleinen Messfleckes häufig nicht repräsentative Teilflächen erfasst. Auch Falschmessungen sind nicht auszuschließen. Insofern besteht weiterhin der Bedarf, die Sensortechnik hinsichtlich der Qualität der Ausgabedaten zu untersuchen.

Bei einer tieferen Analyse der Daten zeigen sich einige interessante Zusammenhänge, die Einfluss

auf die Bewertung der auf den ersten Blick etwas diffusen Ergebnisse der algorithmisch berechneten Streudichte haben. Die in Bild 10-19 dargestellte manuelle Streudichte (grüner Strich) zeigt, dass der Fahrer augenscheinlich sehr differenziert auf unterschiedliche Wahrnehmungen eingegangen ist. Der Wert für die Streudichte wird manuell zwischen 15 und 30 g/m<sup>2</sup> reguliert.

Die algorithmisch berechnete Streudichte liegt für alle Zeitpunkte vor. Auch dann, wenn an einer Anschlussstelle gewendet wurde oder sich das Fahrzeug auf dem Betriebsgelände der Autobahnmeisterei Greding bzw. an der AS Altmühltal befand. In Bild 10-19 ist grob zu erkennen, dass Streudichten über 5 g/m<sup>2</sup> zumeist in diesen Situationen errechnet wurden (blauer Strich ist waagrecht). Nach einer Datenfilterung mit der Bedingung „Streudichte Algorithmus“ > 5 g/m<sup>2</sup> zeigt sich, dass diese Werte tatsächlich vor allem beim Aufenthalt in der Autobahnmeisterei errechnet wurden. Das wird dadurch deutlich, dass das Fahrzeug unter dieser Bedingung entweder steht oder sich nur mit sehr geringer Geschwindigkeit bewegt (blauer Strich waagrecht) und sich in den Koordinaten der Autobahnmeisterei Greding oder an der Anschlussstelle Altmühltal befindet.

In Bild 10-21 ist auch zu erkennen, dass es sich um Zeiträume handelt, in denen manuell größten-

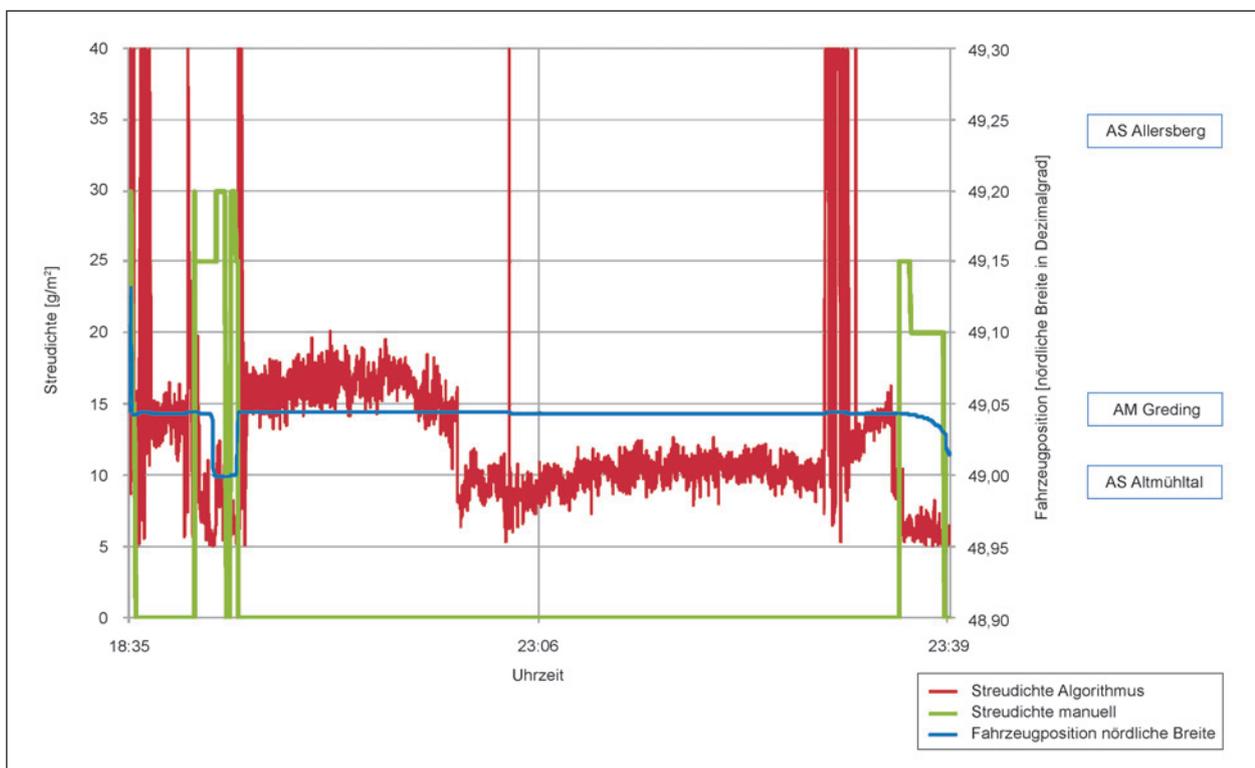


Bild 10-21: Einsatzfahrt am 17.02.2018 – Position des Fahrzeuges bei errechneten Streudichten > 5 g/m<sup>2</sup>

teils nicht gestreut wurde. Das heißt im Umkehrschluss auf der freien Strecke (Hauptfahrbahnen) wurde im Algorithmus fast durchgängig und konstant  $5 \text{ g/m}^2$  errechnet (Bild 10-19). Manuell waren in dieser Zeit Dosierwerte von 15 bis  $30 \text{ g/m}^2$  eingestellt.

In Bild 10-22 wird dargestellt, welche manuelle Streudichte eingestellt war, als die vom Algorithmus berechnete Streudichte  $5 \text{ g/m}^2$  betrug. Aus der Grafik geht auch hervor, dass das vor allem bei der Bearbeitung der Hauptfahrbahn zwischen den Anschlussstellen der Fall war (stetig steigende oder abfallende blaue Linie).

Die Frage ist, ob die geringe vom Algorithmus errechnete Streudichte von  $5 \text{ g/m}^2$  den Anforderungen genügen würde.

Die Streudichte  $5 \text{ g/m}^2$  wurde für die Situationen errechnet, bei denen die Temperaturen entweder  $> 0 \text{ }^\circ\text{C}$  waren oder der Fahrbahnzustand mit „chemisch nass“ (MARWIS) festgestellt wurde. Darüber hinaus war innerhalb von 3 Stunden auch keine oder keine wesentliche Temperaturabsenkung zu erwarten. Die niedrigste Temperatur lag bei  $-1,4 \text{ }^\circ\text{C}$  bei einem Straßenzustand „chemisch nass“. Nach der Wasserfilmdicke zu urteilen handelte es sich um mit Salz versetzten Schneematsch. Zumeist lag die

aktuelle und zu erwartende Temperatur jedoch über  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  (siehe Bild 10-23).

Unter den gegebenen Randbedingungen erscheint die geringe Dosierung von  $5 \text{ g/m}^2$  als gerechtfertigt. Das zeigt einerseits, dass zu den nach Erfahrung und Augenschein gewählten Streudichten ein großer Spielraum besteht. Andererseits stellt sich die Frage, ob genügend Sicherheitsabstand zu einer möglichen Glättebildung gewahrt ist.

Ein Beispiel für die erwähnten starken Schwankungen der Streudichte bietet die Analyse der Daten einer Einsatzfahrt, die am 30.12.2018 von der AM Greding in der Zeit von 0:10 bis 0:50 Uhr zwischen den Anschlussstellen Denkendorf und Greding (Bild 10-24). Die Streudichte variiert sehr häufig zwischen  $5$  und  $40 \text{ g/m}^2$ .

Die Ursache liegt hier in dem ebenso häufig wechselnden Fahrbahnzustand nach entsprechender Ausgabe des MARWIS-Sensors. Die Fahrbahnzustände eisbedeckt, schnee-, eisbedeckt und kritisch nass werden im Algorithmus als Glättezustände eingestuft und mit der Formel für kurative Streuung berechnet. In dem Fall unter Berücksichtigung der Temperatur und den Wasserfilmdicken mit Ergebnissen zwischen  $5$  und  $40 \text{ g/m}^2$  (Bild 10-25).

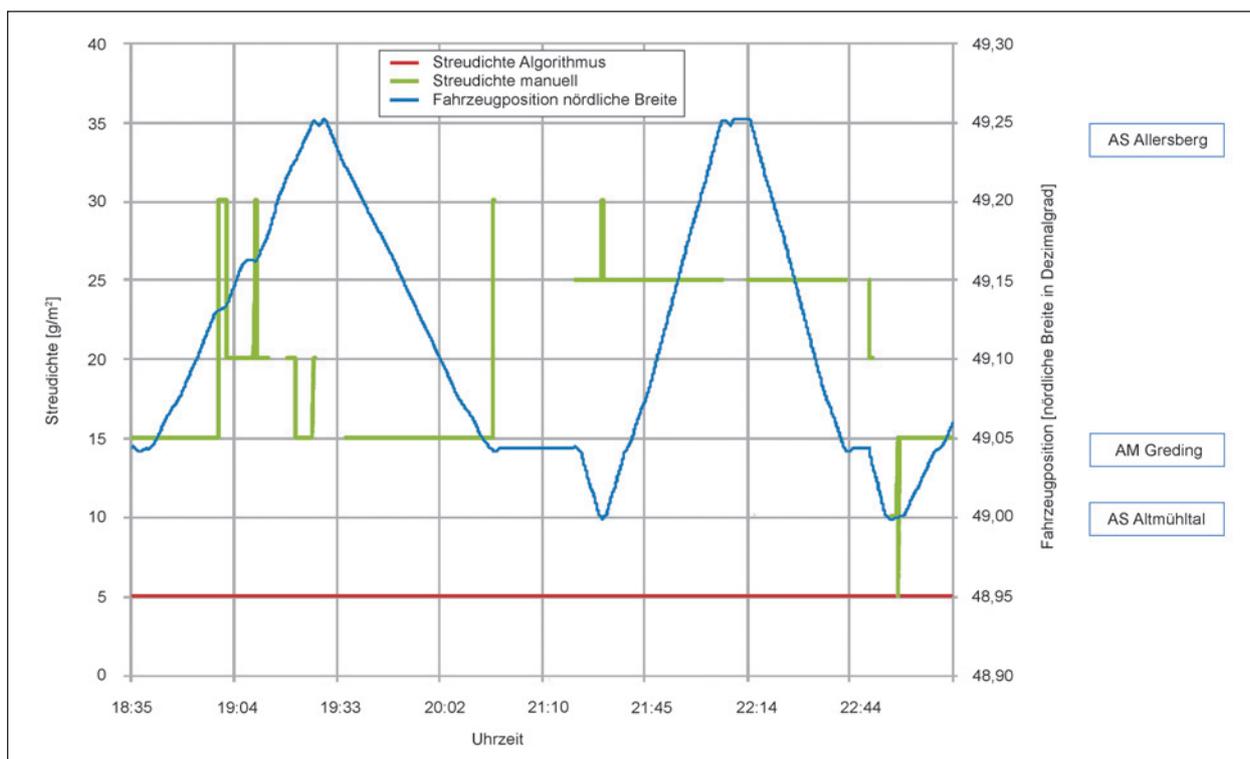


Bild 10-22: Einsatzfahrt AM Greding am 17.02.2018 – manuell eingestellte Streudichte und Fahrzeugposition bei einer errechneten Streudichte von  $5 \text{ g/m}^2$

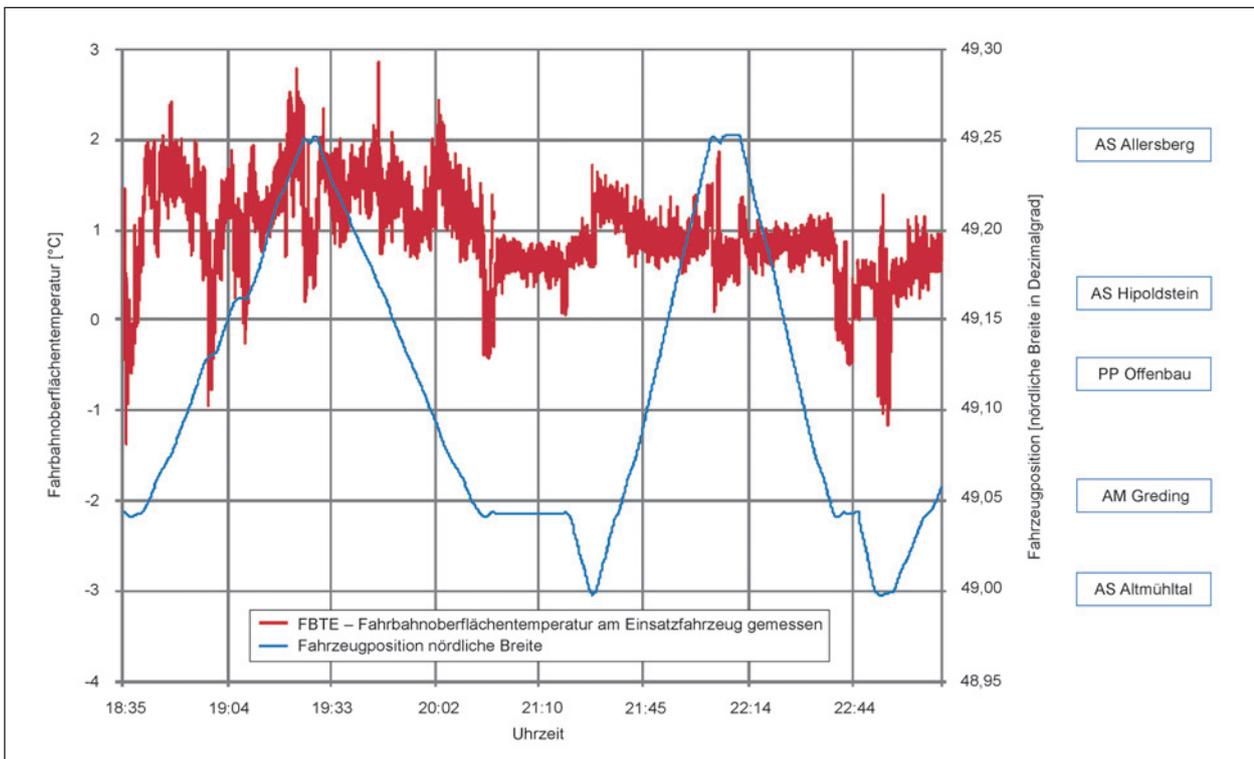


Bild 10-23: Einsatzfahrt AM Greding am 17.02.2018 – Fahrbahntemperatur und Fahrzeugposition bei einer errechneten Streudichte von 5 g/m<sup>2</sup>

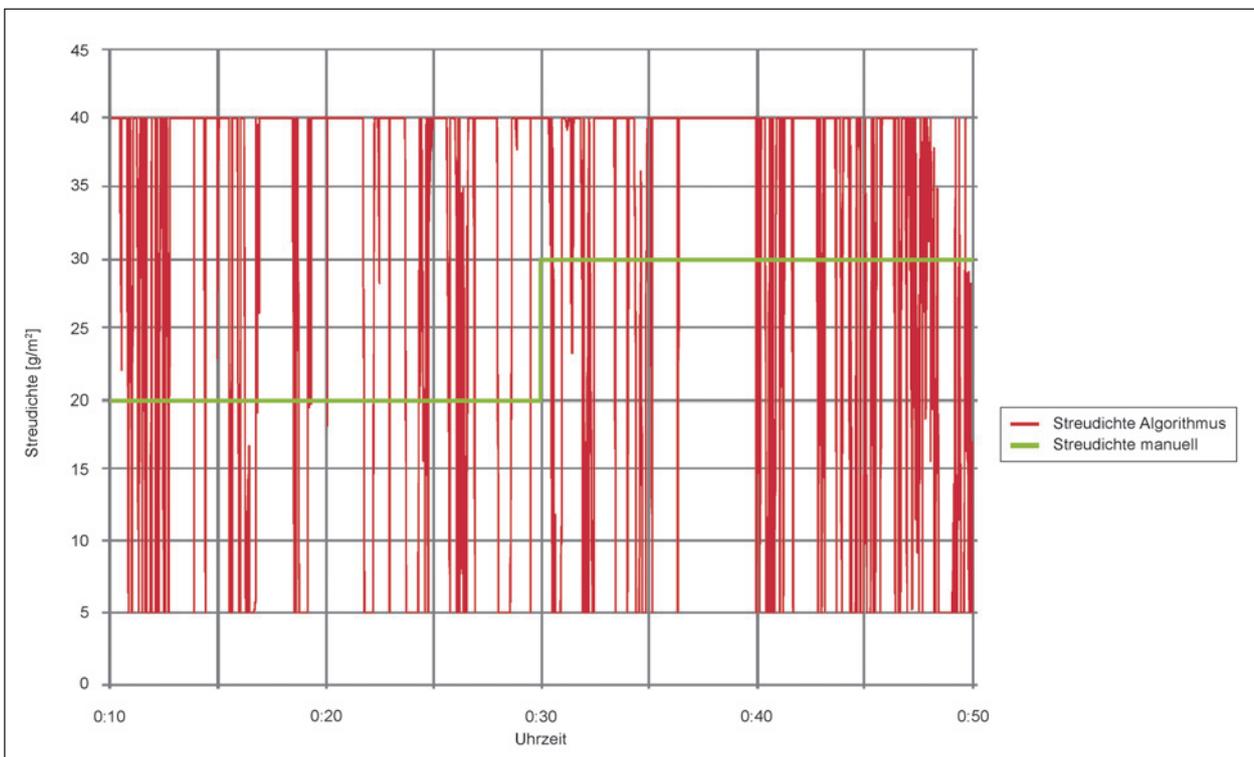


Bild 10-24: Einsatzfahrt der AM Greding am 30.12.2017 – errechnete Streudichte wechselt sehr stark, manuelle Streudichte mit geringer Variation

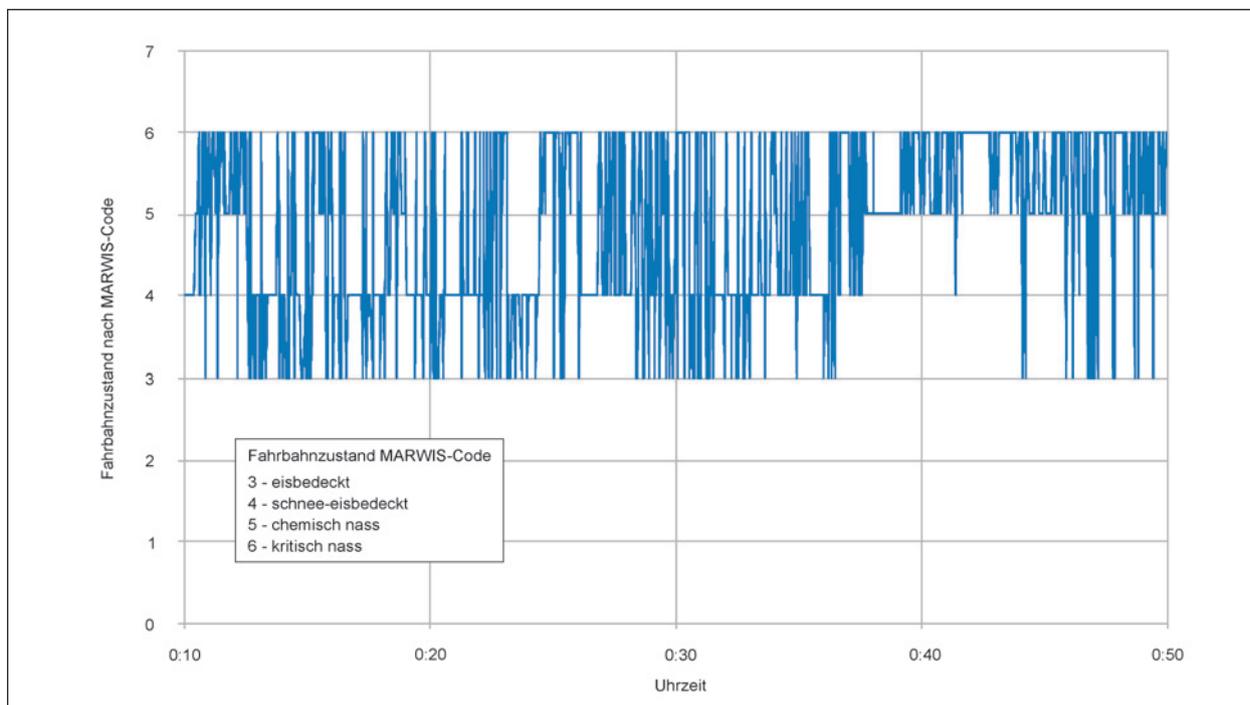


Bild 10-25: Einsatzfahrt der AM Greding am 30.12.2017 – Starke Variation der festgestellten Fahrbahnzustände

Der Fahrbahnzustand chemisch nass ist kein Glättezustand und wird mit der Formel für präventive Streuung berechnet. In dem Fall unter Berücksichtigung der zu erwartenden Temperaturen mit dem Ergebnis von nur  $5 \text{ g/m}^2$ .

## 11 Zusammenfassung

### 11.1 Allgemeine Erkenntnisse

Mit dem mobilen MARWIS-Sensor besteht die Möglichkeit, weitere witterungsbedingte Daten der Fahrbahnoberfläche bei der Berechnung der optimalen Streudichte einzubeziehen. Dafür konnten an den zwei Einsatzfahrzeugen in den Autobahnmeistereien Münchberg und Greding alle technischen Voraussetzungen geschaffen werden.

Darüber hinaus konnte der Algorithmus so gestaltet werden, dass alle Eingangsdaten unter Berücksichtigung physikalischer Zusammenhänge und den vorhandenen Erfahrungen aus der Winterdienstpraxis in die Berechnung einbezogen wurden.

Die Einbeziehung einer großen Zahl von Eingangsdaten führt zu einer hohen Sensibilität des Systems. Das drückt sich insbesondere in einer großen Schwankungsbreite der errechneten Werte aus. Ausschlaggebend dafür sind insbesondere die vom

MARWIS-Sensor gemessene Wasserfilmdicke und der angezeigte Fahrbahnzustand. Die Wasserfilmdicke zeigt sehr starke Ausschläge innerhalb kürzester Zeiträume. Der Fahrbahnzustand wechselt kurzfristig in alle Richtungen. Ausschläge von Mess- und Anzeigewerten, die nur wenige Sekunden anhalten, können wegen der mechanisch bedingten Trägheit des Fördersystems der Streumaschinen, nicht nutzbringend umgesetzt werden. Das heißt, wenn z. B. eine stark erhöhte Streudichte die Straßenoberfläche erreicht, ist der ausschlaggebende Straßenzustand an der dann erreichten Stelle nicht mehr vorhanden.

Es ist festzustellen, dass die Sensordaten, die auf einem Messfleck von nur wenigen Zentimetern Durchmesser basieren, offenbar sehr häufig nicht repräsentativ für die Straßenoberfläche in ihrer gesamten Breite sind.

Die große Zahl der Eingangsdaten führte in der Winterdienstsaison 2016/17 bei den Versuchsfahrten sehr häufig zu Ausfällen. Aus unterschiedlichen Gründen standen einzelne Daten kurzfristig nicht zur Verfügung. Ursachen liegen bei Unterbrechungen in der Datenübertragung (DWD-Daten), Ortungsproblemen (GPS), Funktionsproblemen des Bordcomputers (Betriebssystem) und diversen Unterbrechungen in der Stromversorgung. Die Probleme wurden zum Teil während der Winterperiode bereits abgestellt.

In Vorbereitung der Saison 2017/18 wurden einige technische Veränderungen realisiert, die zu einem wesentlich stabileren Betrieb des Gesamtsystems führten, unter anderem durch den Einsatz von LTE-Routern für die stabile Datenübertragung zum Fahrzeug.

An beiden Fahrzeugen waren nachtsichtfähige Kameras installiert, um die Ausgabedaten des Sensors zum Fahrbahnzustand zu verifizieren. Die Bildqualität der im 20 Sekunden Takt aufgenommenen Fotos war jedoch in den meisten Fällen nicht ausreichend, um den Fahrbahnzustand zu beurteilen. Problematisch waren vor allem die Aufnahmen bei Dunkelheit. Auch durch Verschmutzungen der Kameraoptik kam es zu deutlichen Beeinträchtigungen der Bildqualität.

## 11.2 Qualität der Eingangsdaten

### 11.2.1 Fahrbahnoberflächentemperatur (MARWIS)

Die mit dem MARWIS-Sensor gemessene Fahrbahnoberflächentemperatur wich insbesondere in der AM Greding erheblich von Vergleichswerten ab. Zu den vom Pyrometer der Thermomat-Steuerung gemessenen Werten gab es Differenzen bis zu 4,5 K (Bild 8-14). Auch im Vergleich zu Werten von Fahrbahnsonden traten noch deutliche Differenzen auf. Die vom MARWIS-Sensor ermittelten Temperaturen waren in jedem Fall höher als die Vergleichstemperaturen. Problematisch ist vor allem, wenn die Abweichungen weit über den Toleranzen der DIN EN 15518-3 liegen. Die DIN EN 15518-3 ist zwar nicht für mobile Sensoren gültig, aber diese Anforderungen müssten auch bei mobilen Senso-

ren mindestens erreicht werden, um sie für eine Dosierungssteuerung einzusetzen.

Derartige Sensoren müssen auch über eine einfache Möglichkeit der Kalibrierung verfügen, die in täglichen oder wenigstens wöchentlichen Abständen auch in den Betriebsstellen durchgeführt werden könnte.

### 11.2.2 Wasserfilmdicke (MARWIS)

Aus den Testreihen mit vergleichenden Messungen (siehe Kapitel 8.3.3) ist abzuleiten, dass bei der Messung der Wasserfilmdicke selbst unter statischen Bedingungen mit erheblichen Abweichungen zu rechnen ist. Deshalb ist zu vermuten, dass im Fahrbetrieb mit wechselnden Fahrbahnbelägen und unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen mit eventuell noch größeren Messabweichungen zu rechnen ist. Aus diesem Grund erscheinen die verwendeten berührungslosen Sensoren für einen Praxiseinsatz auf Fahrzeugen noch nicht geeignet.

### 11.2.3 Wasserfilmdicke (DWD-Niederschlagsprognose)

Für präventive Streuungen spielt auch die Prognose der Niederschlagsmengen für die folgenden drei Stunden eine wesentliche Rolle. Bei flüssigem Niederschlag werden die Prognosen relativ unsicher sein. Das trifft auch für Schneeniederschlag unter Windbedingungen zu. In diesen Fällen muss eher mit Pauschalwerten als mit Prognosen gearbeitet werden.

Das betrifft die rot eingekreiste Passage des Algorithmus in Bild 11-1.

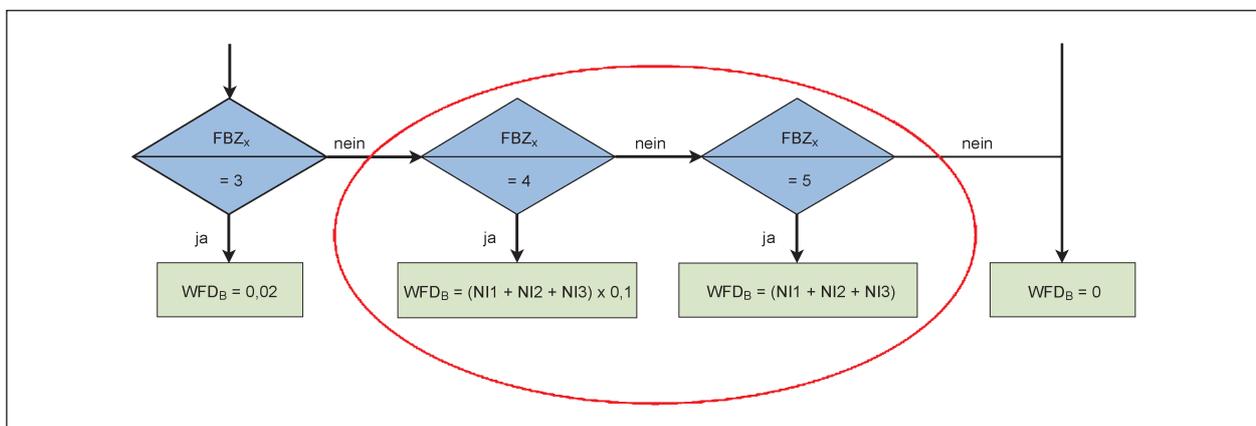


Bild 11-1: Berücksichtigung prognostizierter Niederschlagsmengen bei der Berechnung der Wasserfilmdicke für präventive Einsätze

### 11.2.4 Fahrbahnzustand (MARWIS)

Aus den unter Kapitel 10.2 dargestellten Ergebnissen (Tabelle 10-2 und Tabelle 10-3) ist zu entnehmen, dass der Fahrbahnzustand teilweise im Sekundentakt als stark wechselnd angezeigt wird. Bei fast allen Einsatzfahrten trat das in gleicher Weise auf. Sehr konstant ist die Anzeige des Fahrbahnzustandes bei Wasserfilmdicken  $< 10 \mu\text{m}$  (trockene Fahrbahn). Besonders häufige Wechsel gibt es bei stark wechselnden Wasserfilmdicken und teilweisem Matsch- bzw. Schneebeleg auf der Fahrbahn. Es wird damit nicht in Zweifel gezogen, dass die Anzeige für den Moment einer Sekunde und damit für eine sehr kleine Fläche richtig ist. Es besteht aber die Frage, wie mit diesem Eingangswert umgegangen wird.

Er hat bei algorithmischer Berechnung der Streudichte einen erheblichen Einfluss auf den Rechengang und damit auf das Ergebnis.

Eine mögliche Lösung könnte in der Pauschalierung von Anzeigewerten, d. h. eine gewichtete Zusammenfassung über bestimmte Zeiträume sein. Das muss allerdings immer in Richtung maximaler Sicherheit gehen. Das könnte zum Beispiel bedeuten, dass eine kurzzeitige Anzeige einer Vereisung der Fahrbahn evtl. wegen einer winzigen Eisfläche über eine längere Strecke zu unnötig hoher Dosierung führt.

## 12 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Die Feldversuche in den Winterdienstperioden 2016/17 und 2017/18 haben auf der Basis umfangreicher Sensor- und Einsatzdaten wichtige Erkenntnisse über die Anforderungen gebracht, die für den nutzbringenden Einsatz von Dosierungsalgorithmen erfüllt sein müssen. Im Einzelnen sind folgende Erkenntnisse zu nennen:

1. Die Funktion des in einen Algorithmus umgesetzten Modells zur Berechnung der optimalen Streudichte konnte nachgewiesen werden.
2. Die technischen Möglichkeiten, alle erforderlichen Daten für das autonome Streuen auf den Einsatzfahrzeugen zusammenzuführen, sind vorhanden.
3. Die DWD-Punktwettervorhersage ist mit einem Zeithorizont von 3 h für einen Dosierungsalgorithmus einsetzbar. Hinsichtlich der Prognose-sicherheit müssen jedoch weitere Fortschritte gemacht werden.
4. Die Mess- und Berechnungsdaten des berührungslosen Sensors weisen im mobilen Betrieb eine große Schwankungsbreite auf.
5. Die Anzeige von Straßenzuständen wechselt so häufig, dass derzeit eine sinnvolle Verarbeitung dieses Eingangswertes nicht möglich ist. Es ist zu vermuten, dass die für den Fahrbahnzustand ausgegebenen Werte zum Teil nicht repräsentativ oder auch fehlerhaft sind.
6. Die ausgegebenen Werte des berührungslosen Sensors sind teilweise nicht nachvollziehbar, da die internen Algorithmen des Herstellers nicht bekannt sind.
7. Die Kategorisierung des Fahrbahnzustandes ist teilweise für einen Dosierungsalgorithmus nicht sinnvoll. Der Fahrbahnzustand „schnee-, eisbedeckt“ ist zu undifferenziert für die Dosierungssteuerung. Schnee bzw. Eis gehen für die Dosierung sehr unterschiedlich in die Berechnung ein. Es muss klar zwischen diesen beiden Zuständen unterschieden sein.
8. Für die Zustände „chemisch nass“ und „kritisch nass“ muss der interne Algorithmus des MARWIS-Sensors bekannt sein, um sie qualifiziert in die Berechnung eingehen zu lassen.
9. Beim mobilen Einsatz des MARWIS-Sensors ist mit salzhaltigem Spritzwasser zu rechnen. Der Schutzgrad des Anschlusssteckers zwischen Sensor und Kabel ist dafür nach praktischen Erfahrungen nicht ausreichend. An dem Fahrzeug waren nach wenigen Tagen Einsatz die Kontakte am Anschlussstecker der AM Münchberg korrodiert.
10. Für die Verwendung für die automatische Dosierung sollten modifizierte Sensoren entwickelt werden.
11. Für die Kalibrierung des Sensors in Bezug auf die Fahrbahnoberflächentemperatur und die Wasserfilmdicke sollten einfache Prozeduren gefunden werden, die auch in einer Einsatzstelle von Winterdienstfahrzeugen durchgeführt werden können.

Allgemeine Schlussfolgerungen zum Sensoreinsatz für die Dosierungssteuerung:

1. Die große Spannweite der Messdaten innerhalb von Sekunden, insbesondere bei der Wasserfilmdicke, aber auch bei der Fahrbahnoberflächentemperatur deutet darauf hin, dass die von einem kleinen Messfleck gewonnenen Messwerte nicht unbedingt repräsentativ für eine größere Fahrbahnfläche sind.
2. Eine größere Stabilität und Sicherheit der Messwerte könnte durch die Installation mehrerer Sensoren, verteilt über die Fahrzeugbreite, erreicht werden. Aus den Messwerten mehrerer Sensoren könnten Mittelwerte gebildet werden, die dann direkt in die Berechnung eingehen.
3. Die internen Algorithmen der Sensoren sollten auf den Datenbedarf der Dosierungssteuerung ausgerichtet werden.
4. Die angebotene Sensortechnik muss weiter auf die Genauigkeit der Messwerte untersucht werden.
5. Die technischen Vorschriften für ortsfeste Sensoren müssen auf mobile Sensoren erweitert werden.
6. Welche Rolle kann Bilderkennung der Fahrbahnoberfläche für die weitere Bearbeitung spielen?
7. Sollte die Entwicklung der Dosierungsalgorithmen darauf abzielen, möglichst viele Eingangsdaten zu berücksichtigen, oder ist eher eine sparsame Verwendung möglicher Eingangsdaten anzustreben?
8. Wird es zukünftig hinreichend genaue Möglichkeiten geben, die Restsalzmengen vom fahrenden Fahrzeug aus zu ermitteln?
9. Ist die Kenntnis der Reibwerte auf der Fahrbahn für die Berechnung der optimalen Streudichte hilfreich?
10. Nach welchen Kriterien kann der gleichzeitige Einsatz von FS30 und FS100 empfohlen werden, der nach bisherigen Erkenntnissen insbesondere auf offenporigem Asphalt vorteilhaft sein kann?
11. Soll der gleichzeitige Einsatz von FS30 und FS100 Bestandteil des Algorithmus werden?
12. Eine wesentliche Komponente zur Ermittlung der optimalen Streudichte ist die auf der Fahrbahn befindliche Restsalzmenge. Wenn zur mobilen Messung dieses Wertes praxistaugliche Sensortechnik zur Verfügung steht, sollte sie für die Berechnung der optimalen Streudichte in das System integriert werden.

### 13 Fragestellungen und Aufgaben

Für die weitere Bearbeitung des Themas und dessen zukünftige Weiterentwicklung bis zur Einsatzfähigkeit im operativen Winterdienst ergeben sich folgende Fragestellungen und Aufgaben:

1. Mit welchen Entwicklungen ist bei der Sensortechnik zu rechnen?
2. Welche Messgenauigkeiten der Sensoren sind zu erwarten?
3. Sind die erzielbaren Messgenauigkeiten für eine automatisierte Streudichteberechnung ausreichend?
4. Mit welchen Verfahren kann eine Kalibrierung von Sensoren unter Praxisbedingungen durchgeführt werden?
5. Wie kann die Qualität der Messungen im operativen Winterdienstbetrieb sichergestellt werden?

### 14 Ausblick

Derzeit werden weltweit Forschungen und Pilotprojekte mit autonomen Verkehrssystemen durchgeführt. In Deutschland sind auch im Bereich des Straßenbetriebsdienstes erste Projekte bekannt, die auf den fahrerlosen Betrieb von Fahrzeugen ausgerichtet sind. Unter anderem wird seit 2014 an einem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie geförderten Projekt „Automatisch fahrerlos fahrendes Absicherungsfahrzeug für Arbeitsstellen auf Bundesautobahnen“ (aFAS) gearbeitet.

Im Bereich Winterdienst wird unter dem Titel „Automated Airfield Ground Maintenance“ (AAGM) nach Testanforderungen des Flughafenbetreibers Fraport ein System getestet, bei dem bei Staffeleinsätzen nur noch das Führungsfahrzeug mit einem Fahrer

besetzt werden muss. Diese Entwicklung zu fahrerlosen Systemen wird sich mit großer Wahrscheinlichkeit fortsetzen und auch weitere Bereiche des Winterdienstes erfassen. Dabei erscheint der Winterdienst auf Autobahnen wegen der relativ übersichtlichen Streckenführung für erste Schritte am besten geeignet. Dazu wäre auch ein autonom arbeitendes System zur Festlegung der optimalen Streudichte unverzichtbar.

Die mit den derzeit verfügbaren technischen Mitteln durchgeführten Feldversuche haben erste Erkenntnisse und Lösungen aufgezeigt. Es wurde aber auch deutlich, dass kurzfristige Lösungen nicht zu erwarten sind.

Praxistaugliche Lösungen erfordern Sensoren, die präzise Messwerte liefern und eine noch komplexere Erfassung der Bedingungen auf der Straßenoberfläche. Das kann wahrscheinlich nur mit einer größeren Zahl von Sensoren an einem Fahrzeug kombiniert mit Verfahren der Bilderkennung erfolgen. Damit könnte alles Wesentliche erfasst und ausgewertet werden, was die Fahrer der Winterdienstfahrzeuge heute im Sichtfeld haben, kombiniert mit der Möglichkeit, die numerischen Daten automatisiert zu verarbeiten.

## Literatur

- BADEL, H.; BREITENSTEIN, J.: Modell zur Glätewarnung im Straßenwinterdienst, Berichte der Bast, Heft V 129, Bergisch Gladbach 2005
- DIN EN 15518-3 Winterdienstausrüstung – Straßenzustands- und Wetterinformationssysteme; Teil 3: Anforderungen an gemessene Werte der stationären Anlagen
- DIN EN 16811-1 Winterdienstausrüstung – Enteisungsmittel; Teil 1: Natriumchlorid – Anforderungen und Prüfverfahren
- ESA, ASSIST: Advanced Snow plow and salt Spreader based on Innovative Space Technologies, Internetpräsentation, <https://artes-apps.esa.int/projects/assist-fs>, abgerufen am 26.10.2016
- EVANS, M. G.; Jordan, R. W.: Proposed precautionary treatment rates for the Highways Agency's road network, TRL, PPR 459, August 2010
- HAAVASOJA, T.; PILLI-SIHVOLA, Y.: Friction as a Measure of Slippery Road Surfaces, Vortrag Sirvec Konferenz, Quebec 2010
- HAAVASOJA, T.; NYLANDER, J.; NYLANDER, P.: Experiences of Mobile Road Condition Monitoring, Sirvec Konferenz 2012
- HAUSMANN, G.: Berechnung der optimalen Streudichte im Straßenwinterdienst, Berichte der BAST, Heft V 260, Bergisch Gladbach, August 2015
- HAUSMANN, G.: Empfehlungen zum richtigen Aufbringen von Tausalzlösungen, Berichte der BAST, Heft V 218, Bergisch Gladbach, Dezember 2012
- HAUSMANN, G.: Verteilung von Tausalzen auf der Fahrbahn, Berichte der BAST, Heft V 180, Bergisch Gladbach, Mai 2009
- HOLLDOEB, C.; STREICH, M.; UHLIG, M.: Regionalisierte Erfassung von Straßenwetterdaten, Berichte der BAST, Heft V 258, Bergisch Gladbach, Juni 2015
- KNOLLHOFF, D. S.; TAKLE, E. S.; GALLUS JR, W. A.; BURKHEIMER, D.; McCAULEY, D.: Evaluation of a frost accumulation model. In: Meteorol. Appl. 10, pp. 337-343 (2003)
- LAMM, R.; TAUBMANN, A.; ZOELLMER, J.: Zusammenfassende Untersuchung zum Begriff der kritischen Wasserfilmdicke, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 436, Bonn 1985
- LUFFT GmbH: Bedienanleitung MARWIS-UMB; Ausgabe V 1.1/9.Dez 2014
- LUKAS, J.: Messungen der geometrischen Rauigkeit und Wasserabfluss von der Straße. Internationales Kolloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Berlin 1968
- LYSBAKKEN, K. R.; NOREM, H.: The Amount of Salt on Road Surfaces after Salt Application, Seventh International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology, Indianapolis 2008, Transportation Research Circular Number E-C126
- MALMIVUO, M.: Comparison study of mobile optical friction and temperature meters 2013, Verlag Liikennevirasto, Helsinki 2013

- MALMIVUO, M.: Friction Meter Comparison Study 2011, Siwec Konferenz Helsinki 2012
- MÖLLER, St.: Tema Vintermodell, VTI Rapport 529, 2006
- NICOLAS, J.-P.: Glättebildung durch Überfrieren, Schwellwerte der Oberflächenfeuchte auf Fahrbahnen, Berichte der Bast, Heft V 36, Bergisch Gladbach 1996
- NIEBRÜGGE, L.: Automatisiertes Streuen – Praktische Erfahrungen und Empfehlungen, Kolloquium Straßenbetrieb, Karlsruhe 2015
- ÖLANDER, J.: ASSIST: Advanced Snow plow and salt Spreader based on Innovative Space Technologies, Sirwec Konferenz Colorado 2016
- PORETT, A.: AVL/GPS/MDSS for Improving Winter Operations, Sirwec Kongress 2016
- POTTER, A.; GALLAGHER, M.; BAYER, C.: Synthesis on Global Positioning Systems/ Automatic Vehicle Location Equipment Used for Winter Maintenance, CR-Report Nr. 14-01, Juli 2016
- RAUKOLA et al.: Anti-icing activities in Finland: field tests with liquid and prewetted chemicals. In: Transportation Research Record 1387, pp. 48-56, 1993
- RUIZ-LLATA, M.; MARTIN-MATEOS, P.; LOPEZ, J.; ACEDO, P.: Remote optical sensor for real-time residual salt monitoring on road surfaces. In: Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 191, February 2014, pp. 371-376, Internet: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400513011957>, abgerufen am 27.10.2016
- SMITHSON, L; BURKHARDT, J.: Evolution of the Highway Maintenance Concept Vehicle: Assembling the Ideal Platform for Mobile Winter Operations, TR News, 11/2009
- THOMPSON, G.; THOMPSON, T.: Developing a Totally Automated Spreading System, Clear Roads Final Report Nr. TEC-006-14, Februar 2014
- WAHLIN, J. et al.: Laboratory test of five different optical road condition sensors, Sirwec Konferenz Colorado 2016

## Bilder

- Bild 3-1: Phasendiagramm  $H_2O - NaCl$
- Bild 4-1: Phasengrenzlinie als polynomische Formel
- Bild 4-2: Gefriertemperatur in Abhängigkeit von Streustoffmenge und Wasserfilmdicke in mm
- Bild 4-3: Verlauf der linearen Trendlinie im Vergleich zum berechneten Kurvenverlauf auf Basis der Phasengrenzlinie (rote Linie) – Beispiel mit Wasserfilmdicke WFD 0,07 mm
- Bild 4-4: Übereinstimmung von Trendlinie und linearer Funktion im eingeschränkten Temperaturbereich (Beispiel für 0,07 mm Wasserfilmdicke)
- Bild 4-5: Steigung der linearen Trendlinien in Abhängigkeit von der Wasserfilmdicke
- Bild 4-6: Ermittlung der berechneten Fahrbahntemperatur
- Bild 4-7: Rückhalte- und Speichervermögen von Fahrbahnoberflächen in Abhängigkeit von Fahrbahnneigung und mittlerer Rautiefe nach (LUKAS)
- Bild 4-8: Verlauf der Wasserfilmdicke nach Niederschlagsende (EVANS)
- Bild 4-9: Programmablaufplan zur Berechnung der optimalen Streudichte (Fassung 2016)
- Bild 4-10: Flussbild zur Ermittlung des Streumodus
- Bild 4-11: Flussbild zur Ermittlung der Streutechnologie
- Bild 4-12: Flussbild zur Ermittlung des Rechenwertes der Wasserfilmdicke
- Bild 4-13: Flussbild zur Ermittlung der Berechnungstemperatur
- Bild 4-14: Flussbild zur Ermittlung des Grundwertes der Streudichte
- Bild 4-15: Flussbild zur Ermittlung des Endwertes der Streudichte

- Bild 5-1: Systemübersicht Greiding
- Bild 5-2: Systemübersicht Münchenberg
- Bild 5-3: Allgemeine Komponentenübersicht für Einbau mit Schnittstellen und Anschlüssen
- Bild 5-4: Detaillierte Darstellung der Komponenten der Streudichtenprognose
- Bild 5-5: Grundprinzip der optimalen Streudichtenprognose
- Bild 5-6: Kombinierte Befestigung von MARWIS-Sensor und Kamera. Die Kamera ist auf den Messfleck des Sensors ausgerichtet
- Bild 5-7: Saison 2017/18 – Ausrichtung der Kamera schräg nach hinten
- Bild 5-8: MARWIS-Sensor und daneben montierte Kamera der AM Greiding. Ab Saison 2017/18 war die Kamera schräg nach hinten ausgerichtet
- Bild 8-1: Dosierfehler in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke und Fahrbahntemperatur. Als Beispiel (roter Pfeil) eine korrekt gemessene Wasserfilmdicke und eine Messabweichung bei der Fahrbahntemperatur von 1 K. Resultierend ist ein Dosierfehler von 6,3 g/m<sup>2</sup>
- Bild 8-2: Dosierfehler in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke und Fahrbahntemperatur. Als Beispiel (roter Pfeil) eine korrekt gemessene Temperatur und eine Messabweichung bei der Wasserfilmdicke von 0,05 mm. Resultierend ist ein Dosierfehler von 1,6 g/m<sup>2</sup>
- Bild 8-3: Dosierfehler in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke und Fahrbahntemperatur. Als Beispiel (roter Pfeil) Messabweichungen bei der Fahrbahntemperatur von 1 K und bei der Wasserfilmdicke von 0,05 mm (Sollwert 0,40 mm) in ungünstigster Kombination. Resultierend ist ein Dosierfehler von 8,6 g/m<sup>2</sup>
- Bild 8-4: Dosierfehler bei unterschiedlichen Messwertabweichungen innerhalb der vorgeschriebenen Werte der Messgenauigkeit (FBT -2°C ± 1,0 oder 1,5 K; WFD ± 0,05 mm)
- Bild 8-5: Prognostizierte (FBT3) und zur Prognosezeit (FBT0) eingetretene Fahrbahntemperatur in den Tagesgängen einer Woche an der SWS Allersberg (Code P338)
- Bild 8-6: Häufigkeit der Differenzen zwischen prognostizierter und nach 3 Stunden eingetretener Temperatur an der SWS Allersberg (Vergleich von 147 Datenpaaren im Zeitraum vom 26.02.2018 bis 04.03.2018)
- Bild 8-7: Häufigkeit der Differenzen zwischen prognostizierter und nach 3 Stunden eingetretener Temperatur an der SWS Talbrücke Münchenberg (Vergleich von 162 Datenpaaren im Zeitraum vom 26.02.2018 bis 04.03.2018)
- Bild 8-8: Prognostizierte und eingetretene Niederschlagsmengen in der Kalenderwoche 05/2018 an der Talbrücke Münchenberg
- Bild 8-9: Fahrtverlauf am 02.01.2017
- Bild 8-10: Testfahrt am 02.01.2017 – Vergleich des Straßenzustandes nach MARWIS-Aufzeichnungen und augenscheinlicher Filmauswertung – Die Kennung „undefiniert“ wird aus Gründen der übersichtlichen Darstellung mit -1 statt 99 angenommen
- Bild 8-11: Fahrtverlauf am 03.01.2017
- Bild 8-12: Testfahrt am 03.01.2017 – Vergleich des Straßenzustandes nach MARWIS-Aufzeichnungen und augenscheinlicher Filmauswertung – Die Kennung „undefiniert“ wird aus Gründen der übersichtlichen Darstellung mit -1 statt 99 angenommen
- Bild 8-13: Vergleich der gemessenen Temperaturen bei einer Einsatzfahrt am 17.01.2017 im Bereich der Autobahnmeisterei Greiding
- Bild 8-14: Temperaturabweichungen in Abhängigkeit von der mit dem MARWIS-Sensor gemessenen Temperatur
- Bild 8-15: Vergleich der gemessenen Temperaturen bei einer Einsatzfahrt am 18.01.2018 im Bereich der Autobahnmeisterei Greiding

- Bild 8-16: Vergleich der gemessenen Temperaturen bei einer Einsatzfahrt am 19.01.2018 im Bereich der Autobahnmeisterei Münchberg
- Bild 8-17: Gemessene Wasserfilmdicke bei einer Einsatzfahrt am AM Greding 16.01.2017
- Bild 8-18: Beim Fahrbahnzustand „trocken“ gemessene Wasserfilmdicken
- Bild 8-19: Beim Fahrbahnzustand „feucht“ gemessene Wasserfilmdicken
- Bild 8-20: Beim Fahrbahnzustand „nass“ gemessene Wasserfilmdicken
- Bild 8-21: Beim Fahrbahnzustand „eisbedeckt“ gemessene Wasserfilmdicken
- Bild 8-22: Beim Fahrbahnzustand „schnee-/eisbedeckt“ gemessene Wasserfilmdicken
- Bild 8-23: Beim Fahrbahnzustand „chemisch nass“ gemessene Wasserfilmdicken
- Bild 8-24: Fehler bei der Messung der Wasserfilmdicke mit unterschiedlichen berührungslosen Sensoren (Belag aus grauem Asphalt) WAHLIN 2016
- Bild 8-25: Anordnung des MARWIS-Sensors und des Wettex-Tuches
- Bild 8-26: Abweichung der MARWIS-Messungen von der durch Wettex-Messungen ermittelten Solllinie
- Bild 8-27: Prozentuale Abweichung der MARWIS-Messungen von den Wettex-Messungen
- Bild 9-1: Manuell eingestellte Streudichte im Vergleich zu der mit Algorithmus errechneten Streudichte am 14.01.17 auf einer Hauptfahrbahn der A 9 im Bereich der AM Greding
- Bild 9-2: Gleitender Durchschnitt der Streudichte mit Periode 30
- Bild 9-3: Mit dem Algorithmus errechnete Streudichtewerte und Technologiewechsel bei einer Einsatzfahrt am 04.02.17
- Bild 9-4: Glättung des Streudichteverlaufes durch gleitenden Durchschnitt mit Periode 60 Sekunden
- Bild 9-5: Errechnete Salzmengen bei Einsatzfahrt der AM Münchberg auf der A 9 am 04.02.17 im Vergleich zu den abschnittswisen Mittelwerten der Salzmengen aus dem Einsatzbericht
- Bild 9-6: Temperaturverlauf (MARWIS-Messung)
- Bild 9-7: Verlauf der Wasserfilmdicke (MARWIS-Messung)
- Bild 9-8: Verlauf des Fahrbahnzustandes (0 – trocken, 1 – feucht, 5 – chemisch nass)
- Bild 9-9: Errechnete Streudichte
- Bild 9-10: Vergleich der tatsächlich ausgebrachten Salzmenge mit der errechneten Salzmenge
- Bild 10-1: AM Greding, 29.12.2017, 23:31:44, MARWIS FBT -0,2 °C; WFD 1.101 µm, FBZ Schnee
- Bild 10-2: AM Greding, 29.12.2017, 23:33:04, MARWIS FBT -0,2 °C; WFD 1.489 µm, FBZ schnee-/eisbedeckt
- Bild 10-3: AM Greding, 29.12.2017, 23:36:24, MARWIS FBT -0,9 °C; WFD 1.085 µm, FBZ chemisch nass
- Bild 10-4: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 30.12.2017
- Bild 10-5: Gemessene Wasserfilmdicke bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 30.12.2017
- Bild 10-6: Häufiger Wechsel der Glättkategorie bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 30.12.2017
- Bild 10-7: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 29.12.2017
- Bild 10-8: Gemessene Wasserfilmdicke bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 29.12.2017
- Bild 10-9: Vergleich zwischen berechneter und manuell eingestellter Streudichte bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 29.12.2017

- Bild 10-10: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 16.01.2018
- Bild 10-11: Gemessene Wasserfilmdicke bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 16.01.2018
- Bild 10-12: Häufiger Wechsel der Glätteklasse bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 16.01.2018
- Bild 10-13: Verlauf der Fahrbahnoberflächentemperatur bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 04.02.2018
- Bild 10-14: Gemessene Wasserfilmdicke bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 04.02.2018
- Bild 10-15: Häufiger Wechsel der Glätteklasse bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 04.02.2018
- Bild 10-16: Berechnete Streudichte bei einer Einsatzfahrt der AM Münchberg am 04.02.2018
- Bild 10-17: Verlauf der mit dem MARWIS-Sensor gemessenen Fahrbahnoberflächentemperatur bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 17.02.2018
- Bild 10-18: Mit dem MARWIS-Sensor gemessene Wasserfilmdicken bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 17.02.2018
- Bild 10-19: Gegenüberstellung der manuell eingestellten Streudichten mit den durch den Algorithmus errechneten Streudichten bei einer Einsatzfahrt der AM Greding am 17.02.2018
- Bild 10-20: Einsatzfahrt AM Greding am 18.01.2018 – Thermomat gesteuerte Streudichte
- Bild 10-21: Einsatzfahrt am 17.02.2018 – Position des Fahrzeuges bei errechneten Streudichten  $> 5 \text{ g/m}^2$
- Bild 10-22: Einsatzfahrt AM Greding am 17.02.2018 – manuell eingestellte Streudichte und Fahrzeugposition bei einer errechneten Streudichte von  $5 \text{ g/m}^2$
- Bild 10-23: Einsatzfahrt AM Greding am 17.02.2018 – Fahrbahntemperatur und Fahrzeugposition bei einer errechneten Streudichte von  $5 \text{ g/m}^2$
- Bild 10-24: Einsatzfahrt der AM Greding am 30.12.2017 – errechnete Streudichte wechselt sehr stark, manuelle Streudichte mit geringer Variation
- Bild 10-25: Einsatzfahrt der AM Greding am 30.12.2017 – Starke Variation der festgestellten Fahrbahnzustände
- Bild 11-1: Berücksichtigung prognostizierter Niederschlagsmengen bei der Berechnung der Wasserfilmdicke für präventive Einsätze

## Tabellen

- Tab. 2-1: Herstellerbezeichnungen
- Tab. 3-1: Einflussfaktoren auf die Glättesituation auf taustoffbehandelten Fahrbahnoberflächen
- Tab. 4-1: Gefriertemperaturen in Abhängigkeit von Wasserfilmdicke (WFD) und Streustoffmenge
- Tab. 4-2: Eingeschränkter Wertebereich für die Berechnung der Trendlinien
- Tab. 4-3: Steigung der linearen Trendlinie für verschiedene Wasserfilmdicken
- Tab. 4-4: Definition des Status der Straßenoberfläche
- Tab. 4-5: Oberflächenzustand und Wasserfilmdicke nach (LYSBAKKEN ,2008)
- Tab. 4-6: Ausgleichsfaktor  $F_L$  für Liegezeitverluste
- Tab. 4-7: Berechnungstemperatur und Wasserfilmdicke – Formeln für die Glättezustände auf Fahrbahnen
- Tab. 4-8: Spezifisches Wasseräquivalent unterschiedlicher Schneearten
- Tab. 4-9: Grenzwerte der Streudichte

Tab. 6-1:	Großbrücken im Bereich der AM Münchberg	Tab. 8-9:	Auswertung der am 02.01.17 festgestellten Fahrbahnzustände für den Autobahnanteil der Gesamtstrecke
Tab. 6-2:	Straßenwetterstationen im Einsatzgebiet der Autobahnmeisterei Münchberg	Tab. 8-10:	Auswertung der am 02.01.17 abweichend festgestellten Fahrbahnzustände für den Autobahnanteil der Gesamtstrecke
Tab. 6-3:	Schaltpunkte im Bereich der AM Münchberg	Tab. 8-11:	Vergleich der vom MARWIS-Sensor und der am 03.01.2017 augenscheinlich ermittelten Fahrbahnzustände auf der Gesamtstrecke
Tab. 6-4:	Großbrücken im Bereich der AM Greding	Tab. 8-12:	Auswertung der am 03.01.17 abweichend festgestellten Fahrbahnzustände für die Gesamtstrecke
Tab. 6-5:	Straßenwetterstationen an der A 9 im Bereich der AM Greding und angrenzender Autobahnmeistereien	Tab. 8-13:	Auswertung der am 03.01.17 festgestellten Fahrbahnzustände für den Autobahnanteil der Gesamtstrecke
Tab. 6-6:	Schaltpunkte im Bereich der AM Greding	Tab. 8-14:	Auswertung der am 03.01.17 abweichend festgestellten Fahrbahnzustände für den Autobahnanteil der Gesamtstrecke
Tab. 6-6:	Schaltpunkte im Bereich der AM Greding	Tab. 8-15:	Temperaturabweichungen zwischen MARWIS ( $FBT_E$ ) und Thermomat ( $FBT_{EEEx}$ ). Zum Vergleich Temperaturwert $FBT_0$ aus der Punktwettervorhersage für den Autobahnabschnitt
Tab. 7-1:	Eingangsdaten für die Berechnung der optimalen Streudichte	Tab. 10-1:	Klassifizierung und Codierung der durch den MARWIS-Sensor ermittelten Fahrbahnzustände
Tab. 8-1:	Fahrbahnzustände nach DWD-Code	Tab. 10-2:	Beispiel für den häufigen Wechsel von Fahrbahnzustand und Glättekattegorie
Tab. 8-2:	Abweichung vom prognostizierten Fahrbahnzustand für den Standort der SWS Talbrücke Münchberg in der Zeit vom 26.02.18, 4:00 Uhr und 04.03.18 23:00 Uhr	Tab. 10-3:	Beispiel für kurzzeitig wechselnde Eingangsdaten
Tab. 8-3:	Abweichung vom prognostizierten Fahrbahnzustand für den Standort der SWS Allersberg in der Zeit vom 28.02.18, 1:00 Uhr und 04.03.18 23:00 Uhr		
Tab. 8-4:	Talbrücke Münchberg KW 05/18 28.01.18 bis 04.02.18 bei Temperaturen $\leq 0$ °C		
Tab. 8-5:	Fahrbahnzustände (FBZ) nach MARWIS-Code		
Tab. 8-6:	Farbcode in der Darstellung der MARWIS-Map		
Tab. 8-7:	Vergleich der vom MARWIS-Sensor und der augenscheinlich ermittelten Fahrbahnzustände auf der Gesamtstrecke		
Tab. 8-8:	Auswertung der abweichend festgestellten Fahrbahnzustände für die Gesamtstrecke		

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Verkehrstechnik“

## 2016

V 269: Identifikation von unfallauffälligen Stellen motorisierter Zweiradfahrer innerhalb geschlossener Ortschaften

Pohle, Maier € 16,50

V 270: Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Straßenbetriebsdienst (KliBet)

Holldorb, Rumpel, Biberach, Gerstengarbe, Österle, Hoffmann € 17,50

V 271: Verfahren zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien bei der Ausschreibung von Elementen der Straßeninfrastruktur

Offergeld, Funke, Eschenbruch, Fandrey, Röwekamp  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 272: Einsatzkriterien für Baubetriebsformen

Göttgens, Kemper, Volkenhoff, Oeser, Geistefeldt, Hohmann € 16,00

V 273: Autobahnverzeichnis 2016

Kühnen € 25,50

V 274: Liegedauer von Tausalzen auf Landstraßen

Schulz, Zimmermann, Roos € 18,00

V 275: Modellversuch für ein effizientes Störfallmanagement auf Bundesautobahnen

Grahl, Skottke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 276: Psychologische Wirkung von Arbeitsstellen auf die Verkehrsteilnehmer

Petzoldt, Mair, Krems, Roßner, Bullinger € 30,50

V 277: Verkehrssicherheit in Einfahrten auf Autobahnen

Kathmann, Roggendorf, Scotti  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 278: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014

Fitschen, Nordmann € 30,50

V 279: HBS-konforme Simulation des Verkehrsablaufs auf Autobahnen

Geistefeldt, Giuliani, Busch, Schendzielorz, Haug, Vortisch, Leyn, Trapp € 23,00

## 2017

V 280: Demografischer Wandel im Straßenbetriebsdienst – Analyse der möglichen Auswirkungen und Entwicklung von Lösungsstrategien

Pollack, Schulz-Ruckriegel € 15,50

V 281: Entwicklung von Maßnahmen gegen Unfallhäufungsstellen – Weiterentwicklung der Verfahren

Maier, Berger, Kollmus € 17,50

V 282: Aktualisierung des Überholmodells auf Landstraßen

Lippold, Vettors, Steinert € 19,50

V 283: Bewertungsmodelle für die Verkehrssicherheit von Autobahnen und von Landstraßenknotenpunkten

Bark, Krähling, Kutschera, Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Schuckließ, Maier, Berger € 19,50

V 284: Berücksichtigung des Schwerverkehrs bei der Modellierung des Verkehrsablaufs an planfreien Knotenpunkten

Geistefeldt, Sievers  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 285: Praxisgerechte Anforderungen an Tausalz

Kamptner, Thümmeler, Ohmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 286: Telematisch gesteuertes Kompaktparken – Grundlagen und Entwicklung

Kleine, Lehmann € 16,50

V 287: Werkzeuge zur Durchführung des Bestandsaudits und einer erweiterten Streckenkontrolle

Bark, Kutschera, Resnikow, Follmann, Biederbick € 21,50

V 288: Überholungen von Lang-Lkw - Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit und den Verkehrsablauf

Roos, Zimmermann, Köhler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 289: Verkehrsqualität an verkehrsunabhängig gesteuerten und koordinierten Lichtsignalanlagen

Geistefeldt, Giuliani, Vieten, Dias Pais € 20,00

V 290: Fahrleistungserhebung 2014 – Inländerfahrleistung

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 19,00

V 291: Fahrleistungserhebung 2014 – Inlandsfahrleistung und Unfallrisiko

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer, Stock, Lenz, Kuhnimhof, Köhler € 18,50

V 292: Verkehrsnachfragewirkungen von Lang-Lkw

Burg, Schrempf, Röhling, Klaas-Wissing, Schreiner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 293: Ermittlung der geeigneten Verkehrsnachfrage als Bemessungsgrundlage von Straßen

Geistefeldt, Hohmann, Estel  
Unterauftragnehmer: Manz € 17,50

V 294: Wirtschaftlichkeitsbewertung besonderer Parkverfahren zur Lkw-Parkkapazitätserhöhung an BAB

Maibach, Tacke, Kießig € 15,50

V 295: Konzentrationen und Frachten organischer Schadstoffe im Straßenabfluss

Grotehusmann, Lambert, Fuchs, Graf € 16,50

V 296: Parken auf Rastanlagen mit Fahrzeugen und Fahrzeugkombinationen mit Übergröße

Lippold, Schemmel, Kathmann, Schroeder  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 297: Sicherheitstechnische Überprüfung von Elementen plan gleicher Knotenpunkte an Landstraßen

Zimmermann, Beeh, Schulz, Roos  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 298: Verfahren zur Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Netzanalysesysteme

Balck, Schüller, Balmerberger, Rossol  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 299: Einfluss von Fehlern auf die Qualität von Streckenbeeinflussungsanlagen  
Schwietering, Neumann, Volkenhoff, Fazekas, Jakobs, Oeser  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2018

V 300: Untersuchungen zur Optimierung von Schadstoffrückhalt und Standfestigkeit von Banketten  
Werkenthin, Kluge, Wessolek  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 301: Sicherheitsbewertung von Arbeitsstellen mit Gegenverkehrstrennung  
Kemper, Sümmerrmann, Baier, Klemps-Kohnen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 302: Entwicklung einer Fahrstreifenreduktionsbeeinflussungsanlage für Baustellen auf BAB  
Heinrich, Maier, Papageorgiou, Papamichail, Schober, Stamatakis  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 303: Psychologische Wirkungen von Arbeitsstellenlängen, -staffelung und -gestaltung auf die Verkehrsteilnehmer  
Scotti, Kemper, Oeser, Haberstroh, Welter, Jeschke, Skottke € 19,50

V 304: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2015  
Fitschen, Nordmann € 31,00  
*Die Ergebnisdateien können als kostenpflichtiger Download unter: [www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de) heruntergeladen werden.* € 15,00

V 305: Pilotversuche zur Behandlung der Abwässer von PWC-Anlagen  
Hartmann, Londong € 16,00

V 306: Anpassung des bestehenden Straßennetzes an das Entwurfskonzept der standardisierten Straßen – Pilotprojekt zur Anwendung des M EKLBest  
Lippold, Wittig  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 307: Evaluation des Sicherheitsaudits von Straßen in der Planung  
Baier, Baier, Klemps-Kohnen, Bark, Beaulieu, Theis € 17,50

V 308: Überarbeitung und Aktualisierung des Merkblattes für die Ausstattung von Verkehrsrechner- und Unterzentralen (MARZ 1999)  
Gerstenberger, Hösch, Listl, Schwietering  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 309: Photokatalytische Oberflächen zur Minderung von Stickoxidbelastungen an Straßen – TiO<sub>2</sub>-Pilotstudie Lärmschutzwand  
Baum, Lipke, Löffler, Metzger, Sauer € 16,50

V 310: Umweltfreundlicher Straßenbelag – photokatalytischer Stickstoffdioxidabbau unter Nutzung der Nanotechnologie  
Wang, Oeser, Steinauer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 311: Feldversuch mit Lang-Lkw  
Irzik, Kranz, Bühne, Glaeser, Limbeck, Gail, Bartolomaeus, Wolf, Sistenich, Kaundinya, Jungfeld, Ellmers, Kübler, Holte, Kaschner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 312: Sicherheitswirkung, Dauerhaftigkeit und Lärmemission von eingefrästen Rüttelstreifen  
Hegewald, Vesper, Irzik, Krautscheid, Sander, Lorenzen, Löffler, Ripke, Bommert  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2019

V 313: Tausalzverdünnung und -rückhalt bei verschiedenen Entwässerungsmethoden – Modellberechnungen  
Braun, Klute, Reuter, Rubbert € 18,50

V 314: Übergreifende verkehrstechnische Bewertung von Autobahnstrecken und -knotenpunkten  
Hartmann, Vortisch, Vieten, Chatzipanagiotidou, Haug, Spangler € 18,50

V 315: Telematisch gesteuertes Kompaktparken für das Lkw-Parkraummanagement auf Rastanlagen an BAB – Anforderungen und Praxiserprobung  
Kappich, Westermann, Holst € 15,50

V 316: Akustische Wirksamkeit alter Lärmschutzwände  
Lindner, Hartmann, Schulze, Hübelt € 18,50

V 317: Wahrnehmungspsychologische Aspekte (Human Factors) und deren Einfluss auf die Gestaltung von Landstraßen  
Schlag, Anke, Lippold, Wittig, Walther € 22,00

V 318: Unfallkommissionsarbeit – Unterstützung durch einen webbasierten Maßnahmenkatalog zur Beseitigung von Unfallhäufungen  
Wolf, Berger, Bärwolff € 15,50

V 319: Vermeidung von abflussschwachen Zonen in Verwindungsbereichen – Vergleich und Bewertung von baulichen Lösungen  
Lippold, Veters, Ressel, Alber  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

V 320: Einsatzbereiche und Entwurfs Elemente von Radschnellverbindungen  
Malik, Lange, Andriesse, Gwiasda, Erler, Stein, Thiemann-Linden € 18,00

V 321: Dynamisches umweltsensitives Verkehrsmanagement  
Diegmann, Wursthorn, Breitenbach, Düring, Schönharting, Kraus, Klemm, Voigt, Kohlen, Löhner in Vorbereitung

V 322: Automatisch gesteuerte Streustoffausbringung durch Nutzung neuer mobiler Sensoren  
Hausmann € 18,00

---

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.