

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Überblick und Beiträge zur aktuellen Winterdienstforschung – Räumung und Restsalz

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

unter der Leitung von

Ronald Blab

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Bernhard Hofko

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
E230-3

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Michael Ronald Gruber

00728128

Wien, am 10. Oktober 2018

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit kann als Zusammenfassung der Winterdienstforschung in Österreich betrachtet werden und basiert auf den gewonnenen Erkenntnissen der Forschungsprojekte „Optimierung der Feuchtsalzstreuung“ [1] und „Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Winterdienst“ [2] sowie weiterer einschlägiger Forschungsvorhaben zum Winterdienst in Österreich. Zusätzlich wurden weiterführende Untersuchungen als Basis für die Optimierung des Winterdienstes in Österreich durchgeführt, da derzeit nicht ausreichend bekannt ist, inwieweit die **Tauleistung von Feuchtsalzen zwischen der Tauleistung von festen und flüssigen Taumitteln (Kapitel 2)** auf Basis des aktuellen Laborverfahrens einzuordnen ist. Weiters ist die **Geschwindigkeit der Eisbildung unter realen winterlichen Temperaturen mit und ohne Präventivmaßnahmen (Kapitel 3)** nicht erforscht, diese jedoch gerade im Hinblick auf die Ermittlung der Zeit bis zur Glättebildung wesentlich ist.

Während ein erhöhter Soleanteil vorteilhaft für die Ausbringung und die Minimierung der Streuverluste ist [1], ist hohe Luftfeuchtigkeit bzw. eine ungewollte Anfeuchtung des Streusalzes für die Lagerung in Hallen und Salzsilos ungünstig. Diese Anfeuchtung bewirkt eine Klumpenbildung und beeinträchtigt die Rieselfähigkeit in den Salzsilos, wodurch die Aufbereitung und Beladung der Streufahrzeuge erschwert wird. Anhand erster Versuche zur Rieselfähigkeit auf Basis der Auslaufbox nach Sonntag konnte ein wiederholbares Prüfverfahren etabliert und die Auswirkungen von Trocknungsvorgängen auf feste Taumittel quantifiziert werden [2]. Im Hinblick auf die Vermeidung von Ablagerungen und die Erhöhung der Lagerfähigkeit werden weitergehende Untersuchungen zu den **Auswirkungen von unterschiedlichen Feuchtegehalten und Antibackmitteln auf die Rieselfähigkeit (Kapitel 5)** als sinnvoll angesehen. In zusätzlichen Versuchen soll die Frage geklärt werden, ob diese **Antibackmittel je nach Dosierung einen Einfluss auf die Tauleistung** haben.

Einen wesentlichen Punkt im Winterdienst stellt die Schneeräumung dar, da geräumter Schnee nicht getaut werden muss und ein gutes Räumbild für einen wirtschaftlichen Winterdienst von wesentlicher Bedeutung ist. Zur Schneeräumung stehen derzeit viele unterschiedliche Pflugsysteme zur Verfügung, die mit unterschiedlichen Zusatzausstattungen wie Pflugentlastung, Nachräumleisten etc. betrieben werden können. Manche Hersteller geben eine Räumleistung (m³/h) ihrer Pflugsysteme an, allerdings gibt es keine Angaben zur Bewertung des Räumbildes. Vor allem auf Straßen mit schlechter Ebenheit (Längsebenheit, Spurrinnen) gibt es jedoch erhebliche Unterschiede in den verbleibenden Schneemengen. Da es sowohl im Hinblick auf die **Abnutzung der Schürfleisten sowie den Restschneemengen unter vergleichbaren Bedingungen (Kapitel 6)** wenig belastbare Daten gibt, sind entsprechende Erhebungen und Versuche Teil dieser Arbeit.

Gemäß bisheriger Untersuchungen sind die Streu- und Austragungsverluste unmittelbar nach der Ausbringung von Auftausalzen besonders hoch, weshalb jede Verbesserung zur Erhöhung der Restsalzmenge große Einsparungen im Winterdienst bewirkt. Kann die auf der Fahrbahn verbleibende Restsalzmenge zuverlässig ermittelt werden, so wäre dies für die praktische Einsatzplanung bzw. die Notwendigkeit weiterer Streuungen von wesentlicher Bedeutung. Zur

Restsalzmessung stehen verschiedene Geräte/Systeme zur Verfügung, aber es gibt kaum objektive Vergleichsmessungen zwischen diesen. In Österreich wird am häufigsten das SOBO 20 Restsalzmessgerät der Firma Boschung eingesetzt. Allerdings ist nicht bekannt, ob das **SOBO 20 die Restsalzmenge von festen, feuchten und flüssigen Taustoffen gleichwertig erfasst und wie hoch die jeweilige Messgenauigkeit (Kapitel 7)** ist. Weiters gibt es noch Forschungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung der **Restsalzmenge in Abhängigkeit von Liegedauer, Verkehrsbelastung und Straßenzustand**. Gerade im Hinblick auf die Präventivstreuung in Fällen von Reifglätte bzw. vor erwarteten Schneefallereignissen kommt der Liegedauer von Taumitteln eine besondere Bedeutung zu. Der **Zusammenhang zwischen den Messdaten stationärer Glättemeldeanlagen und mobiler Restsalzmessgeräte** ist ebenfalls ein offener Aspekt, der in dieser Arbeit näher betrachtet werden soll.

Abstract

This master's thesis can be considered as a summary of the winter road maintenance research in Austria and is based on the conclusions of the research projects "Optimization of wet salt spreading" [1] and "Suitability criteria for thawing grit in winter road maintenance" [2] as well as further relevant research projects on winter road maintenance in Austria. In addition, more detailed investigations were carried out as a basis for the optimization of winter road maintenance in Austria, as it is currently not sufficiently understood to what extent the **thawing performance of wet salts** can be classified between the thawing performance of solid and liquid de-icing agents (Chapter 2) on the basis of the current laboratory procedure. Furthermore, the **speed of ice formation** under real winter temperatures **with and without preventive measures** (Chapter 3) has not been studied yet, which is, however, essential with regard to the determination of the time until ice formation.

While an increased brine content is advantageous for spreading and minimizing spreading loss [1], high air humidity or an unintentional moistening of the road salt is unfavorable for storage in halls and salt silos. This moistening causes the formation of lumps and decreases the flowability in the salt silos, which makes the preparation and loading of the spreading vehicles more difficult. On the basis of initial tests on pourability based on the device "Auslaufbox nach Sonntag" (pouring out box acc. to Sonntag), a repeatable test method was established and the effects of drying processes on solid de-icing agents quantified [2]. With regard to the avoidance of sedimentation and the increase of the storability, further investigations on the **effects** of different **moisture contents and anti-caking agents** on the **pourability** (chapter 5) are regarded as necessary. In additional tests, the question of whether these **anti-caking agents** have an **influence** on the **thawing performance** depending on the dosage will also be clarified.

Snow clearing is an essential point in every winter maintenance, since snow does not have to be thawed and a good snow removal pattern is therefore essential for economic winter maintenance. Many different snow plough systems are currently available for clearing snow, which can be operated with various additional equipment such as plough relief, additional clearing strips, etc. Some manufacturers state the clearing capacity (m³/h) of their ploughing systems, but there is no information available to evaluate the clearing pattern. However, especially on roads with poor evenness (longitudinal evenness, ruts) considerable differences exist in the remaining quantities of snow. Since there is little reliable data available with regard to both the **wear of the scraper blades** and the **residual amounts of snow** under comparable conditions (Chapter 6), corresponding surveys and experiments are part of this work.

According to previous studies, the spreading and application losses immediately after the application of de-icing salts are particularly high, which is why any improvement to increase the residual salt quantity results in substantial savings in winter road maintenance. If the amount of residual salt remaining on the road can be reliably determined, this would be essential for practical deployment planning and the necessity of further spreading. Various devices/systems are available for residual salt measurement, but there are hardly any official comparative measurements between them. In Austria, the SOBO 20 residual salt measuring instrument

from Boschung is most frequently used. However, it is not known whether the **SOBO 20** measures the **residual salt quantity of solid, moist and liquid de-icing agents** equally well and how high the respective measuring **accuracy** (Chapter 7) is. Furthermore, there is still a need for research with regard to the development of the **residual salt quantity** as a function of **duration** of exposure, **traffic** load and **road condition**. Especially with regard to preventive spreading in cases of slippery frost or before expected snowfall events, the duration of exposure to de-icing agents is of particular importance. The **relationship** between the measured data of **stationary ice detection systems** and **mobile residual salt measuring devices** is also an open aspect which will be examined in more detail in this thesis.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grundlagen des Winterdienstes.....	1
1.2	Vorgehensweise und Abgrenzung der Arbeit.....	2
2	Tauleistung Feuchtsalz	3
2.1	Ausgangslage.....	3
2.2	Inhalt und Methodik.....	4
2.3	Prüfprogramm.....	5
2.4	Auswertung.....	6
2.4.1	Prüfergebnisse.....	6
2.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	7
3	Eisbildungsdauer	8
3.1	Ausgangslage.....	8
3.2	Inhalt und Methodik.....	8
3.3	Prüfprogramm.....	9
3.4	Auswertung.....	10
3.4.1	Grundlagen.....	10
3.4.2	Prüfergebnisse.....	11
3.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	16
4	Tau- und Gefriermodell	17
4.1	Taumodell.....	17
4.1.1	Grundlagen und methodische Überlegungen.....	17
4.1.2	Versuchsauswertung und Regressionsmodelle.....	17
4.2	Gefriermodell.....	21
4.2.1	Grundlagen und methodische Überlegungen.....	21
5	Rieselfähigkeit	23
5.1	Inhalt und Methodik.....	23
5.2	Auftausalze und Prüfprogramm.....	23
5.2.1	Materialauswahl.....	23
5.2.2	Sieblinienvergleich Steinsalz und Siedesalz.....	25
5.2.3	Prüfprogramm Rieselfähigkeit.....	26
5.2.4	Prüfprogramm Tauleistung mit und ohne Antibackmittel.....	26
5.3	Ergebnisse Rieselfähigkeit.....	27
5.4	Ergebnisse Tauleistung mit und ohne Antibackmittel.....	31
5.5	Zusammenfassung des Kapitels.....	35
6	Räumqualität	36

6.1	Inhalt und Methodik.....	36
6.2	Umfrage Schneepflüge und Räumleisten.....	36
6.2.1	Teilnehmer	37
6.2.2	Pflug- und Räumleistenhersteller.....	37
6.2.3	Sonstige Erkenntnisse.....	38
6.2.4	Auswahl Pflug- und Räumleisten für Feldversuche.....	40
6.3	Prüfprogramm Restschneemenge	41
6.3.1	Beschreibung Haupt- und Vorversuch	41
6.3.2	Erprobung der Methodik für den Hauptversuch	42
6.4	Prüfprogramm Räumleistenverschleiß	46
6.4.1	Beschreibung Hauptversuch.....	46
6.4.2	Beschreibung Zusatzversuch	47
6.5	Zusammenfassung des Kapitels und Ausblick	48
7	Restsalz.....	49
7.1	Inhalt und Methodik.....	49
7.2	Überprüfung der Eignung des SOBO 20 Restsalzmessgerätes im Labor.....	49
7.2.1	Restsalzmessgerät SOBO 20	49
7.2.2	Laborprüfung	50
7.2.3	Vergleichsmessung reine Sole (FS100).....	52
7.2.4	Vergleichsmessung Trockensalz (FS0)	53
7.2.5	Vergleichsmessung aufgetrocknete Sole (FS100 getrocknet).....	55
7.3	Restsalz auf der Fahrbahn bei Glättemeldeanlagen.....	56
7.3.1	Messorte und Sensoren.....	57
7.3.2	Messmethodik	58
7.3.3	Kaltenleutgebner Straße.....	58
7.3.4	Höhenstraße.....	60
7.3.5	Brünner Straße	62
7.3.6	Seyringer Straße	63
7.4	Restsalzverteilung auf der Fahrbahn.....	65
7.5	Restsalzabnahme nach Streufahrt.....	69
7.6	Vergleich der Restsalzgeräte SOBO 20 und Spül-Saug-Gerät.....	73
7.7	Zusammenfassung des Kapitels	76
8	Zusammenfassung.....	78
9	Anhang.....	80
9.1	Abbildungsverzeichnis	80
9.2	Tabellenverzeichnis	84
9.3	Literaturverzeichnis.....	85
9.4	Temperaturverläufe Eisbildung	86

1 Einleitung

1.1 Grundlagen des Winterdienstes

Die RVS 12.04.12 [3] definiert den Begriff Winterdienst als die Summe der Vorkehrungen mit dem Ziel die Benutzbarkeit der Straßen unter Berücksichtigung der winterlichen Wettereinflüsse zu gewährleisten. Dabei werden als winterliche Einflüsse jene durch Schnee oder Eis hervorgerufenen Zustände auf der Straße bezeichnet, die zu einer Verminderung der Griffigkeit der Straßenoberfläche und weiters geringere mögliche Kurvengeschwindigkeiten sowie längere Bremswege zur Folge haben.

Diesen unerwünschten Zuständen kann durch die Kombination zweier Maßnahmen entgegengewirkt werden. Erstens durch mechanisches Beseitigen des Schnees auf der Fahrbahn (Räumen) und zweitens durch das Verhindern von Glatteisbildung auf der Fahrbahnoberfläche (Streuen) [4].

Dabei kann man in Österreich zwei Arten von Schneeräumung unterscheiden; die sogenannte Schwarzräumung, bei der zuerst der Schnee so weit wie möglich von der Fahrbahn geräumt wird und danach der Restschnee mit Hilfe von auftauenden Streumitteln wie Natriumchlorid (NaCl) oder Calciumchlorid (CaCl_2) getaut. Diese erzielen ihre Tauwirkung indem sie den Gefrierpunkt des Wassers bzw. der in Folge entstandenen Solelösung derart herabsetzen, sodass der Schnee auf der Fahrbahn schmilzt bzw. der geschmolzene Schnee nicht (wieder) gefriert. Neben der Schwarzräumung existiert weiters das Konzept der Weißräumung, bei der die Fahrbahnoberfläche nur in dem Maße geräumt wird, sodass weiterhin eine geringe Restschneesicht auf der Fahrbahn verbleibt. Danach werden sogenannte abstumpfende anstatt auftauender Streumittel, in Österreich hauptsächlich Splitt, gestreut, um die Reibung zwischen Reifen und Straße und somit die Griffigkeit der Oberfläche zu erhöhen. [4] [5]

Grundsätzlich haben sowohl auftauende als auch abstumpfende Streumittel einen gravierenden Einfluss auf die Umwelt. Da als auftauende Streumittel vorwiegend Chloride (NaCl , CaCl_2 , MgCl_2) aufgrund ihres Preis-Leistungsverhältnisses eingesetzt werden, kommt es zu einer Versalzung des anstehenden Grundwassers sowie Erdreichs und in weiterer Folge zur Austrocknung der Flora. Auch Metalle von Fahrzeugen und Bewehrungen in Stahlbetonkonstruktionen werden durch Tausalze angegriffen und korrodieren. Abstumpfende Streumittel wie Splitt bewirken durch Abrieb Feinstaubpartikel und verschlechtern somit die Luft vor allem in Großstädten und in Feinstaubsanierungsgebieten laut Immissionsschutzgesetz Luft (IG-L).

Da die Streuung mit auftauenden Streumitteln klare Vorteile bezüglich ihrer Liegedauer in Abhängigkeit des Verkehrs bietet [5] [6] und im Zweifelsfall die Verkehrssicherheit von größerer Bedeutung ist als beispielsweise der Bestand der Vegetation [7], wird auf Österreichs Straßen ab einer bestimmten Verkehrsstärke, ausgedrückt durch den jährlichen durchschnittlichen täglichen Verkehr (JDTV > 1.000 KFZ/24h), die Streuung von Tausalzen bevorzugt.

Die RVS 12.04.12 [3] definiert zusätzlich Anforderungsniveaus durch die Winterdienstkategorien A bis D für den Außerortsbereich, welche sich in Abhängigkeit des JDTV durch ihren Betreuungszeitraum, ihre Umlaufzeit und der Wahl der Streumittel unterscheiden.

1.2 Vorgehensweise und Abgrenzung der Arbeit

Um dem Lesenden einen Überblick über den Stand der Winterdienstforschung zu verschaffen, beinhaltet diese Arbeit nicht nur selbst durchgeführte Versuche und Auswertungen, denn manche Kapitel stellen eine Zusammenfassung bisheriger Forschungsprojekte dar. Um eine genaue Abgrenzung zu anderen Forschungen und Forschern zu bewirken, wurde in folgende Kategorien unterschieden:

- Versuche selbst durchgeführt und ausgewertet
- Versuche nur teilweise selbst durchgeführt, jedoch selbst ausgewertet
- Bisherige Forschungsergebnisse nur zusammengefasst

Im Folgenden soll Aufschluss über die diesbezügliche Vorgehensweise sämtlicher Kapitel gegeben werden. Die Kapitel „**Tauleistung Feuchtsalz**“, „**Eisbildungsdauer**“ sowie „**Tau- und Gefriermodell**“ waren nicht Teil der Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit und daher wurden **weder die Versuche noch die Auswertung selbst durchgeführt**. Wie bereits erwähnt wurden diese Themen nur **zusammengefasst** und in die Arbeit aufgenommen um dem Lesenden einen Überblick zu verschaffen.

Die im Kapitel „**Rieselfähigkeit**“ dargestellten Rieselversuche wurden **teilweise** von einer Studentin im Zuge Ihres Erasmus Aufenthalts in Wien **durchgeführt**. Es ergaben sich jedoch weitere Fragenstellungen, die unter anderem zusätzliche Rieselversuche notwendig machten. Die dazu erforderlichen **Ergänzungsversuche**, die **Tauleistungsversuche** sowie die **Neu- auswertung des kompletten Prüfprogramms** wurden **selbst durchgeführt**.

Die im Kapitel „**Räumqualität**“ durchgeführten Versuche wurden sowohl **selbst durchgeführt als auch selbst ausgewertet**. Einzige **Ausnahme** bildet die Erstellung der **Online-Umfrage** - ihre Ergebnisse wurden **nur selbst ausgewertet**.

Im letzten Kapitel „**Restsalz**“ muss zusätzlich nach Unterkapitel abgegrenzt werden:

Die **Überprüfung des mobilen Restsalzmessgerätes SOBO 20** sowie die Messungen des **Restsalzgehaltes** auf Fahrbahnen in der Nähe von **stationären Glättemeldeanlagen** wurden ebenso **selbst konzipiert** und **durchgeführt** wie **ausgewertet**.

In den beiden Unterkapiteln, die sich mit der **Restsalzverteilung auf der Fahrbahn** bzw. der **Restsalzabnahme nach einer Streufahrt** beschäftigen, wurden sämtliche **Versuche** von Mitarbeitern verschiedener **Straßenmeistereien vorgenommen** und nur die **Auswertung** der Messdaten wurde **selbst durchgeführt**.

Die im letzten Abschnitt dargestellten und nie veröffentlichten Vorversuche zum **Vergleich der mobilen Restsalzgeräte SOBO 20 und Spül-Saug-Gerät** wurden bereits im Jahr 2012 in einer Kooperation der Deutschen Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) und des Instituts für Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Wien (IVWS) durchgeführt und somit **nicht selbst vorgenommen**. Die vorliegenden Messergebnisse wurden jedoch **selbst ausgewertet und zusammengefasst**.

2 Tauleistung Feuchtsalz

2.1 Ausgangslage

Im Projekt „Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Winterdienst“ [2] wurde bereits die Tauleistung sowohl für feste als auch für flüssige Taumittel untersucht. Dabei wurden nachstehende Formeln (1) und (2) für die massenbezogene Tauleistung entwickelt.

$$TL_{M, fest}(t) = \frac{M_{Sole}(t)}{M_{TMfest}} \quad (1)$$

$TL_{M, fest}$	Massenbezogene Tauleistung fester Taumittel [g/g] in Abhängigkeit der Einwirkdauer t
M_{Sole}	abgegossene (getaute) Sole [g] in Abhängigkeit der Einwirkdauer t
M_{TMfest}	aufgebrachte Taumittelmenge [g]

$$TL_{M, fluid}(t) = \frac{M_{Sole}(t) - M_{TMfluid}}{M_{TMfluid}} \quad (2)$$

$TL_{M, fluid}$	Massenbezogene Tauleistung flüssiger Taumittel [g/g] in Abhängigkeit der Einwirkdauer t
M_{Sole}	abgegossene Sole [g] in Abhängigkeit der Einwirkdauer t
$M_{TMfluid}$	aufgebrachte Taumittelmenge (aufgebrachte Sole) [g]

In den damaligen Untersuchungen wurde die Tauleistung von festen Taumitteln für NaCl mit unterschiedlichen Korngrößen (0/1 mm, 1/3 mm, 3/5 mm) bei Lufttemperaturen von -2,5, -5,0, -7,5, und -10 °C und für Einwirkdauern von 5, 30 und 240 Minuten ermittelt.

Die Tauleistung von flüssigen Taumitteln wurde unter anderem für NaCl-Solen mit Konzentrationen von 20 % und 24 % bei Lufttemperaturen von -2,5, -5,0 und -7,5 °C und für Einwirkdauern von 5, 30 und 240 Minuten ermittelt.

Die Ergebnisse für feste Taumittel sind in Gramm Sole je Gramm Tausalz angegeben und in Abbildung 1 ersichtlich, für flüssige Taumittel mit der Einheit Gramm aufgetautes Eis je Gramm aufgebrachter Sole in Abbildung 2.

Im Zuge des Forschungsprojektes „Wirkmodell Räumung, Streuung und Restsalz“ der Technischen Universität Wien wurde die Tauleistung von typischen Feuchtsalzen ermittelt und den bereits vorliegenden Ergebnissen für feste (FS0) und flüssige (FS100) Taumittel gegenübergestellt.

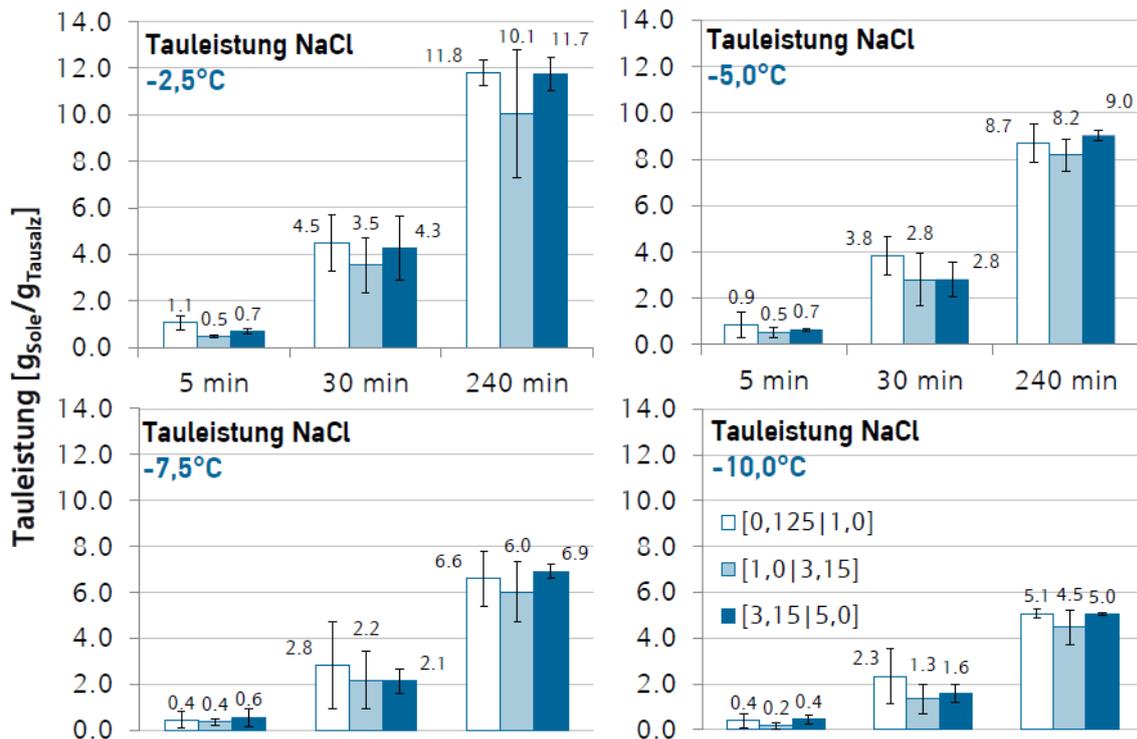


Abbildung 1: Tauleistung feste Taumittel [2]

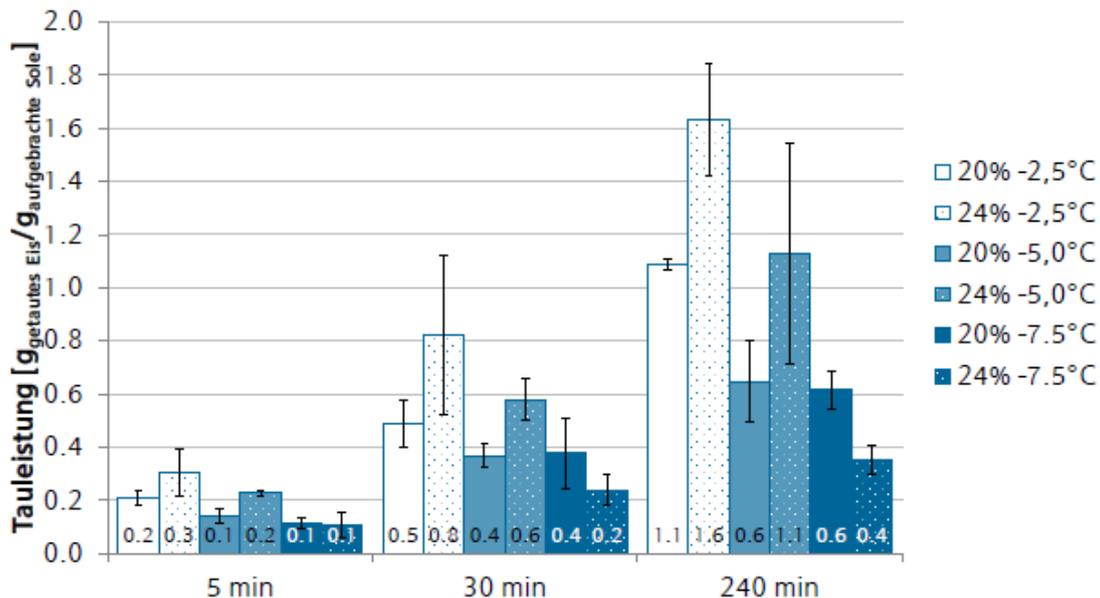


Abbildung 2: Tauleistung flüssige Taumittel [2]

2.2 Inhalt und Methodik

Im Rahmen der „Untersuchungen des Einflusses der Präventivstreuung auf die Eisbildungsdauer“ [8] wurde konkret die Tauleistung für drei Feuchtsalze bei unterschiedlichen Lufttemperaturen und Einwirkdauern bestimmt. Dafür wurde das bestehende Prüfverfahren [2] zur Ermittlung der Tauleistung von flüssigen Taumitteln herangezogen. Der Versuchsablauf fand in einem geschlossenen Klimaschrank statt, der mit Eingriffsöffnungen ausgestattet ist, um

eine konstante Temperatur während der Versuchsdauer zu gewährleisten. Im geschlossenen Klimaschrank wurden in Metalldosen Eisplatten mit einer speziellen Vertiefung erzeugt (siehe Abbildung 3) und 10 ml Salzlösung mit Hilfe einer Einwegspritze aufgebracht. Die Eisplatten wurden inklusive der Schalen vor dem Auftragen der Salzlösung, mit der Salzlösung und nach der Einwirkungszeit der Salzlösung (darauf befindliche Taupflüssigkeit wurde vorher abgossen) gewogen. Aus den gemessenen Massen wurde die Tauleistung gemäß den Formeln (1) und (2) bestimmt.



Abbildung 3: Methodik zur Bestimmung der Tauleistung flüssiger Taumittel [14]

2.3 Prüfprogramm

Das ursprünglich geplante Prüfprogramm umfasste 3 Feuchtsalze mit unterschiedlichem Sol-eanteil (FS30, FS50 und FS70), 4 Lufttemperaturen (-2,5, -5,0, -7,5, und -10 °C) und 4 Ein-wirkdauern (5, 30, 60 und 240 Minuten). Aus diesen 48 Kombinationen, welche mit 3-fach Bestimmung durchgeführt wurden, ergaben sich 144 Einzelversuche. Die Tauleistung von tro-ckenem Salz (FS0) und reiner Sole war bereits in vorhergehenden Versuchen bestimmt wor-den. Im Zuge der Abwicklung wurden zusätzliche Ergänzungsprüfungen bei Lufttemperaturen von -1 °C, Einwirkdauern von 120 Minuten, sowie Wiederholungsprüfungen zur Absicherung der Ergebnisse für ausgewählte Versuchsanordnungen durchgeführt. In Summe ergaben sich insgesamt 56 verschiedene Kombinationen und 186 Einzelprüfungen.

Das gesamte Prüfprogramm ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Salzlösungen wurden je-weils mit trockenem NaCl und einer 20%-igen NaCl-Sole im entsprechenden Gewichtsverhält-nis gemischt:

- **FS30:** 7 g festes Taumittel + 3 g 20%-Sole (resultierend 76 % Salzlösung)
- **FS50:** 5 g festes Taumittel + 5 g 20%-Sole (resultierend 60 % Salzlösung)
- **FS70:** 3 g festes Taumittel + 7 g 20%-Sole (resultierend 44 % Salzlösung)

Tabelle 1: Prüfprogramm Tauleistung Feuchtsalz

Basisprüfungen													
Feuchtsalz	Lufttemperatur [°C]					Einwirkdauer [min]					Bestimmung [Stk.]	Anzahl [Stk.]	
	-1	-2,5	-5	-7,5	-10	5	30	60	-	240			
FS30	-1	-2,5	-5	-7,5	-10	5	30	60	-	240	3	60	
FS50	-1	-2,5	-5	-7,5	-10	5	30	60	-	240	3	60	
FS70	-	-2,5	-5	-7,5	-	5	30	60	-	240	3	36	
Ergänzungs- und Wiederholungsprüfungen													
FS30	-	-	-	-	-10	-	30	60	120	-	3	9	
FS30	-	-2,5	-	-	-	-	-	-	120	240	3	6	
FS50	-	-	-	-	-10	-	30	60	120	-	3	9	
FS50	-	-2,5	-	-	-	-	-	-	120	240	3	6	
Gesamtsumme Einzelprüfungen [Stk.]												186	

2.4 Auswertung

2.4.1 Prüfergebnisse

In Tabelle 2 sind die Prüfergebnisse für alle untersuchten Kombinationen zusammengefasst. Die resultierenden Werte entsprechen jeweils Mittelwerten aus mindestens drei Einzelprüfungen. Die Ergebnisse zeigten erwartungsgemäß einen Abfall der Tauleistung mit fallender Temperatur und steigendem Soleanteil (mit Ausnahme von einigen Ausreißern).

Tabelle 2: Prüfergebnisse Tauleistung Feuchtsalz

Tauleistung [g/g]																
Lufttemp. [°C]		-1,0			-2,5			-5,0			-7,5			-10,0		
		FS30	FS50	FS70	FS30	FS50	FS70									
Einwirkdauer [min]	5	0,8	0,8	-	0,5	0,8	0,5	0,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	-
	30	2,5	2,0	-	2,0	1,9	1,4	1,6	1,6	1,2	1,1	1,1	0,9	0,7	0,7	-
	60	3,9	3,1	-	3,1	3,2	2,0	3,0	2,7	1,7	2,4	2,0	1,4	1,3	1,2	-
	120	-	-	-	5,1	3,5	-	-	-	-	-	-	-	2,6	2,3	-
	240	7,3	7,3	-	6,6	5,6	3,5	5,5	4,6	2,4	3,8	3,1	2,4	3,4	2,5	-

Der Vergleich der Tauleistung der Feuchtsalze FS30, FS50 und FS70 mit FS0 (fest) und FS100 (flüssig) ist in Abbildung 4 für die drei Einwirkdauern 5, 30 und 240 Minuten grafisch dargestellt. Bei einer Einwirkdauer von 5 Minuten betrug die Tauleistung von FS50 ca. 50 % und von FS100 ca. 25 % von FS0. Bei der Tauleistung von FS30 und FS70 nach 5 Minuten ist kaum ein Unterschied zu FS50 zu erkennen. Nach einer Einwirkdauer von 30 Minuten zeigte sich eine deutlichere Abstufung von FS0 bis FS100, wobei auch hier die Tauleistung von FS30 und FS50 für alle Temperaturen fast gleich war. Für eine Einwirkdauer von 240 Minuten ergaben sich eindeutige Abstufungen bei den Tauleistungen von FS0 bis FS100. Die Tauleistung von FS50 betrug hier wieder ca. 50 % und von FS100 ca. 15 % von FS0. Bei einer längeren Einwirkdauer war auch ein größerer Unterschied zwischen den Werten der Feuchtsalzstreuung FS30, FS50 und FS70 bei gleicher Einwirkdauer festzustellen.

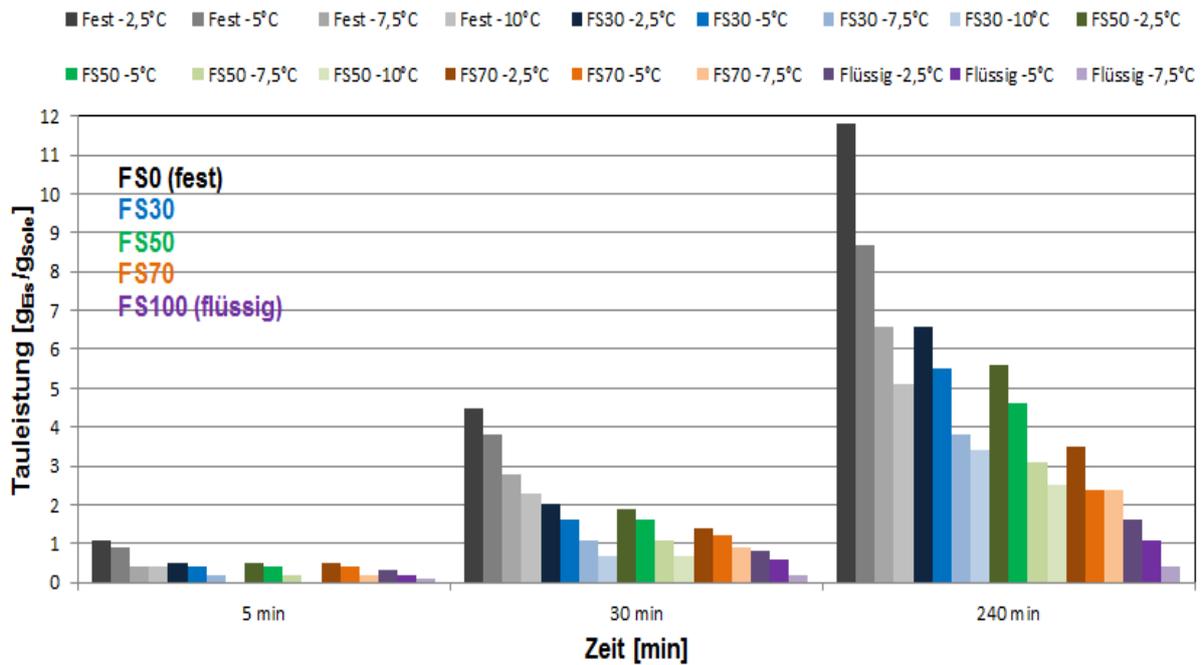


Abbildung 4: Vergleich Tauleistung Fest – Feuchtsalz – Flüssig nach 5, 30 und 240 Minuten [8]

Die vorliegenden Ergebnisse der Tauleistungen aus diesem Forschungsvorhaben sowie vorhergehenden Untersuchungen werden im Kapitel 4 herangezogen, um ein allgemein gültiges Modell für die Tauleistung zu entwickeln. Dieses soll es zukünftig ermöglichen, die Tauleistung für beliebige Salzkonzentrationen, Temperaturen und Einwirkdauern zu berechnen und ist damit ein wesentlicher Baustein eines ganzheitlichen Streumodells.

2.5 Zusammenfassung des Kapitels

Anhand der bisher vorliegenden Versuche und Auswertungsergebnisse können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Versuchsanordnung und die Durchführung sind erprobt und gut wiederholbar.
- Wie erwartet stieg die Tauleistung von FS100 über FS70, FS50, FS30 und FS0 sukzessive aufgrund des höheren Salzanteils der ausgebrachten Streumenge bei gleicher Einwirkdauer an.
- Die Tauleistung der Feuchtsalze lässt sich somit gut zwischen der Tauleistung von festen (FS0) und flüssigen (FS100) Taumitteln einordnen.
- Wird die reine Tauleistung von FS0 jeweils um den relativen Salzgehalt von FS30, FS50, FS70 und FS100 reduziert, ergeben sich theoretisch etwas höhere Werte als bei den praktischen Versuchen.
- Eine mögliche Erklärung dafür ist die schnellere Abnahme der Differenz zwischen Gefrieretemperatur und Umgebungstemperatur bei hohem Soleanteil im Vergleich zur reinen Trockenstreuung.

3 Eisbildungsdauer

3.1 Ausgangslage

Im Projekt „Optimierung der Feuchtsalzstreuung“ [1] wurden bereits Untersuchungen zum Gefrierpunkt von Salzlösungen in Abhängigkeit von ihrer Konzentration durchgeführt und ein Diagramm für Natriumchlorid (NaCl) und Calciumchlorid (CaCl₂) abgeleitet (siehe Abbildung 5). Die Versuche zur Gefrierpunktbestimmung erfolgten mit gefüllten Flaschen (ca. 0,4 l) bei einer konstanten Temperatur von -45 °C in einem Klimaschrank.

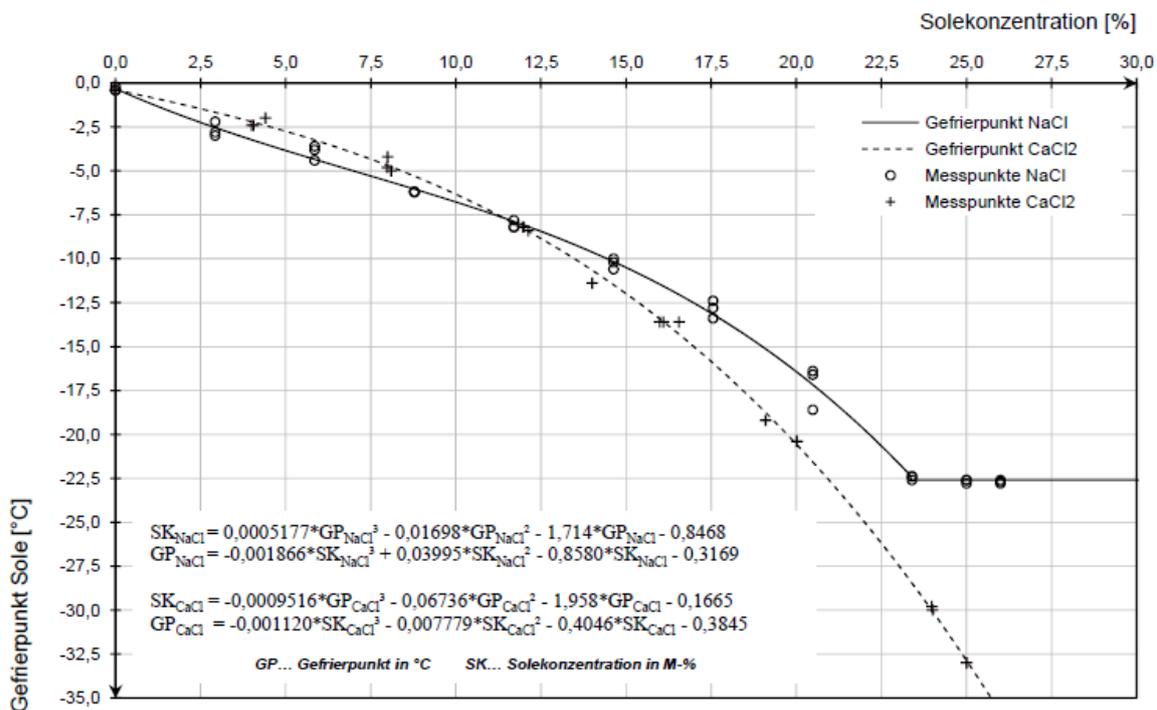


Abbildung 5: Gefrierpunktkurven für Natriumchlorid und Calciumchlorid [1]

Die durchgeführten Flaschenversuche konnten zwar Aufschluss über die Gefriertemperaturen von unterschiedlichen Solekonzentrationen geben, allerdings konnte aufgrund der Versuchsmethodik keine Aussage über das Gefrieren von dünnen Wasserschichten bzw. Salzlösungen bei Lufttemperaturen von 0 °C bis -10°C gemacht werden. Diese Fragestellung ist jedoch für den Winterdienst von maßgeblicher Bedeutung, da sie die Zeit zwischen Nässe auf der Fahrbahn und Glätte und dem damit einhergehenden Griffigkeitsverlust definiert. Im Zuge des Forschungsprojektes „Wirkmodell Streuung, Räumung und Restsalz“ wurde daher der Zeitpunkt der Eisbildung für dünne Wasserfilme mit unterschiedlichen Salzlösungen untersucht.

3.2 Inhalt und Methodik

Das Forschungsprojekt umfasste die Entwicklung und Erprobung eines Laborversuches in Anlehnung an die Flaschenversuche und die Durchführung eines Prüfprogrammes bei dem unterschiedliche Wasserfilmdicken und Streuszenarien im Vergleich zu reinem Wasser bei übli-

chen winterlichen Lufttemperaturen gefroren werden. Aus den Messwerten wurden die üblichen Gefrierdauern sowie eine mögliche Zeitverzögerung des Gefriervorganges aufgrund von Präventivstreuungen abgeleitet.

Nach mehreren Vorversuchen wurde der Laborversuch so konzipiert, dass er wie die Flaschenversuche in einem geschlossenen Klimaschrank ausgeführt werden kann. Im geschlossenen Klimaschrank wurden in Plexiglasschalen mit aufgerautem Boden dünne Wasser- bzw. Solefilme hergestellt und ein Temperaturfühler in der Mitte der Schale platziert. Um eine konstante Position der Temperaturfühler und der einzelnen Proben im Klimaschrank für alle Versuchskombinationen zu gewährleisten und eine in der Praxis nicht vorhandene Luftströmung der Plexiglasschalen von unten zu vermeiden, wurden die Proben auf einer vorgefertigten Styroporplatte befestigt (siehe Abbildung 6). Die Temperaturaufzeichnung erfolgte kontinuierlich mit PT100-Temperaturfühler über einen Datenlogger ELPRO ECOLOG TN4-L. Die Proben wurden jeweils 4 Stunden der vorgesehenen Lufttemperatur ausgesetzt.

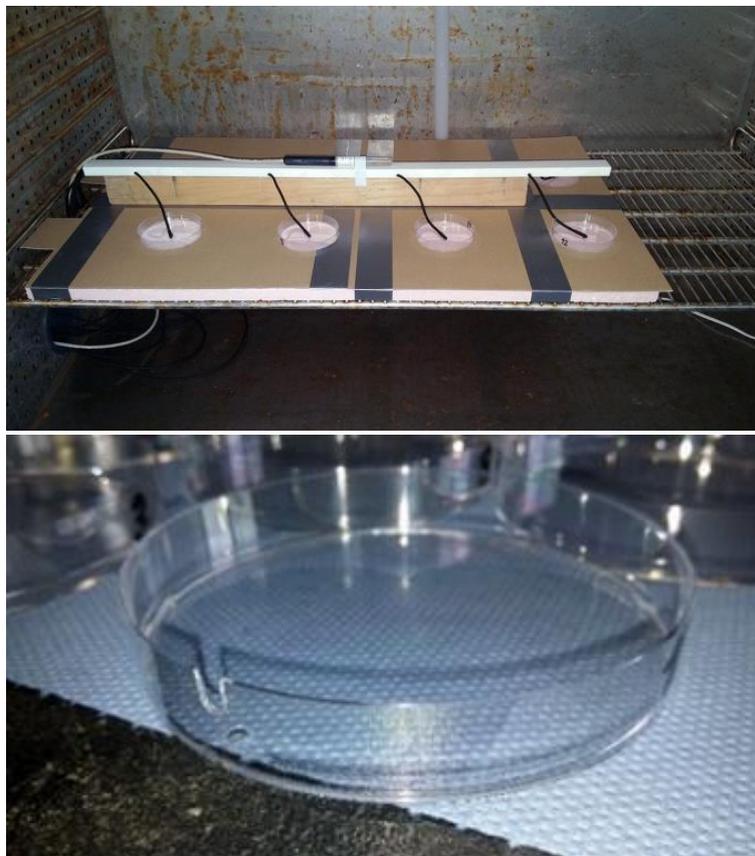


Abbildung 6: Versuchslayout Eisbildung dünne Wasser- bzw. Solefilme in Plexiglasschale [14]

3.3 Prüfprogramm

Das erste Prüfprogramm umfasste 4 Szenarien (destilliertes Wasser, 20 g und 40 g FS30, 20 g FS70), 4 Lufttemperaturen (-2,5, -5,0, -7,5, und -10 °C) und 4 Wasserfilmdicken (0,5, 2, 3 und 4 mm). Daraus wurden 34 Kombinationen ausgewählt, welche 3-fach geprüft wurden und

102 Einzelversuche ergaben. Nach einer ersten Vorauswertung wurden zusätzliche Ergänzungsprüfungen mit definierten Salzlösungen mit verschiedenen Konzentrationen (1, 2, 5, 10 und 22 %) zur Verifizierung mit 2-facher Bestimmung durchgeführt. Insgesamt ergaben sich somit 54 verschiedene Kombinationen und 142 Einzelprüfungen. Das komplette Prüfprogramm ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Prüfprogramm Eisbildungsdauer

Basisprüfungen										
Szenario	Lufttemperatur [°C]				Wasserfilmdicke [mm]			Bestimmung [Stk.]	Anzahl [Stk.]	
	-2,5	-5	-7,5	-10	-	2	3			4
dest. Wasser	-2,5	-5	-7,5	-10	-	2	3	4	3	36
FS30 20g	-2,5	-5	-	-10	0,5*	2	-	4	3	27
FS30 40g	-2,5	-5	-	-10	0,5*	2	-	4	3	27
FS70 20g	-2,5	-	-7,5	-	0,5*	2	-	-	3	12
Ergänzungsprüfungen										
Salzlösung 1%	-2,5	-5	-	-	-	2	-	4	2	8
Salzlösung 2%	-2,5	-5	-	-	-	2	-	4	2	8
Salzlösung 5%	-2,5	-5	-	-	-	2	-	4	2	8
Salzlösung 10%	-2,5	-5	-	-	-	2	-	4	2	8
Salzlösung 22%	-2,5	-5	-	-	-	2	-	4	2	8
Gesamtsumme Einzelprüfungen [Stk.]										142

*) aufgrund der Schwierigkeit geringe Filmdicken zu messen, mussten von der üblichen Versuchsdurchführung abweichende Maßnahmen getroffen werden (siehe [8])

3.4 Auswertung

3.4.1 Grundlagen

Für die Interpretation der aufgezeichneten zeitlichen Temperaturverläufe ist zwischen drei möglichen Fällen zu unterscheiden, welche in Abbildung 7 dargestellt sind.

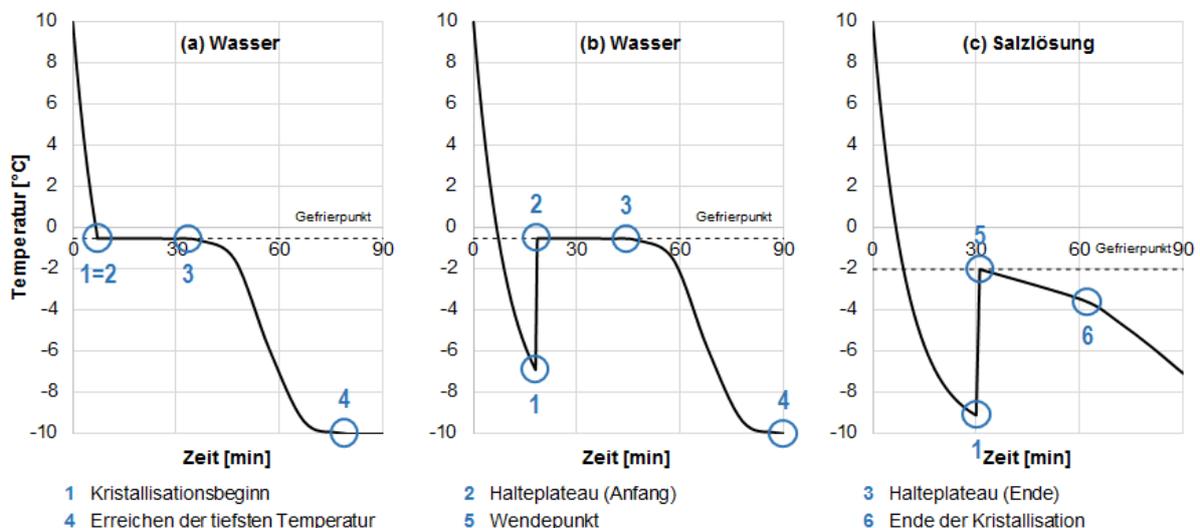


Abbildung 7: Gefrierpunktermittlung und Gefrierphasen [9]

Der Gefriervorgang durchläuft dabei folgende Phasen: [8]

Abkühlung: Gemäß des Newton'schen Abkühlungsgesetzes ist die Abnahme der Temperatur eines Körpers proportional zur Differenz der Umgebungstemperatur und der Temperatur des Körpers selbst. Auch in diesem Fall kühlt die Flüssigkeit anfänglich exponentiell ab, erst mit der Zeit sinkt die Änderungsrate und somit die Abkühlung.

Unterkühlung und Kristallisationsbeginn: Der Kristallisationsbeginn kann nun sofort bei Erreichen des Gefrierpunktes erfolgen (Abbildung 7a) oder auch in den Zustand der Unterkühlung übergehen (Abbildung 7b). Dabei wird der Gefrierpunkt unterschritten, ohne dass eine Kristallisation stattfindet. Erst das Vorhandensein von Mineralien oder Verunreinigungen, in manchen Fällen auch durch Erschütterungsimpulse, ermöglicht den Wassermolekülen sich an diese anzulegen und in weiterer Folge Eiskristalle zu bilden.

Erstarren: Nachdem sich erste Eiskristalle gebildet haben, folgt der Wechsel in den festen Aggregatzustand. Das Erstarren der Flüssigkeit erfolgt dabei exotherm, d.h. bei der Kristallisation wird Wärme abgegeben. Die Temperatur der gefrierenden Flüssigkeit bleibt jedoch konstant (Haltepunkt - Abbildung 7, Punkt 2 bis 3), da die Umgebungstemperatur der Flüssigkeit weiterhin Wärme entzieht. Dieser Haltepunkt kennzeichnet gleichzeitig auch den Gefrierpunkt von Flüssigkeiten (Abbildung 7a). Ist die Flüssigkeit im Vorhinein unterkühlt, so folgt erst ein rascher Anstieg der Temperatur bis der Haltepunkt erreicht wird und dann wieder konstant bleibt (Abbildung 7b). Nach Abschluss der Kristallisation fällt die Wärmezufuhr weg und die Temperatur des Eises nähert sich der Umgebungstemperatur an.

Wässrige Lösungen (Abbildung 7c) unterkühlen jedenfalls, danach steigt ihre Temperatur bis zum Erreichen des Gefrierpunktes, jedoch stellt sich im Folgenden nicht wie bei der Kristallisation reiner Flüssigkeiten ein horizontales Temperaturplateau ein, sondern es folgt ein starker Abfall der Temperatur. Dabei erfolgt eine Phasentrennung der wässrigen Lösung und des Eises, denn das kristallisierte Wasser scheidet gelöste Salze aus und erhöht somit die Konzentration der verbleibenden Lösung und senkt deren Gefrierpunkt. Dieser Vorgang geht solange von statten, bis die Kristallisation abgeschlossen ist und die Umgebungstemperatur höher als die Gefriertemperatur der verbleibenden wässrigen Lösung ist.

3.4.2 Prüfergebnisse

In Abbildung 8 sind die resultierenden Zustände aller geprüften Salzkonzentrationen im Vergleich zur Gefrierpunktkurve in Abbildung 5 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass bei Konzentrationen und Temperaturen unter der Gefrierpunktkurve sich Eis bilden muss (blaue Punkte), während bei Konzentrationen und Temperaturen über der Gefrierpunktkurve die Probe flüssig bleibt (graue Quadrate). Bei Kombinationen nahe der Gefrierpunktkurve bildet sich allerdings ein Übergangszustand aus, ein sogenannter Slush (orange Dreiecke), wo sich einzelne Eiskristalle bilden aber dazwischen noch Flüssigkeit vorhanden ist. Bei zwei Versuchen konnte trotz Kombination unter der Gefrierkurve keine Eisbildung beobachtet werden. Dies ist vermutlich auf das Fehlen eines Kristallisationskeims zurückzuführen. Abbildung 9 zeigt beispielhaft die charakteristische Konsistenz der Proben (Eis, Slush, flüssig) nach dem Gefriervorgang.

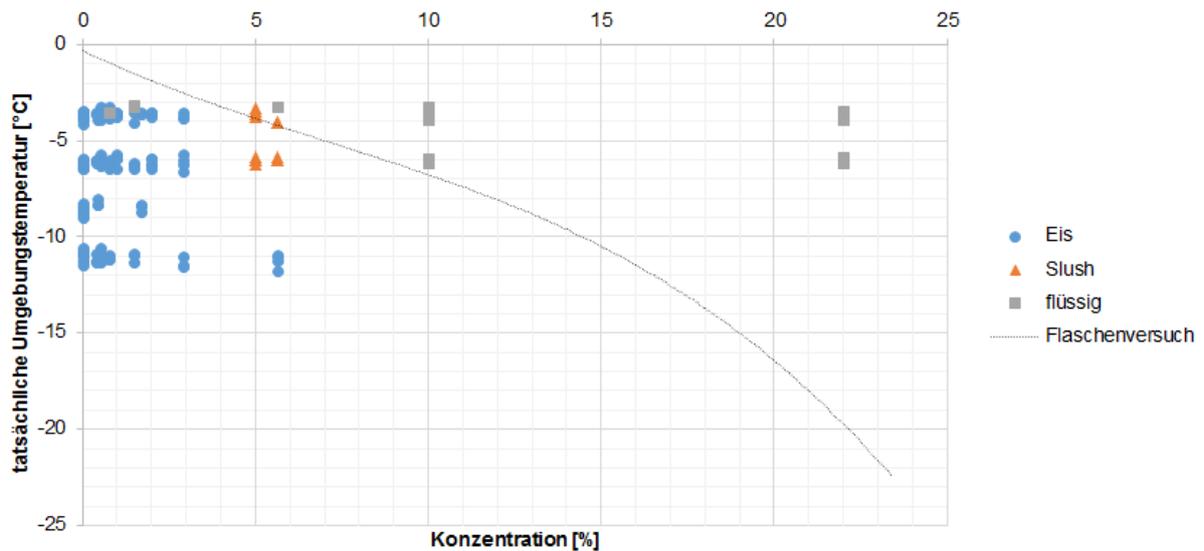


Abbildung 8: Gefrierkurve für NaCl und Probekörperzustand nach Gefriervorgang [8]

Die gewählten Lufttemperaturen wurden zwar am Bedienteil des Klimaschranks eingestellt, allerdings wurden während der Versuchsdurchführungen im Regelfall um 1 K kältere Temperaturdifferenzen im inneren des Klimaschranks gemessen. Für die Auswertung wurden daher die tatsächlich gemessenen Lufttemperaturen herangezogen (Tabelle 4):

Tabelle 4: Unterschied eingestellter zu gemessener Temperatur des Klimaschranks

eingestellte Temp. [°C]	gemessene Temp. [°C]	Differenz [°C]
-2,5	-3,7	-1,2
-5,0	-6,2	-1,2
-7,5	-8,6	-1,1
-10,0	-11,1	-1,1

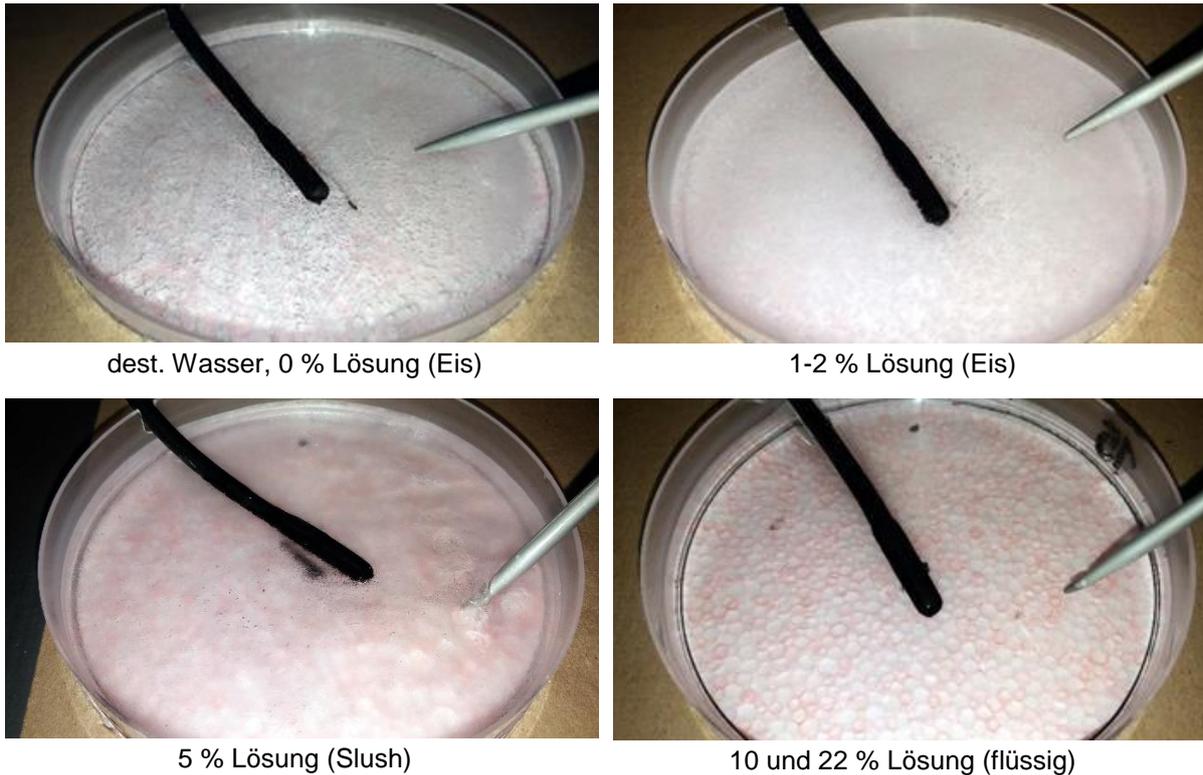


Abbildung 9: Charakteristische Konsistenz der Proben nach dem Gefriervorgang [8]

Für die Bestimmung des Beginns der Eisbildung wurde der Anfang des Halteplateaus bzw. der Wendepunkt (siehe Abbildung 7, Punkt 2 bzw. 5) herangezogen. Das Ende der Eisbildung exakt zu bestimmen gestaltete sich allerdings schwierig, da kein deutlicher Knick (siehe Abbildung 7, Punkt 6) beim Übergang in die Abkühlphase als fester Körper erkennbar war. Daher wurde für einen ersten Vergleich vorerst als Ende der Eisbildung das Erreichen der tiefsten Temperatur am Ende des Versuches herangezogen (siehe Abbildung 7, Punkt 4). In Abbildung 10 bis Abbildung 15 sind exemplarisch die Temperaturverläufe für die Lufttemperatur $-3,7\text{ °C}$ des Basis- und Ergänzungsversuchsprogrammes dargestellt. Die Verläufe für die anderen Temperaturen ($-6,2$, $-8,6$ und $-11,1\text{ °C}$) sind im Anhang 9.4 zusammengefasst.

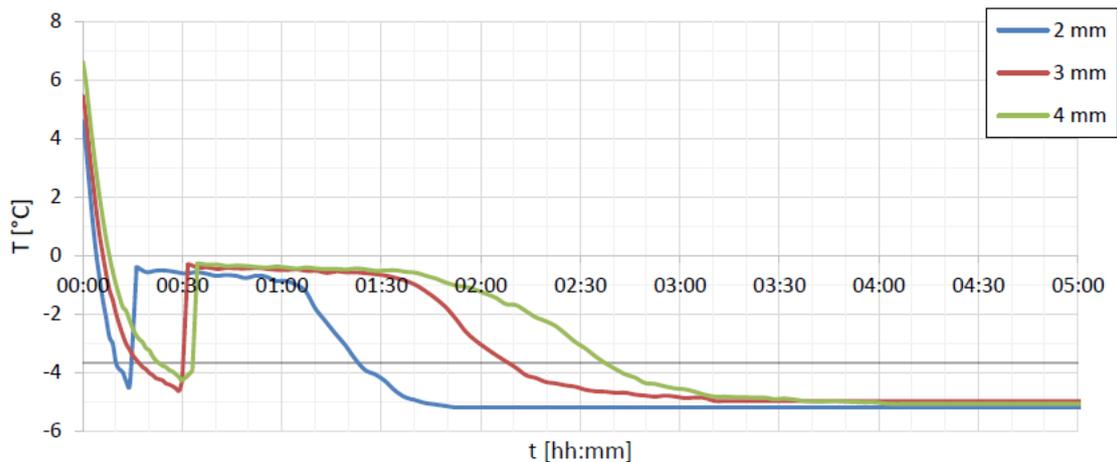


Abbildung 10: Gefrierverlauf dest. Wasser bei -3,7 °C für unterschiedliche Wasserdickungen [8]

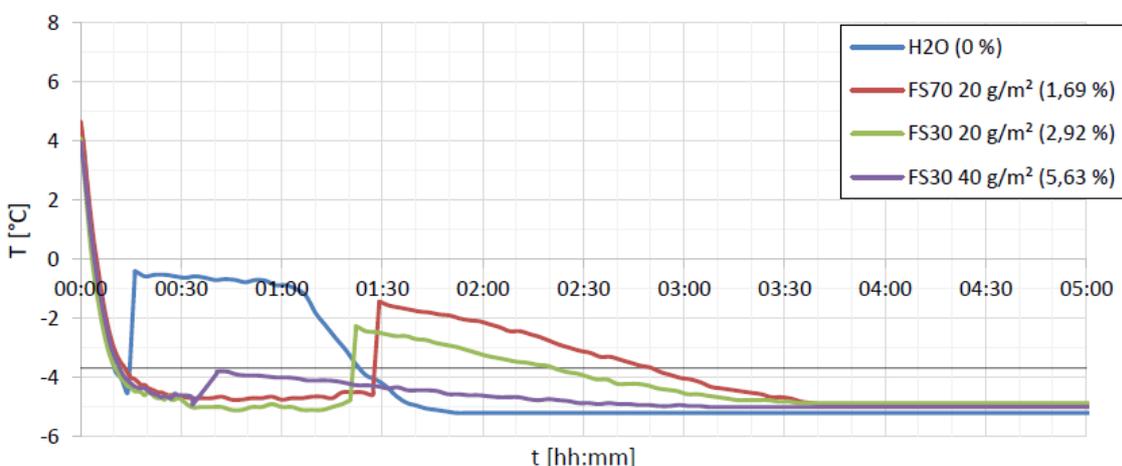


Abbildung 11: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -3,7 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]

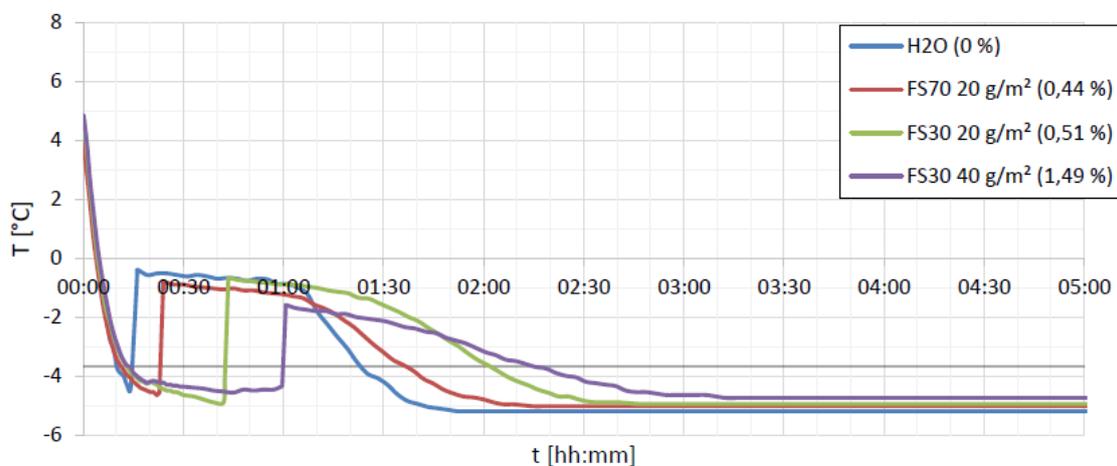


Abbildung 12: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -3,7 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]

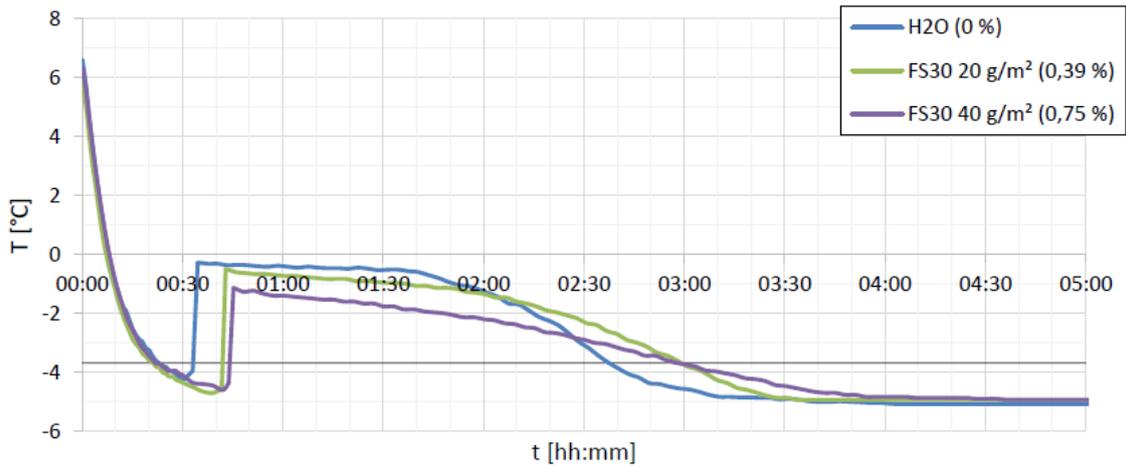


Abbildung 13: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -3,7 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]

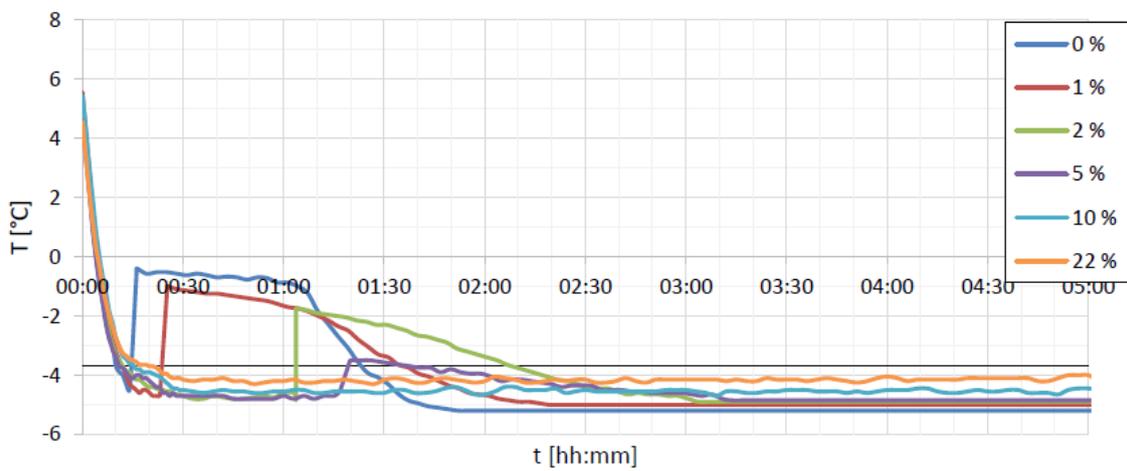


Abbildung 14: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -3,7 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [8]

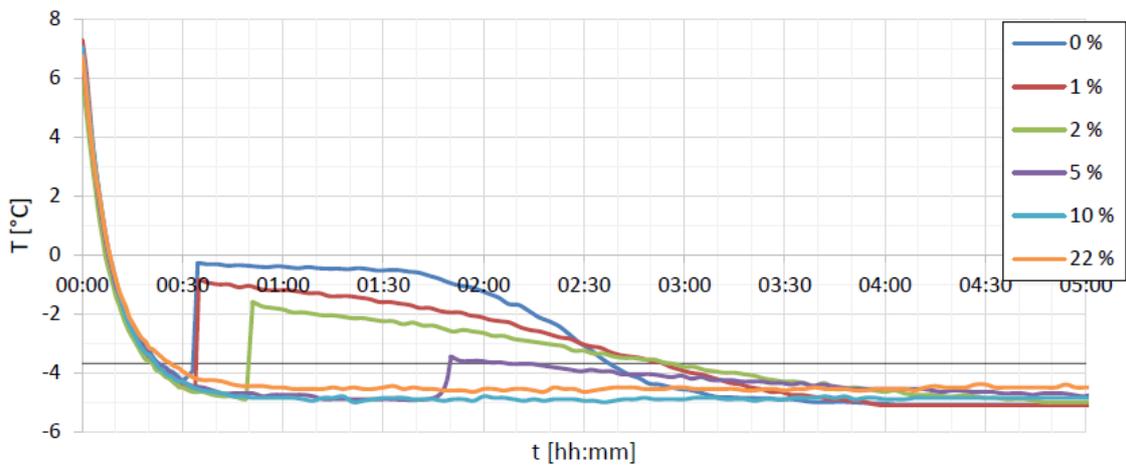


Abbildung 15: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -3,7 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [8]

3.5 Zusammenfassung des Kapitels

Anhand der vorliegenden Ergebnisse können folgende vorläufige Aussagen getroffen werden:

- Die Versuchsanordnung ist erprobt, unterliegt aber teilweise großen zeitlichen Schwankungen bei Wiederholungsprüfungen, da der Zeitpunkt der Eisbildung vor allem bei Temperaturen bis -6 °C sehr sensibel ist und stark von kleinen Verunreinigungen (Kristallisationskeimen) abhängt.
- Bei tieferen Temperaturen bis -11 °C nehmen diese Schwankungen ab, d.h. die Zeit bis zum Gefrierbeginn bzw. Gefrierende unterliegt geringeren Schwankungen und die Versuche zeigen somit eine höhere Stabilität bei Wiederholung.
- Der Beginn der Eisbildung wird mit zunehmender Filmdicke und Solekonzentration verzögert und die gesamte Eisbildungsdauer nimmt erkennbar zu. Die Zeitdifferenzen zu reinem Wasser bei Temperaturen bis -6 °C können mit ca. 15 bis 60 Minuten abgeschätzt werden. Bei tieferen Temperaturen bis -11 °C sind kaum mehr Unterschiede beim Beginn der Eisbildung vorhanden und am Ende der Eisbildung betragen diese weniger als 15 Minuten.
- Praktisch bedeutet dies, dass die Verzögerung des Gefriervorganges durch übliche Restsalzmengen bezogen auf übliche Streuumslaufzeiten unter der Ebene von Autobahnen und Schnellstraßen begrenzt ist.
- Für die Mehrzahl der Fälle bzw. insbesondere im Fall von Reifglätte mit begrenzten Eismengen (ca. $50\text{ bis }150\text{ g/m}^2$) ist es daher zielführender eine ausreichende Salzmenge präventiv auszubringen, um den Gefrierpunkt unter der Fahrbahntemperatur zu halten.
- Für eine Optimierung der Umlaufzeiten steht je nach Fahrbahntemperatur und Solekonzentration ein kleines Zeitfenster zur Verfügung, dass nur bei sorgfältiger Planung und insgesamt kurzen Streuumslaufzeiten nutzbar ist.
- Nasse Fahrbahnen oder größere Niederschlagsmengen mit höherer Filmdicke zwischen 2 bis 4 mm benötigen auch ohne Salz ca. 30 bis 90 Minuten um vollständig zu gefrieren.
- Für die Verhinderung von Glätte müsste in diesen Fällen bereits etwas Restsalz vorhanden sein und der nächste Streuvorgang vor dem Gefrieren erfolgen. Bei Temperaturen bis -1 °C bzw. -2 °C kann dies möglich sein, darunter nur mehr begrenzt.
- Erste Größenordnungen und Zusammenhänge zur Eisbildung können anhand der entwickelten und durchgeführten Versuche abgeschätzt werden, es sind aber noch weitere Überlegungen zur Versuchsdurchführung sowie in der Modellierung nötig.

4 Tau- und Gefriermodell

4.1 Taumodell

4.1.1 Grundlagen und methodische Überlegungen

Die Versuchsanordnung zur Ermittlung der Tauleistung wurde am Institut für Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Wien sowohl für feste (FS0) als auch für flüssige (FS100) auftauende Streumittel entwickelt und gibt jene Menge Eis an, die bei einer bestimmten Temperatur je Menge aufgebrachtem Taumittel in einer definierten Zeit getaut werden kann. Wird Trockensalz bei bestimmten Temperaturen unter dem Eutektikum (siehe Abbildung 16) auf Eis aufgebracht, so setzt der Tauvorgang unverzüglich ein, verlangsamt sich jedoch mit zunehmender Verdünnung der Salzlösung. Sobald die von der Umgebungstemperatur abhängige Gleichgewichtskonzentration erreicht wurde, endet der Tauvorgang. Bei diesem Zustand ist der Gefrierpunkt und die Umgebungstemperatur gleich (Abbildung 16).

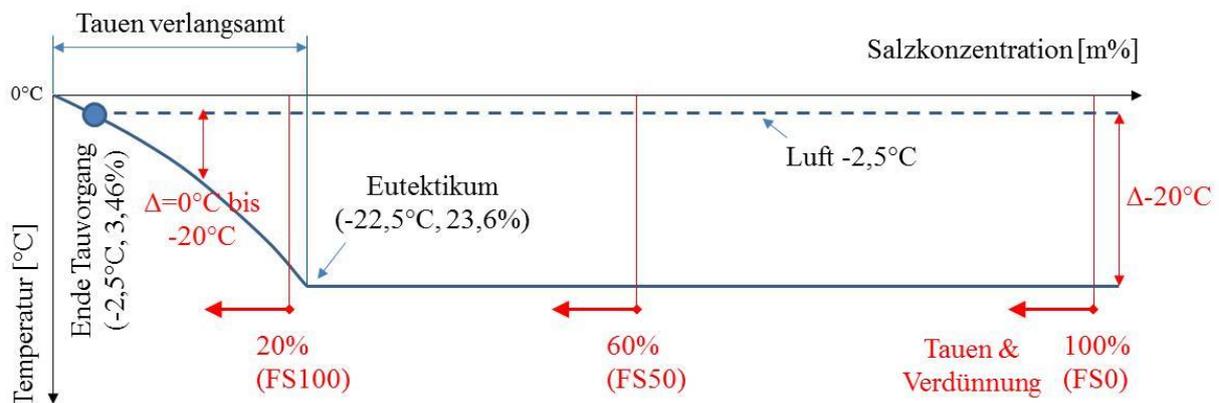


Abbildung 16: Konzentrations- und Gefrierpunktverlauf während des Tauvorganges [16]

4.1.2 Versuchsauswertung und Regressionsmodelle

Trägt man die Ergebnisse der Tauleistungsversuche nach verstrichener Zeit (Minuten) und getauter Menge Eis (g) auf, so lässt sich ein Verlauf mit ausgeprägter Anfangstauleistung erkennen, welcher jedoch mit zunehmender Zeit abflacht und damit ein Nachlassen der Tauleistung anzeigt [4].

Abbildung 17 stellt exemplarisch die Ergebnisse der Tauleistungsversuche bei $-2,5\text{ °C}$ für Trockensalz (FS0) dar und gibt zusätzlich eine Potenzfunktion und Konfidenzintervall als Näherungsmodell mit einer Bestimmtheit von $R^2 = 0,91$ an. Durch die Potenzfunktion ist die Ermittlung der Tauleistung unter den für diesen Versuch geltenden Rahmenbedingungen (Trockensalz FS0, $-2,5\text{ °C}$) möglich. Beispielsweise kann für eine Einwirkdauer von 60 Minuten mit 10 g Salz (FS0) eine Tauleistung von $y_{\text{tau}}(60) = 10 \times 0,6185 \times 60^{0,5361} \approx 55\text{ g}$ Eis ermittelt werden.

Bei der Anwendung der Potenzfunktion ist jedoch zu beachten, dass eine zeitliche Extrapolation nur bedingt möglich ist, da die Tauleistung, wie in den Grundlagen bereits erläutert, mit zunehmender Zeit abnimmt.

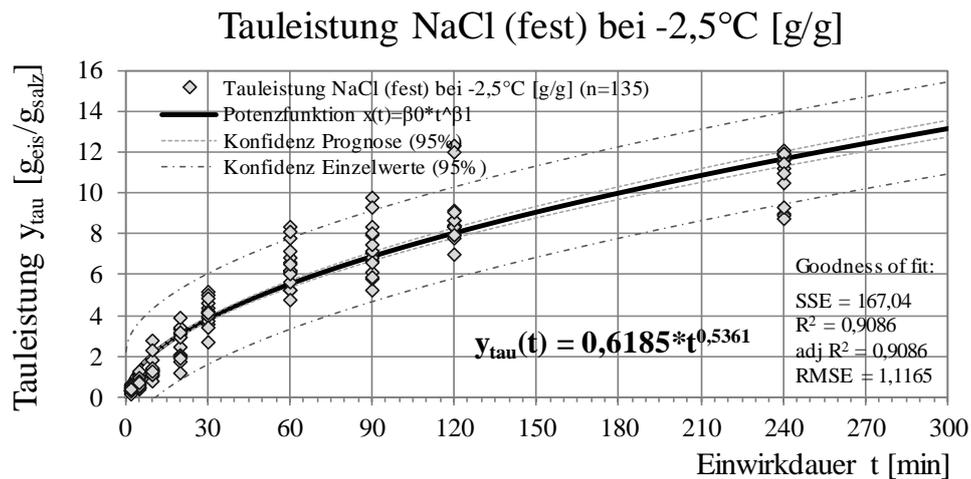


Abbildung 17: Auswertung der Tauleistungsversuche NaCl (FS0) nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [10]

Unter der Bedingung, dass nur Salz eine Tauwirkung besitzt, kann dieses Näherungsmodell für Trockensalz (FS0) auf die Streuung mit erhöhtem Soleanteil (FS30, FS50, FS70, FS100) erweitert werden. Somit ergibt sich für FS30 (70 % Trockensalz und 30 % reine Sole) ein anteiliger Salzgehalt von 0,76 g Salz je ausgebrachtem g Streumittel, für FS50 mit 0,60 g/g, für FS70 mit 0,44 g/g und für FS100 mit 0,20 g/g. Mit dieser Vorgehensweise kann nun die ursprüngliche Tauleistungskurve für Trockensalz FS0 mit den jeweiligen anteiligen Salzgehalten reduziert werden und man erhält die Tauleistung mit erhöhtem Soleanteil gemäß Abbildung 18. Für das vorher angegeben Beispiel der Ermittlung der Einwirkdauer von 60 Minuten mit 10 g Trockensalz verringert sich die Tauleistung bei FS50 auf $0,60 \times 55 = 33$ g Eis.

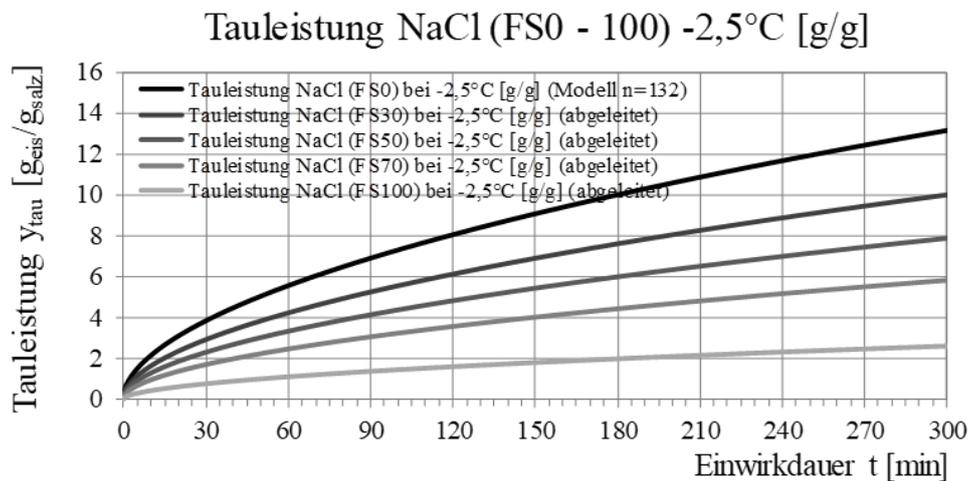


Abbildung 18: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [10]

Diese Methode ermöglicht also die theoretische Tauleistung für beliebig hohe Soleanteile aus den Tauleistungsversuchen von reinem NaCl für -5,0 °C, -7,5 °C und -10 °C zu entwickeln. Diese Fälle können aus Abbildung 19 bis Abbildung 21 entnommen werden.

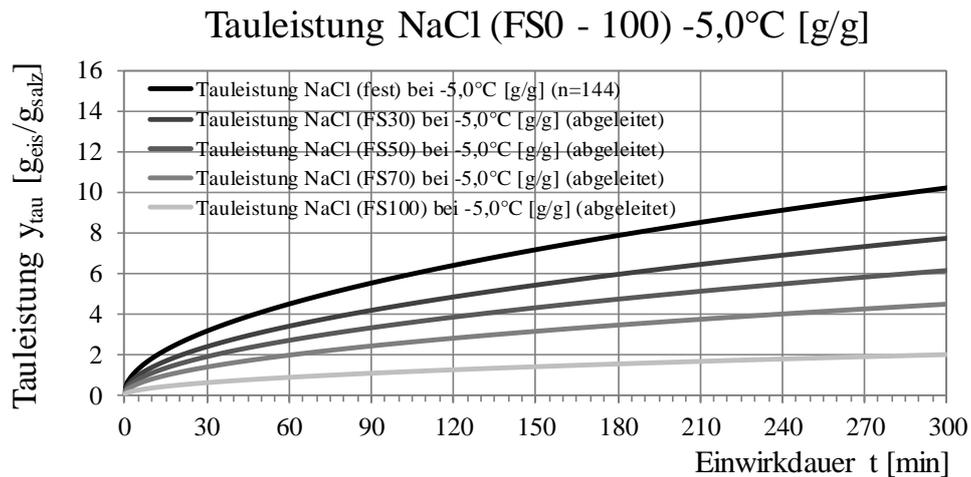


Abbildung 19: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -5,0 °C [10]

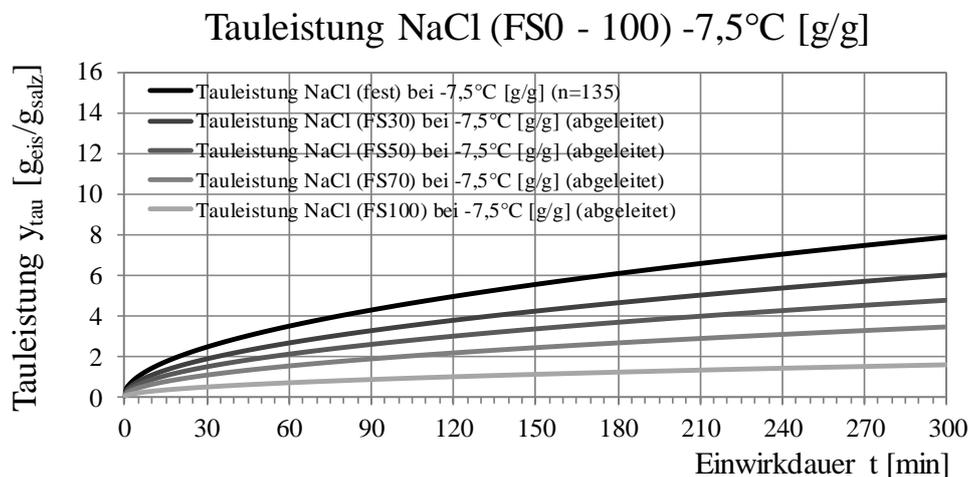


Abbildung 20: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -7,5 °C [10]

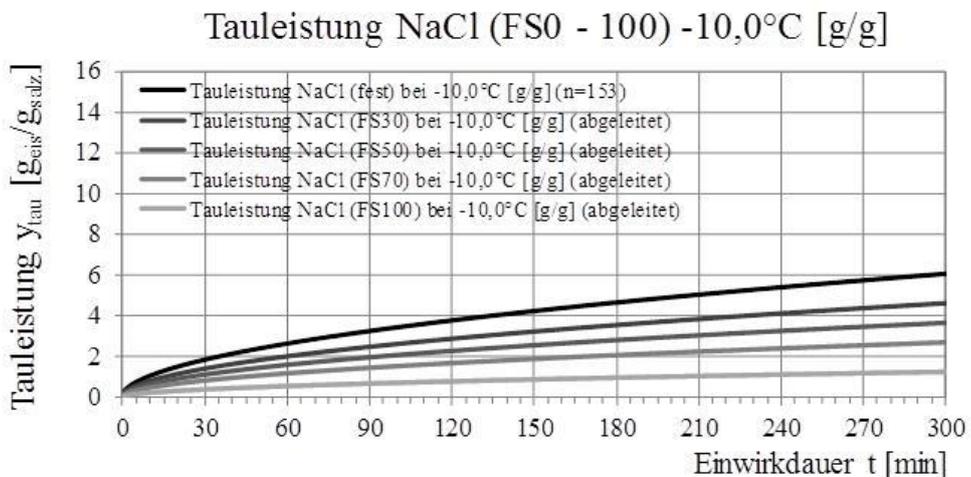


Abbildung 21: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -10,0 °C [10]

Um diese Überlegungen und das damit verbundene Näherungsmodell zu verifizieren, wurden Tauleistungsversuche mit erhöhtem Soleanteil durchgeführt und den bisherigen Erkenntnissen gegenübergestellt. Die Abbildung 22, Abbildung 23, Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen angenäherte Regressionsmodelle für verschiedene Temperaturen (-2,5 °C, -5,0 °C, -7,5 °C und -10 °C), welche auf den durchgeführten Tauleistungsversuchen der unterschiedlichen Streuarten (FS0, FS30, FS50, FS70 und FS100) basieren. Dieser Vergleich zeigt auf, dass die Ergebnisse der tatsächlich durchgeführten Versuche geringere Tauleistungen aufweisen als das Näherungsmodell vermuten lässt. Wahrscheinlich beruht dies auf der Tatsache, dass sich die Tauleistungen bei langer Einwirkdauer aufgrund der geringen Differenz des Gefrierpunktes und der Umgebungstemperatur angleichen (siehe dazu Grundlagen des Taumodells und Abbildung 16). Somit liegt der Vorteil eines erhöhten Soleanteils nicht in seiner Tauleistung, sondern in der besseren Verteilung auf der Fahrbahn und den kleineren Streuverlusten in der Präventivstreuung. [2] [4]

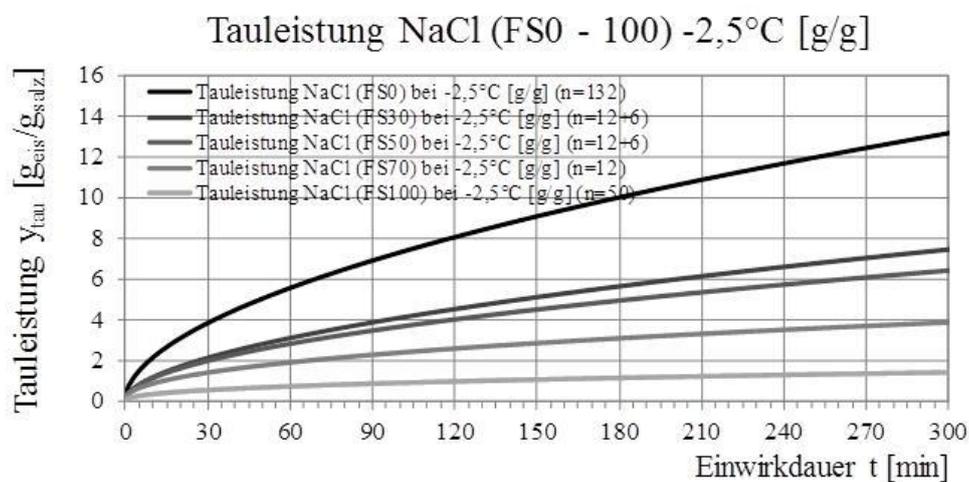


Abbildung 22: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [10]

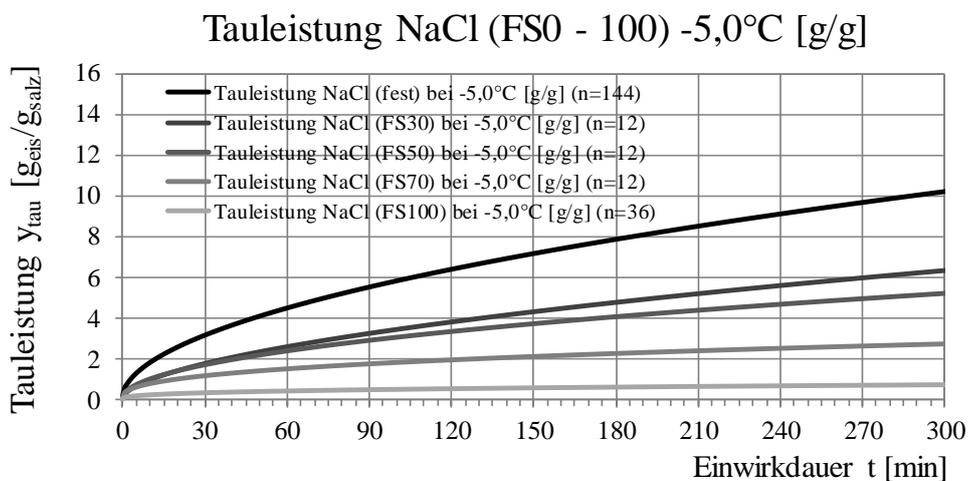


Abbildung 23: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -5,0 °C [10]

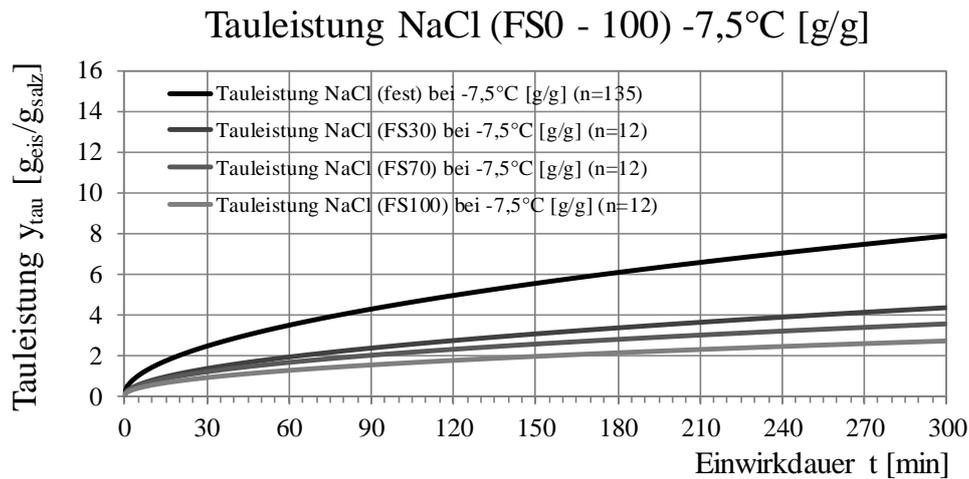


Abbildung 24: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -7,5 °C [10]

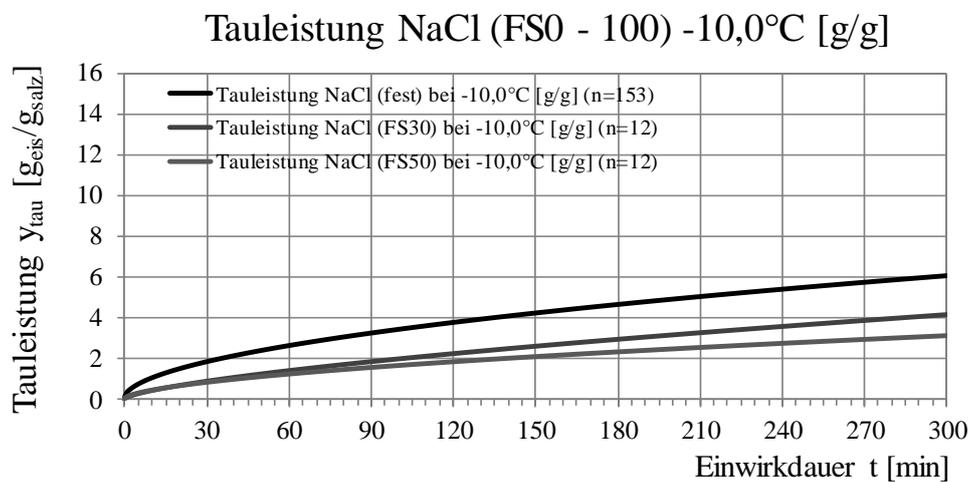


Abbildung 25: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -10,0 °C [10]

4.2 Gefriermodell

4.2.1 Grundlagen und methodische Überlegungen

Bei der Entwicklung eines Modells zur Abbildung des Gefriervorganges müssen mehrere Phasen unterschieden werden. In einer ersten Phase führen Niederschläge zur Verdünnung des vorhandenen Restsalzes und unmittelbarem Tauen gemäß des im vorigen Unterkapitel aufgestellten Taumodells. Sobald die Grenzkonzentration erreicht bzw. unterschritten wurde, erfolgt eine Phase der Unterkühlung bis zum Beginn des Gefriervorgangs. Während des Gefrierens sinkt die Griffbarkeit der Fahrbahn solange bis die Fahrbahnoberfläche vereist und der Reibungsbeiwert stark abgefallen ist (siehe dazu Abbildung 26). Dieser Vorgang ist sowohl von der Niederschlagsmenge als auch von der Texturtiefe der Fahrbahn abhängig und wurde in vorhergehenden Forschungsvorhaben näher untersucht [1] [4].

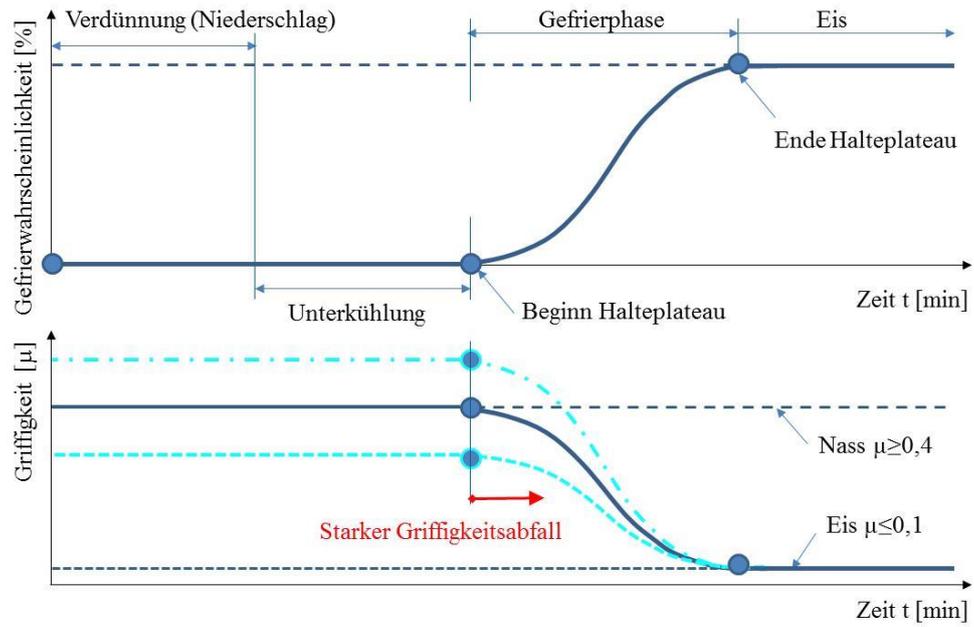


Abbildung 26: Schematische Darstellung der Phasen des Gefriervorganges zusammen mit der Entwicklung der Griffigkeit [16]

5 Rieselfähigkeit

5.1 Inhalt und Methodik

Die Untersuchungen zur Rieselfähigkeit von Tausalzen basieren auf Grundlage der bereits im Forschungsprojekt „Eignungskriterien auftauende Streumittel“ [2] durchgeführten Versuche. Darin wurde die Eignung der Auslaufbox nach Sonntag überprüft, der Feuchtigkeitsgehalt der Salze zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Logistikkette untersucht und die Entwicklung der Rieselfähigkeit im Verlauf einer simulierten Trocken-Feucht-Trocken-Periode ermittelt.

In weiterer Folge wurden in „Effect of anti-caking agents on flowability of de-icing salts“ [11] die Auswirkungen der Beimengung von Antibackmitteln auf die Rieselfähigkeit von Tausalzen untersucht. Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Tausalze (Natriumchlorid) mit verschiedenen Antibackmitteln und variierenden Antibackmittelgehalten unter bestimmten Feuchtigkeitsbedingungen mittels Auslaufbox nach Sonntag geprüft.

Damit sollten die Vorgaben der RVS 12.04.16 [3] für den Antibackmittelgehalt von Natriumchlorid überprüft bzw. eingengt werden, da die gültigen Empfehlungen von 3 bis 125 mg Antibackmittel pro Kilogramm Tausalz großen Interpretationsspielraum aufweisen.

Zusätzlich wurde die Einhaltung der in der ÖNORN 16811-1 [12] geforderten Korngrößen mittels Sieblinienanalyse sowie der mögliche Einfluss der zugesetzten Antibackmittel auf ausgewählte Tausalze sowohl in Form von Trockensalz (FS0) als auch in Form von reiner Sole (FS100) untersucht.

5.2 Auftausalze und Prüfprogramm

5.2.1 Materialauswahl

Um die in Österreich verfügbaren Salze und Antibackmittel sowie die Gehalte letzterer zu identifizieren, wurden die größten Lieferanten am Markt kontaktiert, darunter zählen die Salinen Austria AG, List Salzhandel GmbH, Südwestdeutsche (SWD) Salzwerke AG und European Salt Company (esco) GmbH & Co. KG. Die lieferbaren Salze sind in Tabelle 5 aufgelistet und unterscheiden sich im Wesentlichen durch ihre Abbau- bzw. Produktionsmethoden, Korngrößen und Antibackmittelgehalte.

Jedoch sind nicht alle diese Salze für den Verwendungszweck der Salzstreuung vorgesehen bzw. verfügbar, daher wurde nur eine Auswahl an Stein- sowie Siedesalzen in das Prüfprogramm aufgenommen und Meersalz vorläufig unberücksichtigt gelassen. Diese Einschränkung auf Tausalze ist deswegen hinnehmbar, da im Wesentlichen nur der Einfluss der Antibackmittel auf die Rieselfähigkeit beurteilt und kein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Abbau- bzw. Produktionsarten angestellt werden soll.

Als Antibackmittel wurde von annähernd allen Lieferanten Natriumferrocyanid $\text{Na}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, auch als Natriumhexacyanoferrat bezeichnet, rückgemeldet. Nur ein Lieferant vertreibt cyanidfreies und biologisch abbaubares Antibackmittel mit der Bezeichnung Ecosel Bio-Care.

Für die systematische Untersuchung der Rieselfähigkeit wurden insgesamt 12 Produkte von 4 Lieferanten aufgenommen (zusätzlich in Tabelle 2 fett markiert):

- 1 Steinsalz 0/3 mm ohne Antibackmittel
- 1 Steinsalz 0/2 mm ohne Antibackmittel
- 1 Steinsalz 0/3 mm mit 70-100 mg/kg Natriumferrocyanid
- 1 Steinsalz 0/3 mm mit 70-100 mg/kg Natriumferrocyanid
- 3 Siedesalze fein ohne Antibackmittel
- 2 Siedesalze fein mit 8 mg/kg Natriumferrocyanid
- 1 Siedesalz fein mit 22 mg/kg Natriumferrocyanid
- 1 Siedesalz fein mit 80-100 mg/kg Natriumferrocyanid
- 1 Siedesalz fein mit 12 mg/kg EcoSel Biocare

Tabelle 5: Verfügbare Auftausalze und Antibackmittel sowie -gehalte für Österreich

Auftausalz	Korngröße [mm]	Antibackmittel	Antibackmittelgehalt [mg/kg]	Lieferant	Anmerkung
Steinsalz / Rock Salt / RS	fein	Natriumferrocyanid	70-80	LIST Salzhandel GmbH	schwer lieferbar
	0/2	Natriumferrocyanid	70-100	SWD Salzwerke AG	möglich
	0/2	ohne	0	SWD Salzwerke AG	möglich
	0/3	Natriumferrocyanid	70-100	SWD Salzwerke AG	möglich
	0/3	ohne	0	SWD Salzwerke AG	möglich
	0/3	Natriumferrocyanid	70-80	LIST Salzhandel GmbH	möglich
	0/3	Natriumhexacyanoferrat	80-120	ESCO GmbH	möglich
	0/3	ohne	0	ESCO GmbH	möglich
	0/5	Natriumferrocyanid	70-80	LIST Salzhandel GmbH	Sonderprodukt
	0/5	Natriumferrocyanid	70-100	SWD Salzwerke AG	möglich
Siedesalz / Vacuum Salt / VS	fein	Natriumhexacyanoferrat	8	Salinen Austria AG	möglich
	fein	Natriumhexacyanoferrat	0	Salinen Austria AG	möglich, kein Auftausalz
	fein	Natriumferrocyanid	8	LIST Salzhandel GmbH	möglich
	fein	ohne	0	LIST Salzhandel GmbH	möglich
	fein	Natriumferrocyanid	20	LIST Salzhandel GmbH	möglich
	fein	EcoSel Biocare (Weinstein)	12	LIST Salzhandel GmbH	möglich
	fein	Natriumhexacyanoferrat	80-100	ESCO GmbH	Sonderprodukt
	fein	ohne	0	ESCO GmbH	möglich
Meersalz	0/1	Natriumferrocyanid	60	LIST Salzhandel GmbH	schwer lieferbar
	0/1	ohne	0	LIST Salzhandel GmbH	möglich
	0,5/2	Natriumferrocyanid	60	LIST Salzhandel GmbH	möglich

Wie einleitend bereits erwähnt wurden zusätzlich Siebanalysen zur Beurteilung der Korngrößenverteilung und weiters Tauleistungsversuche zur Beurteilung des Einflusses der Antibackmittel auf die Tauleistung mit folgenden zwei Auftausalzen, jeweils ohne zugesetztem Antibackmittel und jeweils mit hohem Antibackmittelgehalt durchgeführt:

- Steinsalz Korngröße 0/3 ohne Antibackmittel
- Steinsalz Korngröße 0/3 mit 70 mg Natriumferrocyanid je kg Steinsalz
- Siedesalz fein ohne Antibackmittel
- Siedesalz fein mit 80 mg Natriumferrocyanid je kg Siedesalz

5.2.2 Sieblinienvergleich Steinsalz und Siedesalz

Die in Abbildung 27 ersichtlichen Sieblinien verdeutlichen, dass die Unterschiede hinsichtlich des Vorhandenseins von Antibackmittel vernachlässigbar sind, die in ÖNORM 16811-1 [12] geforderten Kornklassen (Abbildung 28) jedoch nicht eingehalten werden.

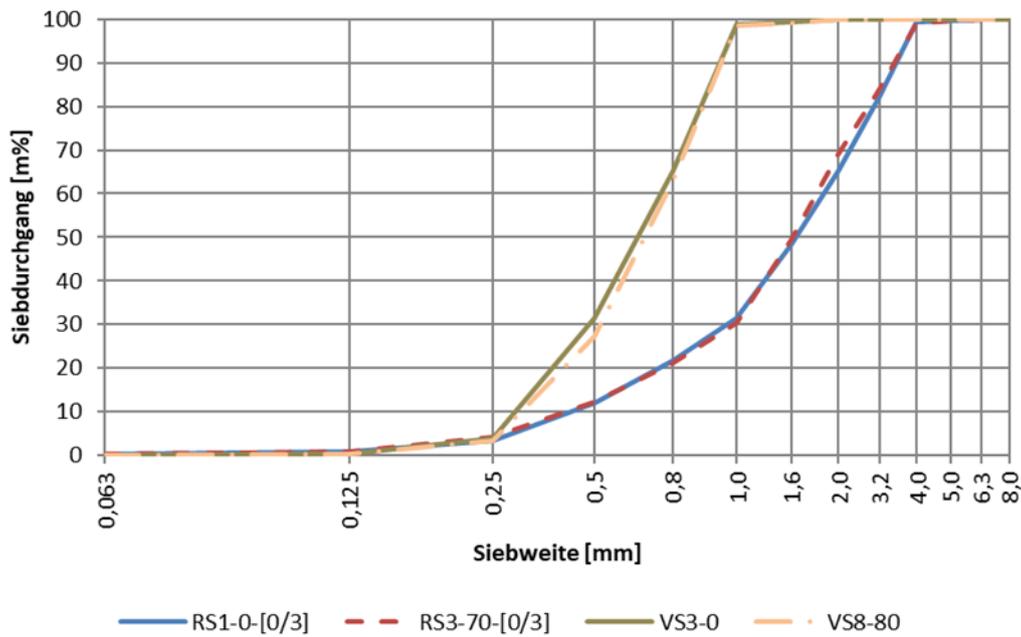


Abbildung 27: Sieblinien Stein- und Siedesalz je mit und ohne Antibackmittel

Bis zur Siebweite 0,25 mm ist die Kornverteilung sowohl von Stein- als auch von Siedesalz mit unter 5 % Masseprozent Siebdurchgang annähernd ident. Das getestete Siedesalz entspricht Kornklasse 0,25/1, dies wäre laut ÖNORM 16811-1 [12] im Bereich „extrafeines Salz“ und „feines Salz“. Steinsalz kann als Kornklasse 0,25/4 bezeichnet werden und entspricht damit der Klasse „mittelgrobes Salz“.

Siebdurchgang in % Massenanteil			
Kornklasse EF (extrafeines Salz)	Kornklasse F (feines Salz)	Kornklasse M (mittelgrobes Salz)	Kornklasse C (grobes Salz)
0,125 mm ≤ 5	0,125 mm ≤ 5	0,125 mm ≤ 7	0,8 mm ≤ 35
0,8 mm 25 bis 100	0,8 mm 10 bis 40	0,8 mm 5 bis 35	3,15 mm 30 bis 80
2,0 mm 100	1,6 mm 30 bis 80	1,6 mm 10 bis 60	6,3 mm 75 bis 95
(2 % Massenanteil fertigungsbedingte Toleranz mit Größtkorn ≤ 3 mm)	3,15 mm 90 bis 100	3,15 mm 45 bis 90	10 mm 100
	5,0 mm 100	6,3 mm 100	(2 % Massenanteil fertigungsbedingte Toleranz mit Größtkorn ≤ 12 mm)
	(2 % Massenanteil fertigungsbedingte Toleranz mit Größtkorn ≤ 8 mm)	(2 % Massenanteil fertigungsbedingte Toleranz mit Größtkorn ≤ 8 mm)	

Abbildung 28: Anforderungen an Sieblinie nach ÖN 16811-1 [12]

5.2.3 Prüfprogramm Rieselfähigkeit

Auf Basis der neun verschiedenen Produktkategorien und zwei bis vier untersuchten Feuchtigkeitsgehalten (0; 0,25; 0,5; 0,75 M-%) ergaben sich insgesamt 34 Prüfkombinationen. Ergänzend dazu wurden auch stichprobenartige Prüfungen mit den Feuchtigkeitsgehalten im Anlieferungszustand (0,01; 0,05 M-%) sowie mit 0,1 M-% und 1,2 M-% durchgeführt. Alle Prüfungen wurden mindestens mit Zweifachbestimmung ausgeführt, wodurch sich über 150 Einzelversuche ergaben (siehe Tabelle 6).

Die in weiterer Folge verwendete Nomenklatur ist der Tabelle 6 in der Spalte Probenbezeichnung zu entnehmen und setzt sich wie folgt zusammen:

RS3-70[0/3] = Rock Salt (Steinsalz) – Nr. 3 – 70 mg/kg Antibackmittelgehalt [0/3 mm Korngröße]

VS7-22 = Vacuum Salt (Siedesalz) – Nr. 7 – 22 mg/kg Antibackmittelgehalt

Tabelle 6: Prüfprogramm Rieselfähigkeit

Salz	Korngröße [mm]	Antibackmittel	Antibackmittelgehalt [mg/kg]	Probenbezeichnung	Feuchtigkeitsgehalt [%]						Bestimmung [Stk.]	Versuche [Stk.]	
					0	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75			
Steinsalz	0/3	keines	0	RS1-0[0/3]	0			0,25	0,5	0,75		2 - 3	10
	0/2	keines	0	RS2-0[0/2]	0	0,05		0,25	0,5	0,75		2 - 3	13
	0/3	Natriumferrocyanid	70-100	RS3-70[0/3]	0			0,25	0,5	0,75		2 - 3	11
	0/2	Natriumferrocyanid	70-100	RS4-70[0/2]	0			0,25	0,5	0,75		2 - 3	10
Siedesalz	fein	keines	0	VS1-0	0			0,25	0,5	0,75	1,2	2 - 3	14
	fein	keines	0	VS2-0	0	0,01	0,1	0,25	0,5	0,75		2 - 3	17
	fein	keines	0	VS3-0	0			0,25	0,5	0,75		3	12
	fein	Natriumferrocyanid	8	VS4-8	0			0,25	0,5	0,75		2	8
	fein	Natriumferrocyanid	8	VS5-8	0	0,01	0,1	0,25	0,5	0,75		2 - 3	17
	fein	EcoSel Biocare	12	VS6-12Bio	0	0,02		0,25	0,5	0,75		2 - 5	14
	fein	Natriumferrocyanid	22	VS7-22	0		0,1	0,25	0,5	0,75		3 - 5	20
	fein	Natriumferrocyanid	80-100	VS8-80	0			0,25	0,5	0,75		3	12
Gesamtsumme Einzelprüfungen [Stk.]											158		

5.2.4 Prüfprogramm Tauleistung mit und ohne Antibackmittel

Die Tauleistung wurde für Tausalze mit und ohne Antibackmittel sowohl am festen Material (FS0) und für reine Sole Streuung (FS100) ermittelt. Als Einwirkungszeit wurden 60 und 240 Minuten und als Prüftemperatur -5 °C gewählt. Die Prüfungen wurden mit Vierfachbestimmung ausgeführt und ergaben somit über 60 Einzelprüfungen (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Prüfprogramm Tauleistung mit und ohne Antibackmittel

Salz	Korngröße [mm]	Antibackmittel	Antibackmittelgehalt [mg/kg]	Probenbezeichnung	Einwirkungszeit [min]						Bestimmung [Stk.]	Versuche [Stk.]	
					FS0	FS0	FS50	FS50	FS100	FS100			
Steinsalz / Rock Salt	0/3	keines	0	RS1-0[0/3]	60	240			60	240		4	16
	0/3	Natriumferrocyanid	70-100	RS3-70[0/3]	60	240			60	240		4	16
Siedesalz / Vacuum Salt	fein	keines	0	VS3-0	60	240			60	240		4	16
	fein	Natriumferrocyanid	80-100	VS8-80	60	240			60	240		4	16
Gesamtsumme Einzelprüfungen [Stk.]											64		

5.3 Ergebnisse Rieselfähigkeit

Die Versuchsmethode mit der Auslaufbox nach Sonntag hat sich für die Beurteilung der Rieselfähigkeit von Tausalzen gut bewährt, denn zwischen den Parametern Auslaufrate und innerer Reibungswinkel besteht eine sehr gute Korrelation. Weiters sind die Unterschiede zwischen dem Vorhandensein von Antirückmittel sowie den verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten deutlich erkennbar (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30).

Wenn man alle Messergebnisse der Rieselversuche in Form der Auslaufrate und des inneren Reibungswinkels gegenüberstellt, so sind die in Abbildung 29 ersichtlichen Datenpunkte zu sehen. Berechnet man den Trend dieser Werte, so ergibt sich folgende Regressionsgerade mit der Bestimmtheit $R^2 = 0,97$: $Y = -0,0142x + 1,1674$

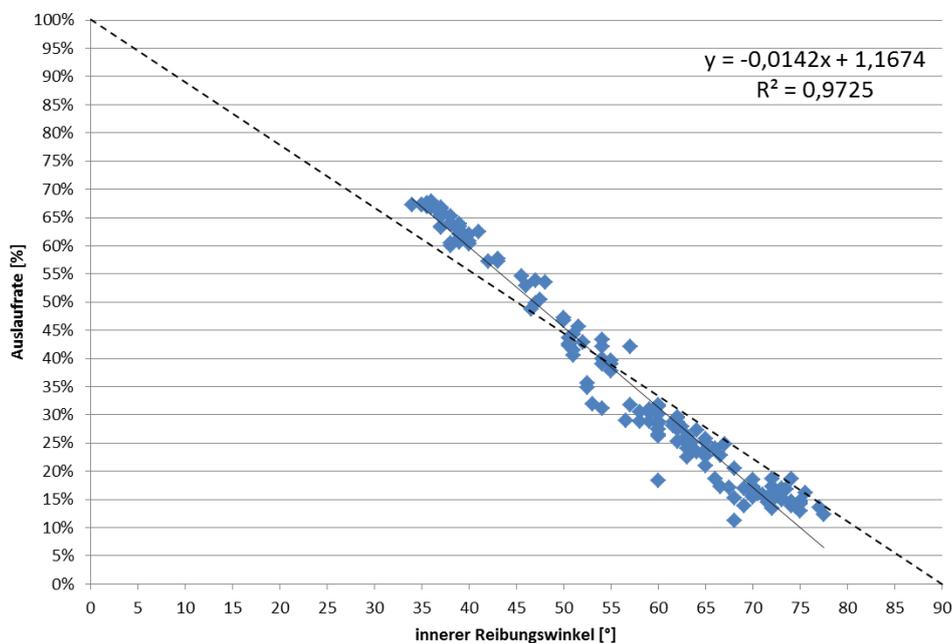


Abbildung 29: Korrelation der Auslaufrate und des inneren Reibungswinkels

Die Abbildung 30 kennzeichnet die Bereiche der Salze mit und ohne Antirückmittel in Abhängigkeit ihrer Feuchtigkeit. Dabei sind jene mit durchgehender Linie umhüllten Salze mit Antirückmittel versehen, jene mit unterbrochener Linie ohne Zusätze. Ferner sind die verschiedenen Feuchtigkeitsgehalte (0; 0,25; 0,50 und 0,75 M-%) farblich kategorisiert. Davon ausgenommen ist das Siedesalz VS6-12-Bio, welches unabhängig seines Feuchtigkeitsgehaltes eine eigene Kategorie bildet.

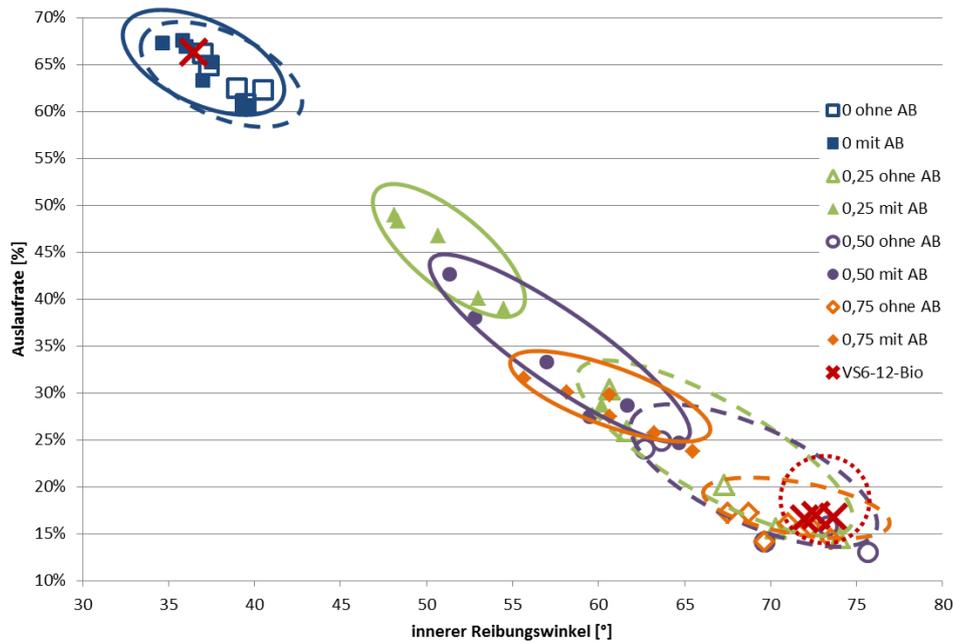


Abbildung 30: Zusammenhang der Auslaufrate und des inneren Reibungswinkels in Abhängigkeit des Antbackmittels und der Feuchtigkeit

In Abbildung 31 ist jener Bereich der Abbildung 30 hervorgehoben, in dem sich größtenteils die Ergebnisse des Salzes mit biologischem Antbackmittel (VS6-12-Bio) befinden. Dies soll den Umstand verdeutlichen, dass sich Salz mit biologischem Antbackmittel bezüglich der Rieselfähigkeit jedenfalls wie Salz ohne Antbackmittel bzw. schlechter verhält.



Abbildung 31: Verhalten des Streusalzes VS6-12-Bio

Die Rieselfähigkeit von trockenen Tausalzen ist für alle geprüften Varianten annähernd gleich und somit unabhängig vom Antbackmittelgehalt, wobei Siedesalze, vermutlich wegen der kleineren Korngröße, gegenüber Steinsalzen etwas rieselfähiger sind. Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass der Feuchtigkeitsgehalt des Tausalzes einen sehr wesentlichen Einfluss auf die Rieselfähigkeit hat. Der Grenzwert der Feuchte von 0,5 % darf daher nicht überschritten werden, da die Rieselfähigkeit sonst stark abnimmt.

Vergleicht man diesen Wert mit dem in der ÖNORM EN 16811-1 [12] festgesetzten Grenzwert für trockenes Salz, nämlich weniger als 0,6 M-% Feuchtigkeit, so lässt dies auf eine zu liberale Auslegung der Norm schließen. Außerdem wird darin eine Mindestfeuchtigkeit von 0,2 M-% für Steinsalz empfohlen, um bei Manipulation Staubeentwicklung zu verringern. Betrachtet man ausschließlich die Rieselversuche von Steinsalz, so ist zu erkennen, dass eine Feuchtigkeit von 0,25 bis 0,50 M-% eine Verschlechterung der Auslaufrate auf 50 % des Ursprungswertes (-50 Prozentpunkte) ohne Antibackmittel und auf 80 % des Ursprungswertes (-20 Prozentpunkte) mit Antibackmittel hervorruft. Die genauen Werte sind in Tabelle 8 aufgelistet und in Abbildung 32 grafisch ersichtlich. Dabei ist in diesen Grafiken die Auslaufrate ausnahmsweise relativ zur Auslaufrate bei 0 M-% Feuchtigkeit gesetzt.

Tabelle 8: Auslaufrate bezogen auf den prozentualen Auslauf vollkommener Trockenheit

Auslaufrate	0 M%	0,25 M%	0,50 M%	0,75 M%
RS1-0-[0/3]	100%	48,80%	38,70%	23,20%
RS2-0-[0/2]	100%	25,50%	23,30%	23,30%
RS3-70-[0/3]	100%	79,60%	70,30%	52,00%
RS4-70-[0/2]	100%	63,30%	52,70%	43,50%
VS1-0	100%	41,40%	39,90%	27,60%
VS2-0	100%	22,40%	24,30%	24,90%
VS3-0	100%	30,50%	19,60%	23,80%
VS4-8	100%	59,70%	42,20%	39,40%
VS5-8	100%	42,40%	36,60%	35,30%
VS6-12-Bio	100%	25,60%	24,90%	25,20%
VS7-22	100%	80,20%	56,90%	45,00%
VS8-80	100%	69,50%	42,70%	44,20%

Das Versagen des biologischen Antibackmittels (VS6-12-Bio) bezüglich der Auslaufrate ist außerdem durch Betrachtung der Werte in der Tabelle 8 bestätigt: Unabhängig des Feuchtigkeitsgehaltes des Salzes bleibt die Auslaufrate bei knapp einem Viertel des ursprünglichen Wertes (-75 Prozentpunkte).

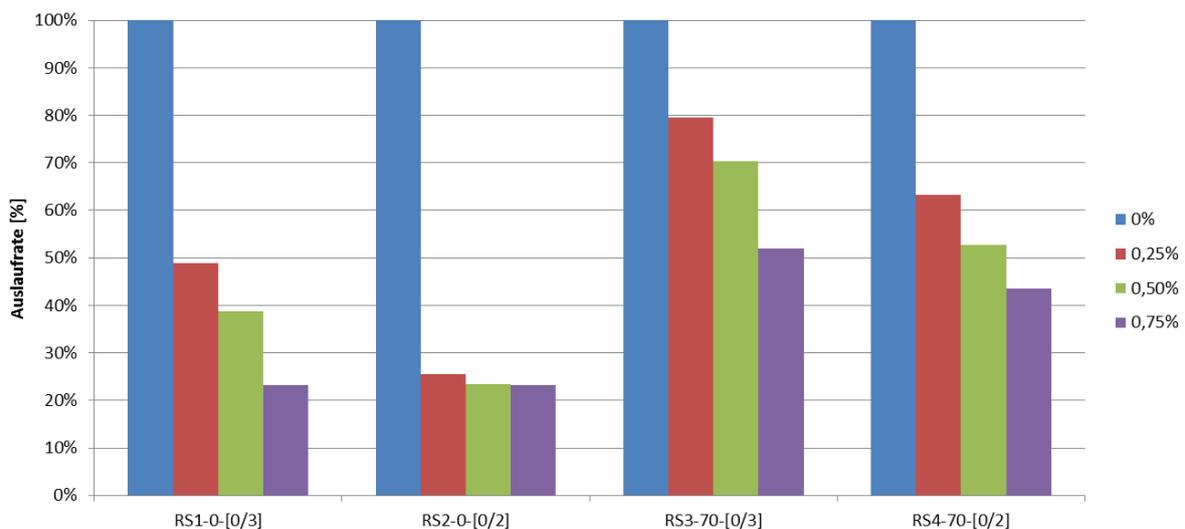


Abbildung 32: Relative Auslaufrate von Steinsalz bezogen auf vollkommene Trockenheit

Steinsalze mit einem Größtkorn von 2 mm besitzen eine geringere Rieselfähigkeit und sind anfälliger auf Verklumpungen als Steinsalze mit einem Größtkorn von 3 mm. Im feuchten Zustand weisen Siedesalze allerdings eine geringere Rieselfähigkeit auf als Steinsalze, außer der Antibackmittelgehalt beträgt ≥ 22 mg/kg. Die biologische Antibackmittelalternative zeigte keine Verbesserung der Rieselfähigkeit im Vergleich zu Tausalzen ohne Antibackmittel.

Die Ergebnisse (inklusive Standardabweichungen) aller geprüften Tausalze in Abhängigkeit ihrer Feuchtigkeit sind in Abbildung 33 bezüglich der Auslaufrate und in Abbildung 34 bezüglich des inneren Reibungswinkels dargestellt.

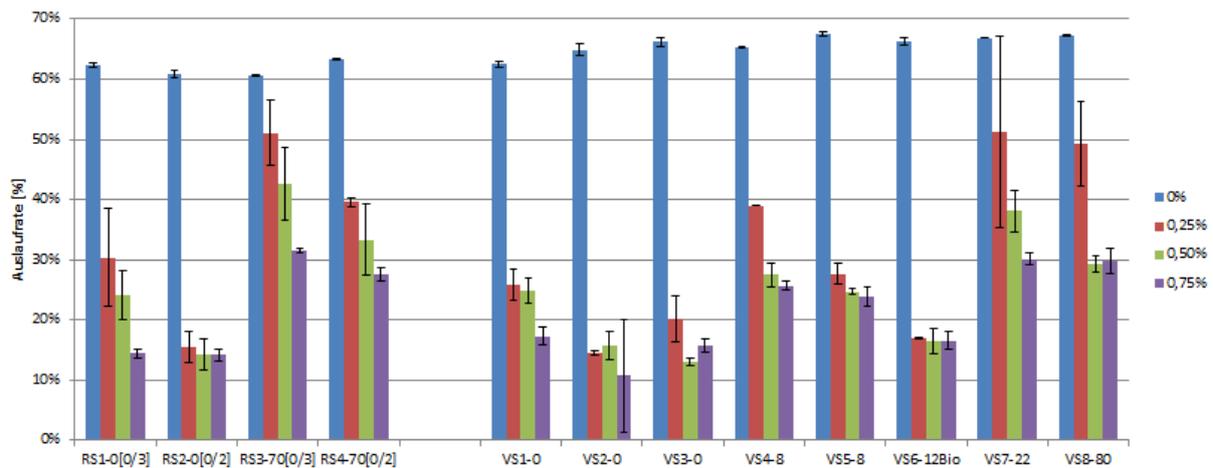


Abbildung 33: Auslaufraten in Abhängigkeit des Taumittels und der Feuchtigkeit

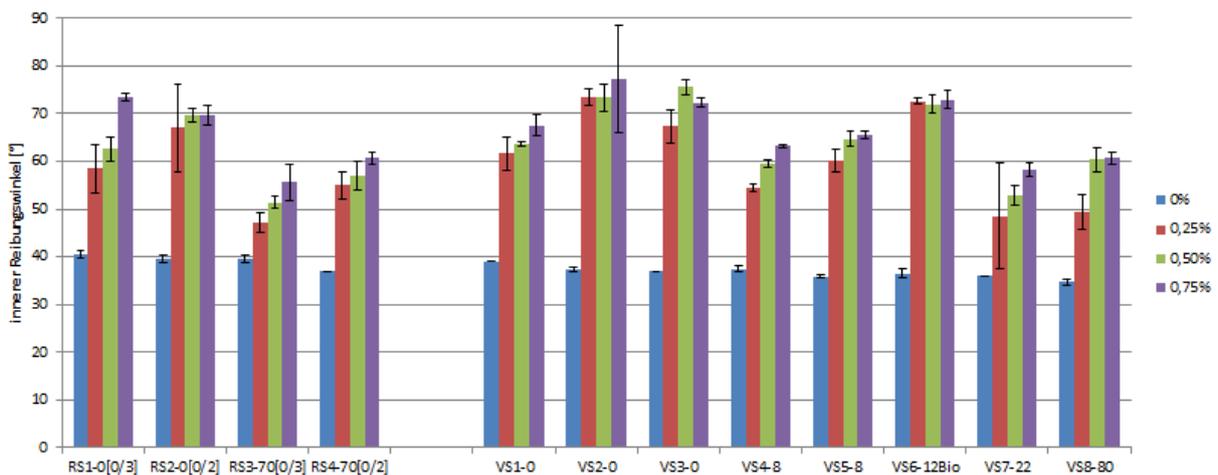


Abbildung 34: Innerer Reibungswinkel in Abhängigkeit des Taumittels und der Feuchtigkeit

Auf Basis der durchgeführten Prüfungen können die optimalen Antibackmittelgehalte vorerst grob geschätzt werden, da keine Tausalze mit anderen Antibackmittelgehalten zur Verfügung standen. Anhand der Abbildung 35 lässt sich bis zu einem Feuchtegehalt $< 0,5$ % der für eine ausreichende Rieselfähigkeit notwendige Antibackmittelgehalt für Steinsalz 0/3 mm mit ca. 130 mg/kg, für Steinsalz 0/2 mm mit ca. 180 mg/kg abschätzen. Bei Siedesalz liegt dieser

Wert bei ca. 20 mg/kg (Abbildung 36), wobei eine deutliche Erhöhung des Antibackmittelgehaltes auf ≥ 80 mg/kg keine Verbesserung der Rieselfähigkeit im Vergleich zu 22 mg/kg bringt. Zusätzlich ist in Abbildung 36 das Siedesalz mit der biologischen Antibackmittelalternative hervorgehoben.

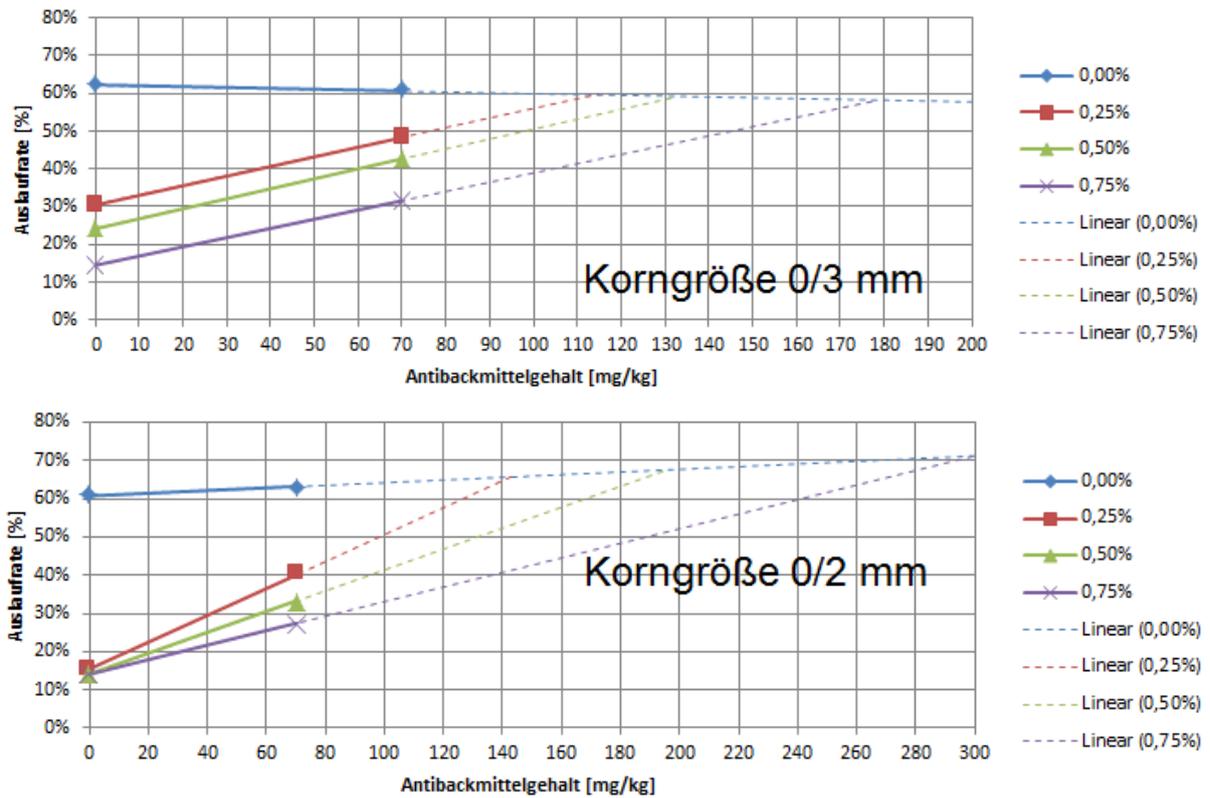


Abbildung 35: Optimum des Antibackmittelgehaltes für Steinsalze [11]

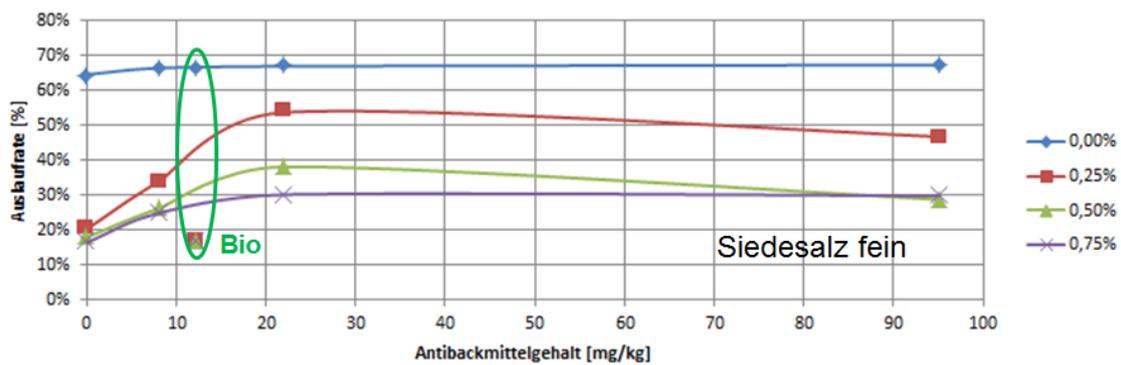


Abbildung 36: Optimum des Antibackmittelgehaltes für Siedesalze [11]

5.4 Ergebnisse Tauleistung mit und ohne Antibackmittel

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Vorhandensein von Antibackmittel weder bei Steinsalz noch bei Siedesalz bei Verwendung als Trockenmaterial (FS0) und reiner Sole (FS100) negativ auswirkt (siehe Abbildung 37 und Abbildung 38).

Dabei wurde Trockensalz im Ausmaß von ca. 10 g bzw. reine Sole (20%-NaCl-Lösung) mit ca. 12 g auf eine definierte Eisplatte aufgebracht und nach 60 bzw. 240 Minuten Einwirkzeit das dadurch getaute Eis abgegossen. Der Quotient aus der Menge des aufgebrachtten Salzes bzw. der aufgebrachtten Sole und der Menge des getauten Eises entspricht der Tauleistung (in Abhängigkeit der Einwirkdauer).

Da das gelieferte Steinsalz grobe Verunreinigungen enthielt, waren Abweichungen in den Ergebnissen zu erwarten. Dennoch lässt sich feststellen, dass die Tauleistung von Steinsalz als 20%-Sole (FS100) von seinem Antirückmittelgehalt unabhängig ist. Als reines Trockensalz (FS0) würden die Ergebnisse auf eine bessere Leistung des Salzes mit Antirückmittel hindeuten, wobei aufgrund der bereits genannten Verunreinigung der Unterschied nicht eklatant sein dürfte. Siehe dazu Abbildung 37.

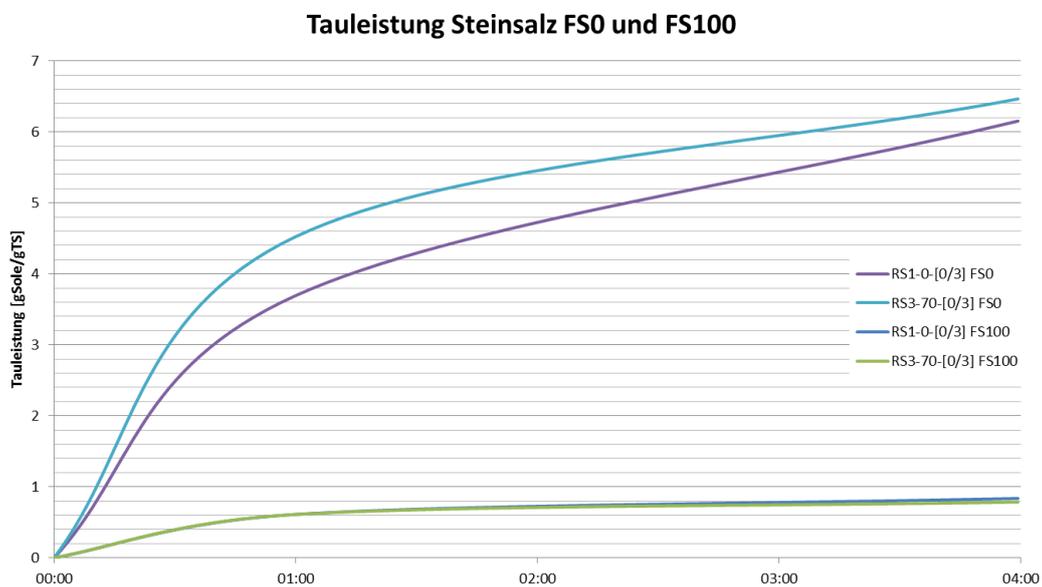


Abbildung 37: Tauleistung Steinsalz FS0 und FS100 mit und ohne Antirückmittel

Auch die Tauleistung von Siedesalz (Abbildung 38) weist bezüglich des Vorhandenseins von Antirückmittel keinen relevanten Unterschied auf. Dies gilt sowohl für Trockensalz FS0 als auch für reine 20%-NaCl-Sole FS100.

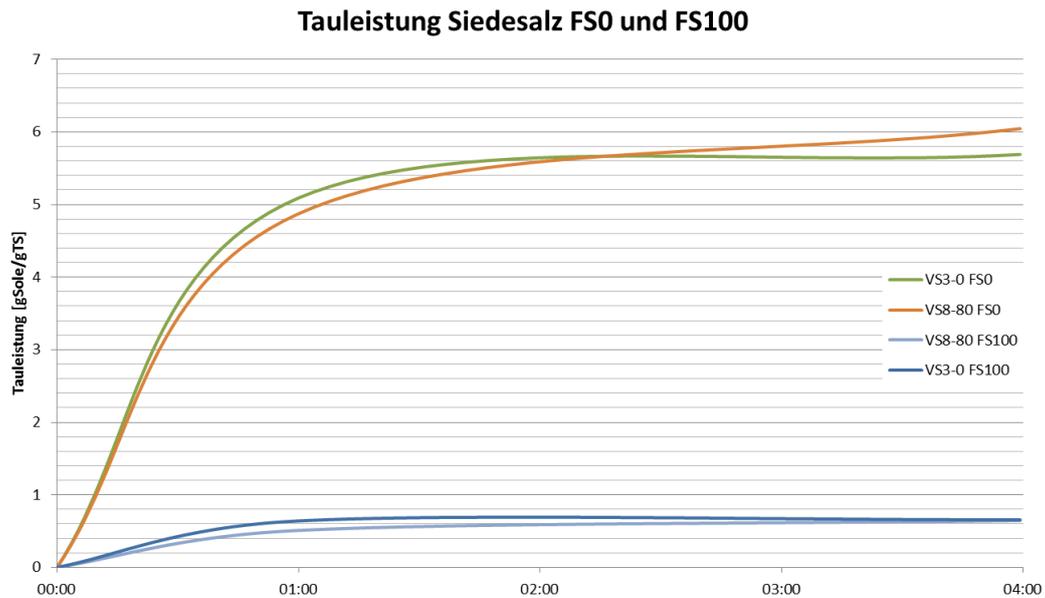


Abbildung 38: Tauleistung Siedesalz FS0 und FS100 mit/ohne Antibackmittel

Bezieht man die Tauleistung auf die Einwirkzeit so bezeichnet man dies als Taurate. In Abbildung 39 sind zwei Erkenntnisse für Trockensalz FS0 abzuleiten; erstens hat das Vorhandensein von Antibackmittel keinen Einfluss auf die Taurate und zweitens steigt diese bei größerem Steinsalz mit der Zeit viel stärker an als bei feinem Siedesalz. Dabei ist bei den folgenden Abbildungen zu beachten, dass farblich ähnliche Säulen dieselbe Art des Tausalzes darstellen, jedoch die durchgehend eingefärbten Salze ohne Antibackmittel und die karierten jene mit Antibackmittel kategorisieren.

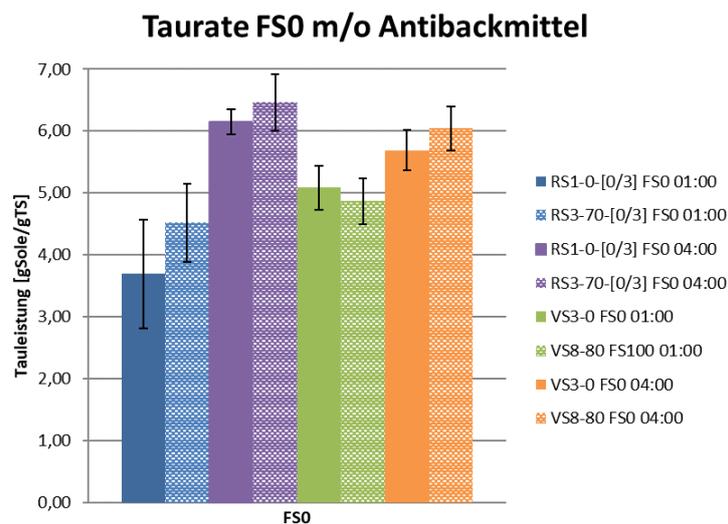


Abbildung 39: Taurate FS0 mit und ohne Antibackmittel für 60 und 240 Minuten

Abbildung 40 zeigt dasselbe Verhalten der Salze als 20%-NaCl-Sole (FS100) bezüglich des Antibackmittelgehalts. Unterschiedliches Verhalten lässt sich jedoch bei der Taurate hinsichtlich der Einwirkungszeit feststellen: In gelöster Form ist diese annähernd konstant innerhalb der Schwankungsbreite.

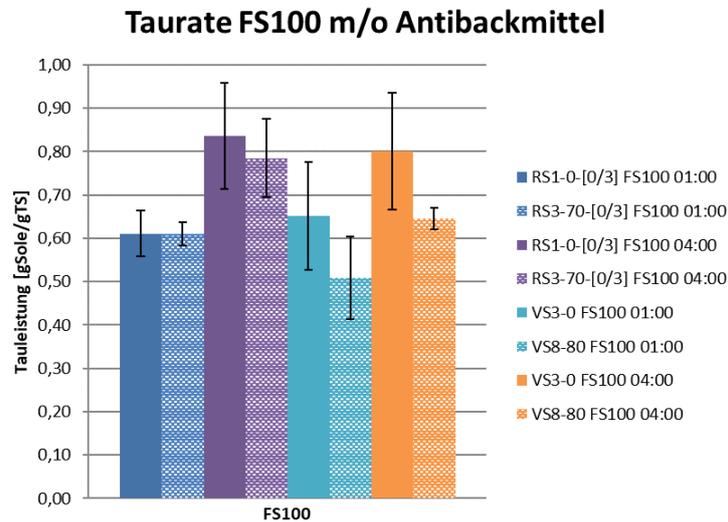


Abbildung 40: Taurate FS100 mit/ohne Antibackmittel für 60 und 240 Minuten

Rechnet man die Taurleistung der 20%-Sole (FS100) auf den tatsächlichen Salzgehalt rück, so lassen sich daraus zwei Erkenntnisse ableiten:

- Im Vergleich zum reinen Trockensalz ist die Taurleistung annähernd halbiert
- Stein- und Siedesalz verhalten sich in Lösung ungefähr gleich

Siehe dazu Abbildung 41 für Steinsalz und Abbildung 42 für Siedesalz.

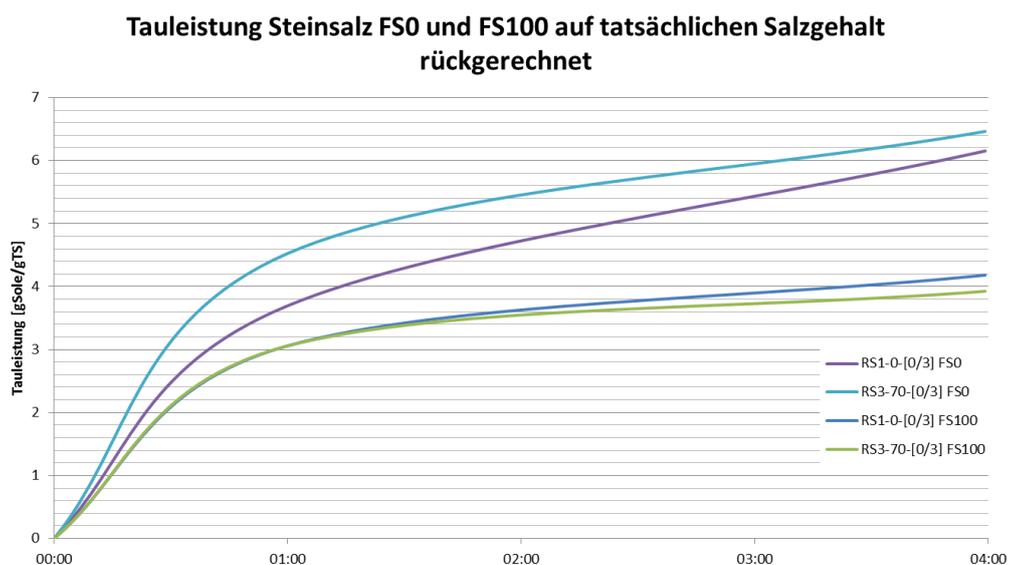


Abbildung 41: Taurleistung Steinsalz auf tatsächlichen Salzgehalt rückgerechnet

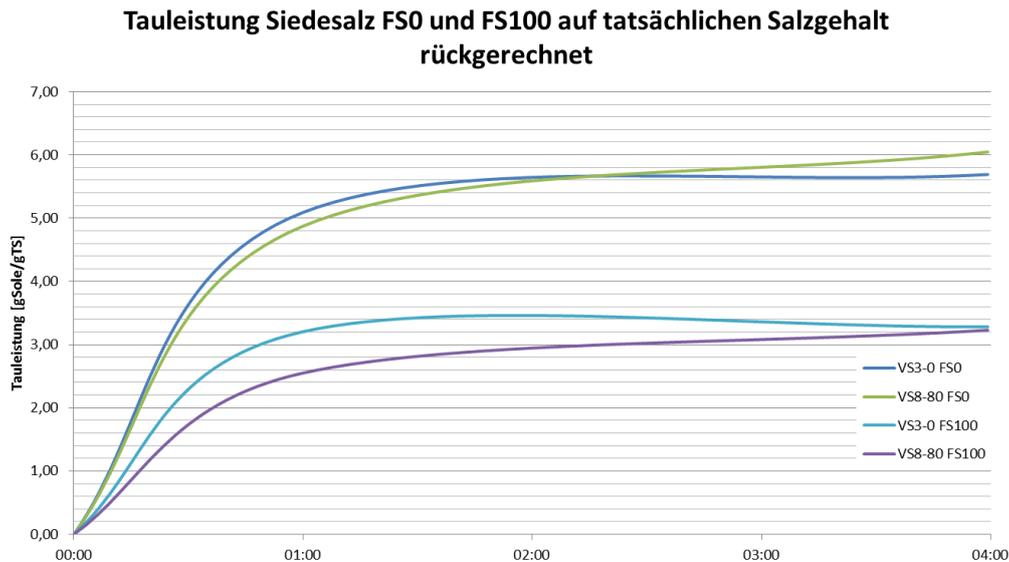


Abbildung 42: Tauleistung Siedesalz auf tatsächlichen Salzgehalt rückgerechnet

5.5 Zusammenfassung des Kapitels

Die Versuchsmethode mit der Auslaufbox nach Sonntag hat sich gut bewährt, die Prüfergebnisse, ausgedrückt durch die Auslaufrate und den inneren Reibungswinkel, zeigen deutlich Unterschiede bezüglich des Antibackmittel- und Feuchtigkeitsgehaltes. Dabei hat sich für eine ausreichende Rieselfähigkeit ein unterer Grenzwert von 20 mg Antibackmittel pro kg Siedesalz als geeignet erwiesen, wobei eine Erhöhung auf 80 mg/kg kaum eine Verbesserung bewirkt. Siedesalz mit der biologischen Alternative zu Natriumferrocyanid weist selbst bei geringen Feuchtigkeitsgehalten dieselben Ergebnisse wie Siedesalz ohne Antibackmittel auf und ist somit zur Verbesserung der Rieselfähigkeit ungeeignet. Für Steinsalz lag hingegen nur ein Antibackmittelgehalt zur Prüfung vor, daher kann ein Grenzwert zur Eignung der Rieselfähigkeit nur grob mit 130 mg/kg Steinsalz mit einer Korngröße von 0/3 mm bzw. mit 180 mg/kg Steinsalz mit einer Korngröße von 0/2 mm abgeschätzt werden. Bezüglich des Einflusses von Antibackmitteln auf die Tauleistung der Salze konnten weder für Trockensalz FS0 noch für reine Sole FS100 nachteilige Einwirkungen festgestellt werden.

6 Räumqualität

6.1 Inhalt und Methodik

Dieses Kapitel beinhaltet eine Umfrage zu österreichischen Pflugsystemen [13] sowie die Entwicklung und Erprobung eines Verfahrens zur Beurteilung der Räumqualität bzw. Restschneemenge und des Verschleißes von Räumleisten. Hierbei sollen unterschiedliche Schneepflugsysteme auf Fahrbahnoberflächen mit guter und schlechter Ebenheit (längs und quer bzw. mit und ohne Spurrinnen) bei unterschiedlichen Räumgeschwindigkeiten überprüft werden, um die verbleibende Restschneemenge zu erfassen. Weiters gilt es ein Verfahren zur Abnutzung der Räumleisten sowohl für einen Laborversuch als auch für einen Feldversuch auf Asphalt unter Schneebedingungen zu entwickeln.

6.2 Umfrage Schneepflüge und Räumleisten

Zur Erfassung der in Österreich am häufigsten eingesetzten Schneepflugsysteme und Räumleisten wurde eine Umfrage für alle Autobahn- und Straßenmeistereien konzipiert. Diese wurde als Onlineumfrage [13] gestaltet und im Zeitraum Juli 2017 bis Jänner 2018 durchgeführt. Im westlichen wurden dabei folgende Kennzahlen bzw. Parameter abgefragt:

- Meisterei (Bundesland, Postleitzahl, Ort, Adresse, Kontaktperson, Telefonnummer)
- Betreute Netzlänge [km]
- Betreute Fläche [m²]
- Anzahl Räumrouten [Stk.]
- Anzahl Räumfahrzeuge [Stk.]
- Pflughersteller
- Pflugtyp
- Pflugentlastung [ja/nein]
- Stützräder [ja/nein]
- Gleitkufen [ja/nein]
- Räumleistenhersteller
- Räumleistentyp
- Räumleistenmaterial
- Stärke Räumleiste [mm]
- Nachräumleiste [ja/nein]
- Pflugalter [Jahre]
- Schätzung Anzahl Räumleisten je Winter [Stk.]
- Schätzung Tauschintervall der Räumleiste [km]
- Elektronische Abfrage von Einsatzdaten (Einsatzzeit, Räumlänge) für diesen Pflug möglich [ja/nein]

6.2.1 Teilnehmer

Insgesamt haben 132 Meistereien an der Umfrage teilgenommen, davon 94 der Bundesländer und 38 der ASFINAG. Dabei standen die Daten von 1.748 Pflügen zur Verfügung, welche hauptsächlich aus Niederösterreich, Wien, Oberösterreich und der Steiermark stammen. In nachstehender Abbildung 43 ist die Anzahl der teilnehmenden Straßen- und Autobahnmeistereien sowie die Anzahl der Pflüge je Bundesland dargestellt.

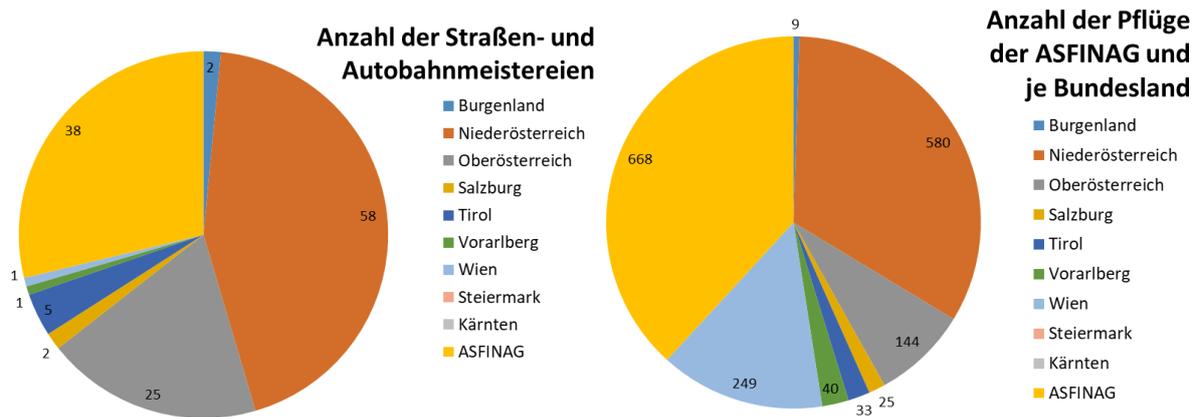


Abbildung 43: Meistereien und Pflüge je Bundesland

6.2.2 Pflug- und Räumleistenhersteller

Wie in Abbildung 44 ersichtlich, stammen die häufigsten Pflüge in Österreich von den Herstellern Kahlbacher, Springer, Hydrac und Flötzingler, die meisten Räumleisten werden von den Herstellern Küper, Voest, Größbauer und Mutter bezogen.

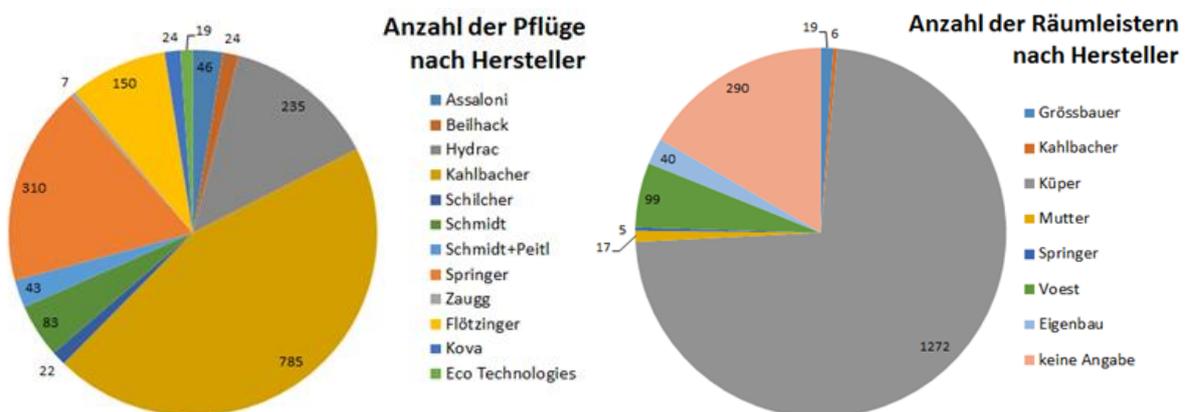


Abbildung 44: Pflug- und Räumleistenhersteller

Dabei setzt sich der Anteil der am weitesten verbreiteten Pflugerhersteller je Bundesland bzw. der ASFINAG wie in folgender Abbildung 45 zusammen.

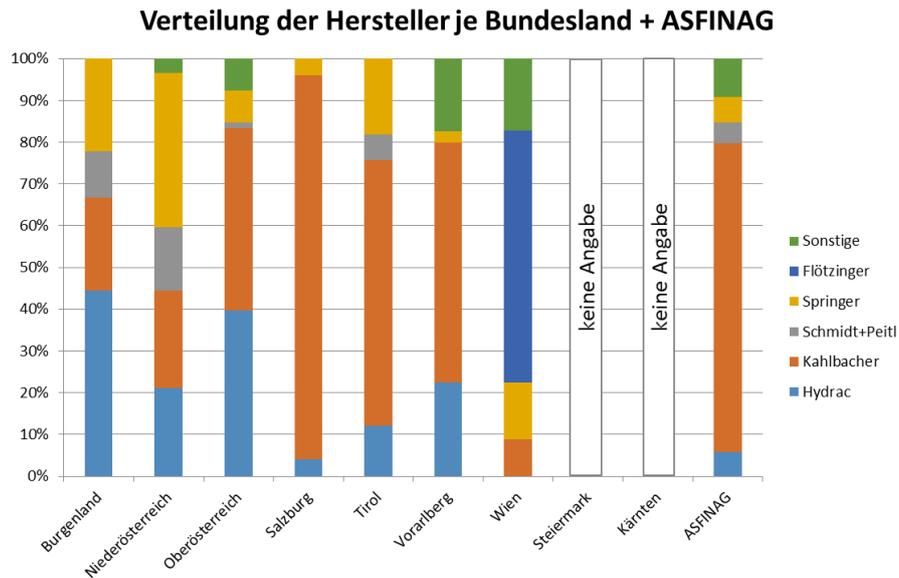


Abbildung 45: prozentuelle Aufteilung der Pflughersteller je Bundesland

6.2.3 Sonstige Erkenntnisse

Ergänzend wurden die Zusatzausrüstungen der jeweiligen Pflüge abgefragt, wobei Stützräder, Nachräumeisten, Pflugentlastung und Gleitkufen am häufigsten angegeben wurden. Wie beispielsweise im ersten Balken der Abbildung 46 ersichtlich, gaben die Befragten an, dass annähernd 10 % der Pflüge mit einer Pflugentlastung ausgestattet sind. 6 % haben diese Vorrichtung nicht und 84 % konnten zu dem Zeitpunkt keine Auskunft geben.

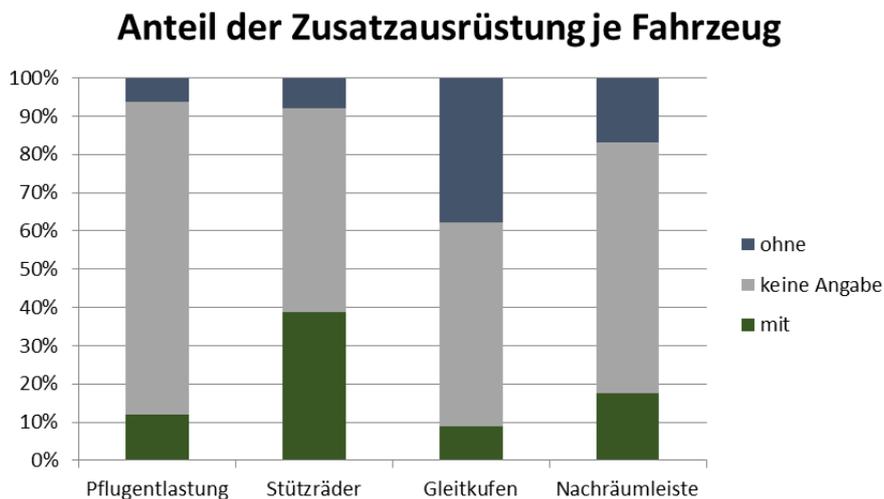


Abbildung 46: prozentueller Anteil an bestimmter Zusatzausrüstung

Aus der in Abbildung 47 ersichtlichen Altersverteilung der Pflüge lässt sich ableiten, dass der Medianwert des Pflugalters bei neun Jahren liegt und insgesamt 92 % der Pflüge nicht älter als 20 Jahre sind.

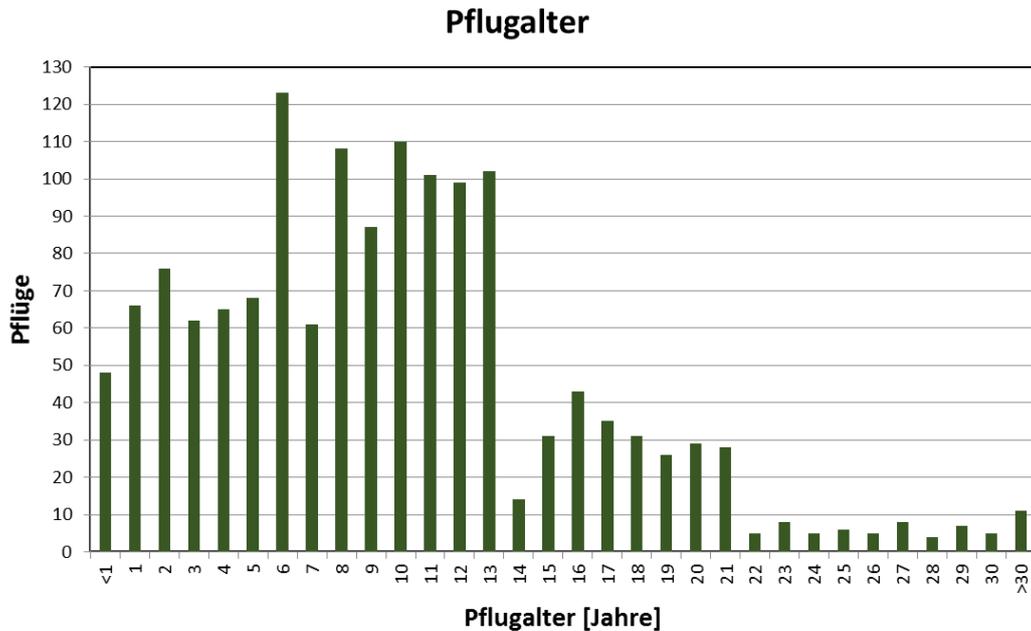


Abbildung 47: Aufteilung des Pflugalters

Sowohl die Anzahl der Räumleisten pro Saison als auch deren Tauschintervall ausgedrückt in Kilometern werden von den Straßenmeistereien nicht erfasst und wurden daher von den Befragten nur geschätzt, wodurch eine ziemlich breite Streuung der Werte resultiert. Zumal die Abnutzung der Räumleisten von sehr vielen Faktoren wie etwa Straßenzustand, Witterung, Geschwindigkeit, Anpressdruck usw. abhängig ist, kann ein direkter Vergleich der Kilometerleistung von Räumleisten untereinander nicht zielführend sein. In nachstehender Abbildung 48 ist dieser Umstand besonders bei der Darstellung des Tauschintervalls ersichtlich. Die Anzahl der Räumleisten pro Saison liegt bei ein bis drei Räumleisten(-sätze), wobei ein Räumleistersatz aus zwei bis fünf Segmenten, je nach Anzahl der Scharen des Pfluges, besteht.

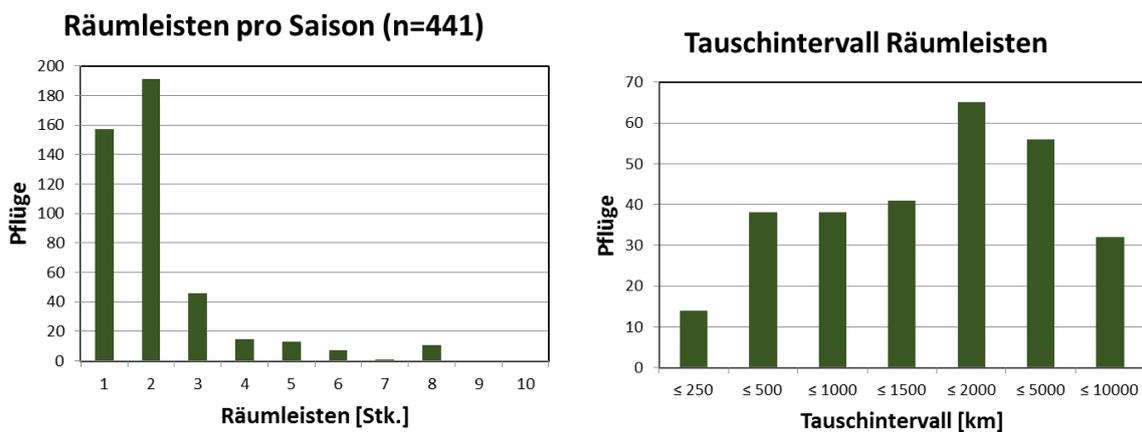


Abbildung 48: Räumleistenverbrauch und. Tauschintervall

6.2.4 Auswahl Pflug- und Räumleisten für Feldversuche

Auf Basis der Online-Umfrage wurden die häufigsten Pflüge und Räumleisten ausgewählt und die Ergebnisse anschließend in Tabelle 9 und Tabelle 10 aufgelistet, davon sind einzelne Modelle bzw. Zusatzausrüstungen auf Abbildung 49 und Abbildung 50 ersichtlich.

Tabelle 9: Auswahl Pflüge für Feldversuche [technische Details lt. Herstellerdatenblätter]

Hersteller	Typ	Räumbreite [mm]	Anmerkungen	Bereitstellung
Kahlbacher	STS 340	3150-3380	mit /ohne Pflügentlastung	ASFINAG: Alland, Pressbaum, Schwechat, St.Pölten
Kahlbacher	STS 300	2750-2945	mit/ohne Nachräumleiste	Straßenmeisterei Wolkersdorf
Springer	SHE 3404	3000-3450	Stützräder, mit/ohne Nachräumleiste	Straßenmeisterei: Wolkersdorf, Gloggnitz
Hydrac	SL-IV-360	3060-3600	Stützräder	Straßenmeisterei: Wolkersdorf, Gloggnitz
Flötzing	DKV-A	1600-2700	Großstadtmodell	MA 48 Wien
Springer	SHL 3204-2	2770-3200	Nachräumklavier	Straßenmeisterei Gloggnitz, MA 48 Wien



Abbildung 49: v.l.n.r. Flötzing DKV-A und Springer SHL 3204 mit Nachräumklavier

Tabelle 10: Auswahl Räumleisten für Feldversuche

Hersteller	Typ/Bezeichnung	Stärke [mm]	Länge [m]	Bereitstellung
Küper	Kombi S50 Wave	50	ca. 2x1	NÖ, ASFINAG
Küper	Kombi S36 Wave	36	ca. 2x1	NÖ
Voest	Durostat 400	8	ca. 2x1	NÖ
Grössbauer	Hardox 400	20	ca. 2x1	Tirol, Sbg
Mutter	MS Stahl Schürfleiste 200	20	ca. 2x1	Sbg
Eigenbau	Federstahl	20	ca. 2x1	Vbg
Flötzing	Schneepflugmesser 530 2/3loch	20	2x0,53	Wien
Kahlbacher	Kombi-Räumleiste K36	36	ca. 2x1	Fa. Kahlbacher
Kahlbacher	Kombi-Räumleiste K50	50	ca. 2x1	Fa. Kahlbacher
Kahlbacher	PE-Kombi-Räumleiste 36	36	ca. 2x1	Fa. Kahlbacher
Kahlbacher	PE-Kombi-Räumleiste 50	50	ca. 2x1	Fa. Kahlbacher

Bei den Räumleisten unterscheidet man hauptsächlich zwischen Stahlleisten und Kombinationsleisten. Letztere bestehen meist aus einer Kombination von Stahl, Gummi und besonders harten Materialien wie beispielsweise Korund. Im Hinblick auf die Auswahl verschiedener Arten und Typen von Räumleisten spielen selbstverständlich auch wirtschaftliche Aspekte eine wesentliche Rolle, somit kann es mitunter möglich sein, dass eine reine Stahlleiste aufgrund geringerer Härte zwar schneller abgenutzt wird, jedoch der Anschaffungspreis geringer ist. Kombinationsleisten versprechen dagegen eine längere Lebensdauer, weniger Lärm und Schonung der Straßenoberfläche. Weiters ist der Zeitaufwand zum Wechseln der Räumleisten und der damit verbundenen Personalkosten zu bedenken.



Abbildung 50: Küper Kombi S50 Wave Räumleiste und Nachräumleiste

6.3 Prüfprogramm Restschneemenge

In dieser Arbeit soll ein Verfahren und Prüfprogramm entwickelt werden, das die Ermittlung und den Vergleich des auf der Fahrbahn verbleibenden Restmaterials auf zwei verschiedenen Testflächen (mit und ohne Spurrinnen) beinhaltet. Dazu wurden im vorigen Kapitel bereits die in Österreich häufig im Einsatz befindlichen Pflugsysteme identifiziert, um in weiterer Folge die nach einer Räumfahrt tatsächliche zurückbleibende Restschneemenge zu erfassen.

6.3.1 Beschreibung Haupt- und Vorversuch

Zur Dokumentation der Restschneemenge soll eine für den Verkehr abgesperrte Fläche vorgehalten werden um risikolos einen Straßenzustand entstehen zu lassen, der für eine Schneeräumung geeignet ist. Dazu stehen ein Parkplatz an der A10 bei Kuchl, der bereits für vorherige Winterdienstforschungsprojekte [1] genutzt wurde, und eine große Lagerfläche der MA 48 am Mistplatz Wien-Auhof als Versuchsort zur Verfügung.

Auf der mit Schnee bedeckten Versuchsfläche werden sechs bis zwölf Teilbereiche mit je 3,5 x 10 m definiert und gekennzeichnet, welche von den ausgewählten Pflugsystemen bei Überfahrt mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h und gleicher Schildstellung geräumt werden sollen (siehe Abbildung 51). Der erste Durchlauf wird ohne Einsatz, der zweite mit Einsatz von Zusatzausrüstung wie Stützräder, Pflugentlastung, Nachräumleiste etc. durchgeführt.

Um zumindest eine grobe Aussage über die Räumqualität tätigen zu können, wird sowohl vor als auch nach der Schneeräumung der Oberflächenzustand der definierten Versuchsfläche fotodokumentiert. Für eine genauere Beurteilung wird der eventuell nach der Räumung im Testfeld verbleibende Restschnee eingekehrt bzw. falls notwendig geschmolzen und mittels Nasssauger aufgenommen und gewogen. So sollte ein Vergleich der Effizienz der Pflugsysteme und ihrer Zusatzausrüstung möglich sein.

Da in der Winterperiode die Verfügbarkeit von Schneepflügen und Winterdienstmitarbeitern stark eingeschränkt ist, werden zusätzliche Vorversuche vor der Räumsaison mit Schneersatzmaterial empfohlen. Dabei sollte mit derselben Vorgehensweise verfahren werden, jedoch die Räumqualität der Pflüge anstatt mit Schnee beispielsweise mit Sand beurteilt werden. Dadurch könnten auch etwaige Probleme bei der Versuchsdurchführung identifiziert und der Hauptversuch effizienter und weniger zeitintensiv gestaltet werden, mit dem Zweck in der Wintersaison sowohl Fahrzeuge als auch Mannschaft so wenig wie möglich zeitlich zu beanspruchen. Fraglich hingegen ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Hinblick auf die Eignung des Schneersatzmaterials. Auch der Arbeits- und Materialaufwand für diese Vorversuche sind nicht zu unterschätzen. Geht man von einer Fläche von 3,5 x 10 m aus und schüttet Sand der Korngruppe 0/1 (Dichte ca. 1400 kg/m³) auf eine Höhe von ungefähr 1 cm, so benötigt man für einen einzelnen Versuch knapp 500 kg Material.

Aus diesen Gründen wird ein reduziertes Programm für den Vorversuch mit Ersatzmaterial, bei dem nur die Räumqualität zweier Pflüge untersucht wird, empfohlen. Grundsätzlich würden sich der Mistplatz Auhof und Räumfahrzeuge der MA48 aufgrund der einfachen Erreichbarkeit anbieten, das genaue Programm sollte jedoch vorher noch mit dem zuständigen Winterdienstleiter abgeklärt werden.

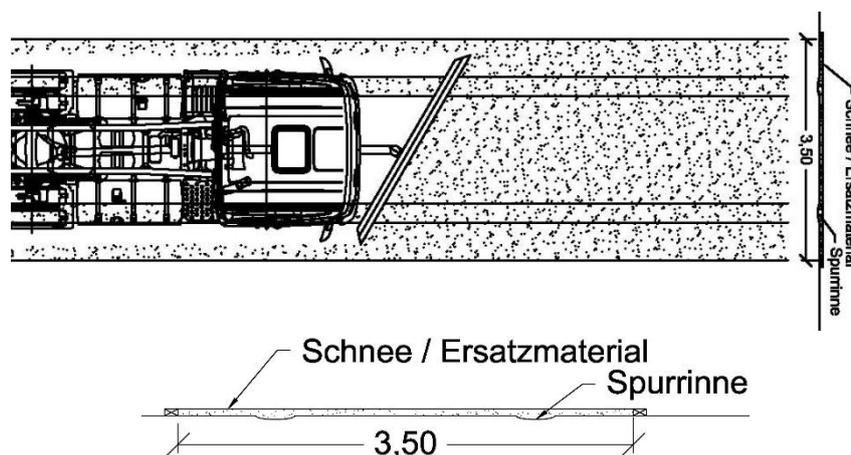


Abbildung 51: Methodik zur Beurteilung der Räumqualität

6.3.2 Erprobung der Methodik für den Hauptversuch

Um die Eignung verschiedener Ansätze zur Restschneeaufnahme zu prüfen, wurden im Winter 2017/18 bereits einige Vorversuche durchgeführt. Um die Versuchsdurchführung möglichst

einfach und rasch abwickelbar zu halten, wurden zwei Verfahren zur Schneeaufnahme, die diese Aufgabe theoretisch bewältigen könnten, getestet.

Methode 1

Für die Erprobung der ersten Methode wurde eine abgesperrte Teilfläche eines Parkplatzes mit Asphaltoberfläche vorgehalten und bei Schneefall sowie nach ausreichender Schneebedeckung mittels Schneeschaufel händisch geräumt, um eine Räumung durch einen Schneepflug zu simulieren (Abbildung 52a und b). Angedacht war, dass der in der Textur der Asphaltoberfläche verbliebene Restschnee mit einem Nassstaubsauger aufgesaugt und abgewogen werden sollte. Bei Versuchsdurchführung konnte der Nasssauger den Schnee anfänglich gut aufnehmen, jedoch setzte sich das Saugrohr zunehmend mit Schneematsch zu und die Aufnahmeleistung sank stark ab (Abbildung 52c und d). Daher wird ein weiterer Vorversuch vorgeschlagen, bei dem zuvor die Restschneemasse mittels Gasbrenngerät oder ähnlicher Hitzequelle getaut und anschließend mit dem Nasssauger aufgenommen wird.

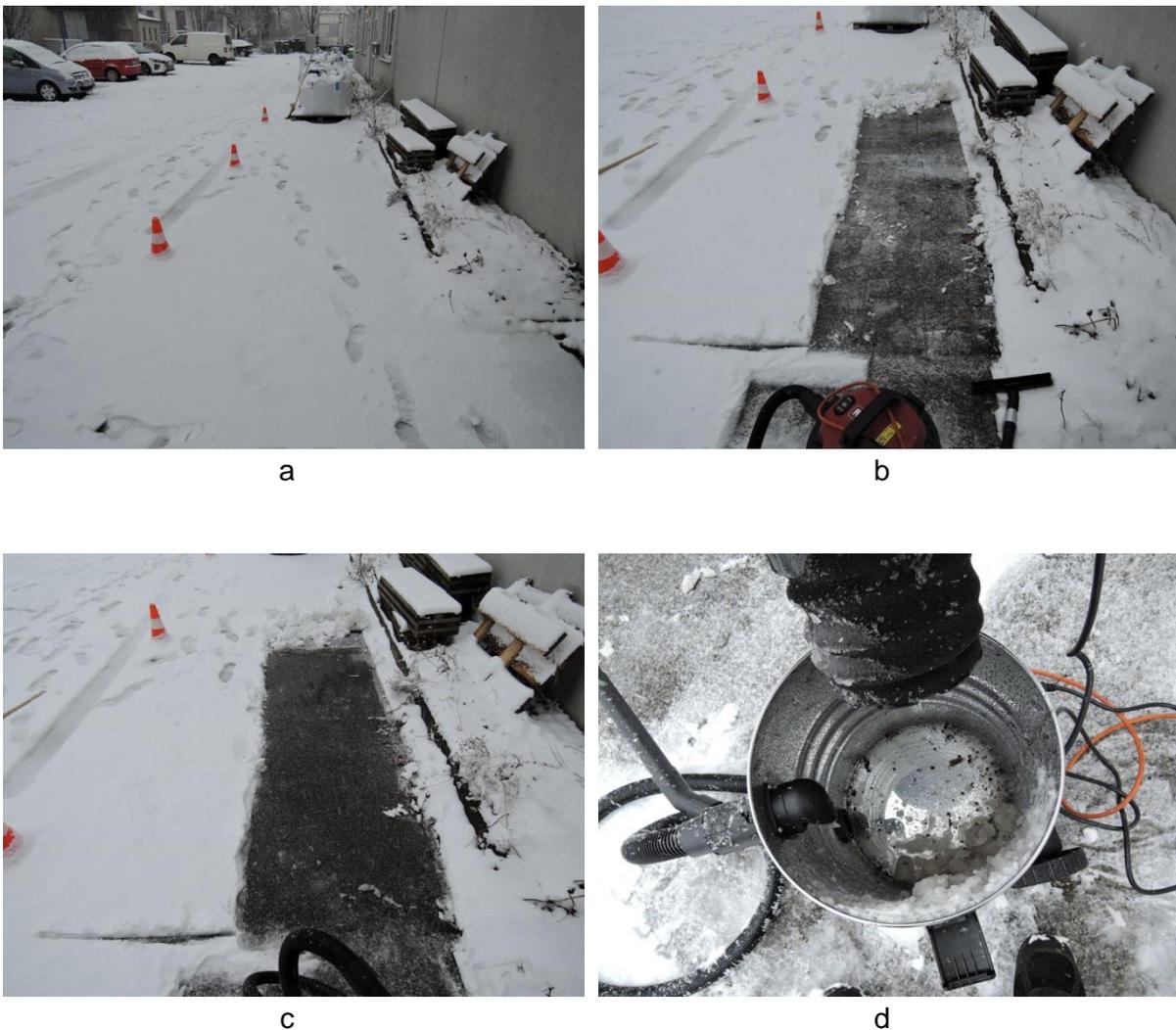


Abbildung 52: Vorversuch Schneeaufnahme: a) unberührt; b) geräumt; c) gesaugt; d) verstopft

Zusätzlich wurde die rein manuelle Aufnahme der Restschneemasse mittels Schaufel, Besen und Eiskratzer getestet. Wie in Abbildung 53c erkennbar, ist das Ergebnis deutlich besser als nur mittels Aufnahme durch den Nasssauger, jedoch ist der Zeitaufwand für diese Vorgehensweise bereits für kleine Flächen äußerst hoch.

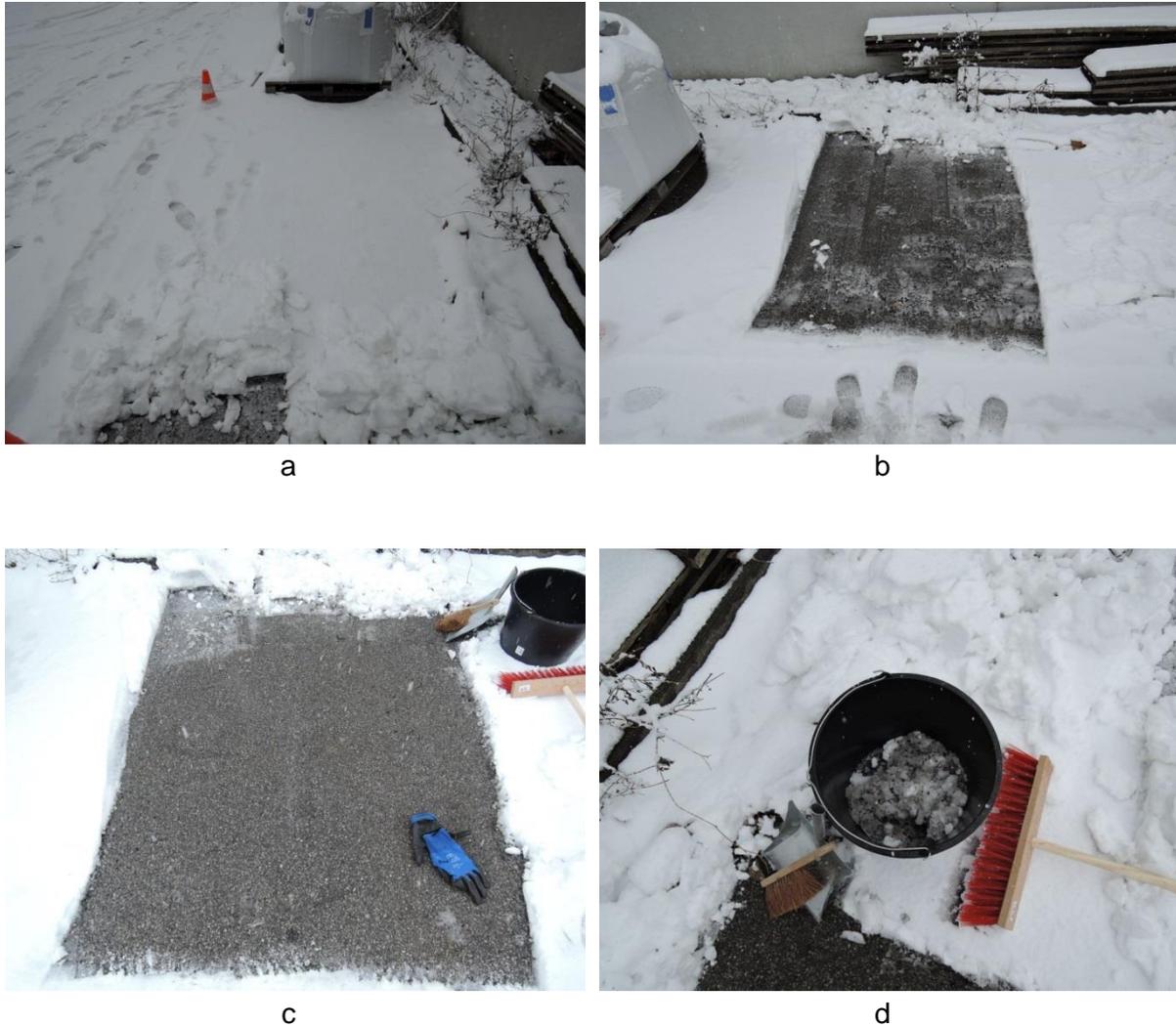


Abbildung 53: Vorversuch Schneeaufnahme: a) unberührt; b) geräumt; c) manuell gekehrt; d) Restschnee

Aufgrund der im Winter 2017/18 in Ostösterreich vorherrschenden milden Temperaturen und wenigen Schneefalltagen war ein weiterer Vorversuch nur unter mäßig geeigneten Bedingungen am Mistplatz Wien-Auhof der MA48 möglich. Der erste Räumversuch bei 1 °C Boden- und Lufttemperatur erfolgte mit dem Schneepflug Flötzingler DK-V mit Stahlräumleiste (siehe Abbildung 54). Nach der Räumfahrt blieb deutlich sichtbarer Schneematsch zurück, das Einkehren war größtenteils möglich, es verblieb lediglich Wasser bzw. geschmolzener Schnee auf der Fahrbahn. Bei festgefahrenem und in die Textur der Oberfläche gedrücktem Schnee ist vorheriges Schmelzen vermutlich zur Aufnahme mittels Nasssauger notwendig.



Abbildung 54: Vorversuch Schneeaufnahme am Mistplatz Wien-Auhof - Flötzinger DK-V

Der zweite Räumversuch wurde mit einem Springer SHL 3204 mit Kombileiste und Nachräumklavier durchgeführt (Abbildung 55). Nach der Räumfahrt war nur Wasser in der Oberflächenstruktur, jedoch kein Schneematsch festzustellen. Somit scheint in diesem Fall reines Einsaugen ohne vorheriges Erhitzen möglich. Des Weiteren konnte beobachtet werden, wie der vom Räumschild nicht abtransportierte Schnee vom Nachräumklavier beseitigt wurde.



Abbildung 55: Vorversuch Schneeaufnahme am Mistplatz Wien-Auhof – Springer SHL 3204

Methode 2

Des Weiteren wurde die Eignung zur Restschneeaufnahme durch ein Pflastermörtelreinigungsggerät, dem sogenannten Schwammfix der Firma Pergo-Tools, geprüft. Dieses Gerät wurde ursprünglich zur schonenden Reinigung von Pflasteroberflächen nach dem erstmaligen Verfugen entwickelt, wobei ein durchgehender Schwamm über die Oberfläche geschoben, der überflüssige Fugenmörtel aufgesaugt und anschließend automatisch in einen Auffangbehälter ausgepresst wird. Diese Systematik wurde zur Restschneeaufnahme adaptiert und im Winter 2017/18 erstmals getestet. Das Gerät war wider Erwartungen nicht in der Lage den Schnee

aufzunehmen, es drückte diesen weiter in die Textur der Oberfläche und nahm somit kaum Schnee auf (siehe Abbildung 56). Daher wurde diese Methodik wieder verworfen.



Abbildung 56: Vorversuch Schneeaufnahme mit Schwammfix von Pergo Tools

6.4 Prüfprogramm Räumleistenverschleiß

Zur Beurteilung der Abnutzung von Räumleisten werden die am häufigsten eingesetzten Räumleisten (basierend auf der Umfrage) durch einen für diesen Zweck entwickelten Prototyp der oberösterreichischen Firma Hydrac einer Verschleißsimulation unterzogen. Dadurch wird die Ermittlung der Abnutzung in mm von typischen Räumleisten in Abhängigkeit der gefahrenen Kilometer einerseits und ein Kostenvergleich in mm/€ andererseits angestrebt.

6.4.1 Beschreibung Hauptversuch

Beim Verschleißversuch sind bis zu 14 Räumleistensegmente parallel in einen Träger eingespannt und werden individuell belastet um ihre Flächenpressung gleich zu halten. Zur Simulation einer Räumfahrt wird der Träger anschließend auf ein Fahrzeug montiert, bei winterlichen Bedingungen einige Kilometer über Asphalt gezogen und anschließend der Abrieb der einzelnen Leisten gemessen (siehe Abbildung 57). Der Einfluss auf den Abrieb durch Spurrinnen und Unebenheiten in der Teststrecke soll durch Wechsel der Räumleistensegmente untereinander verringert werden.



Abbildung 57: Feldversuch Verschleiß der Räumleisten

6.4.2 Beschreibung Zusatzversuch

Um die Versuchsergebnisse der Firma Hydrac validieren zu können, wurde in dieser Arbeit ein zusätzlicher Laborversuch zur Feststellung des Abriebs von Schürfleisten entwickelt. Dazu sollen die Schürfleisten unter Laborbedingungen mit einer definierten Reibungsarbeit beansprucht und anschließend ihr Verschleiß in mm gemessen werden. Ein erster Prototyp wurde bereits entwickelt, konnte jedoch aufgrund von Verzögerungen bei der Herstellung nicht mehr rechtzeitig fertiggestellt werden um erste Versuche damit durchzuführen und seine Eignung zu bestätigen. Eine Skizze vom Prototyp ist in Abbildung 58 zu sehen.

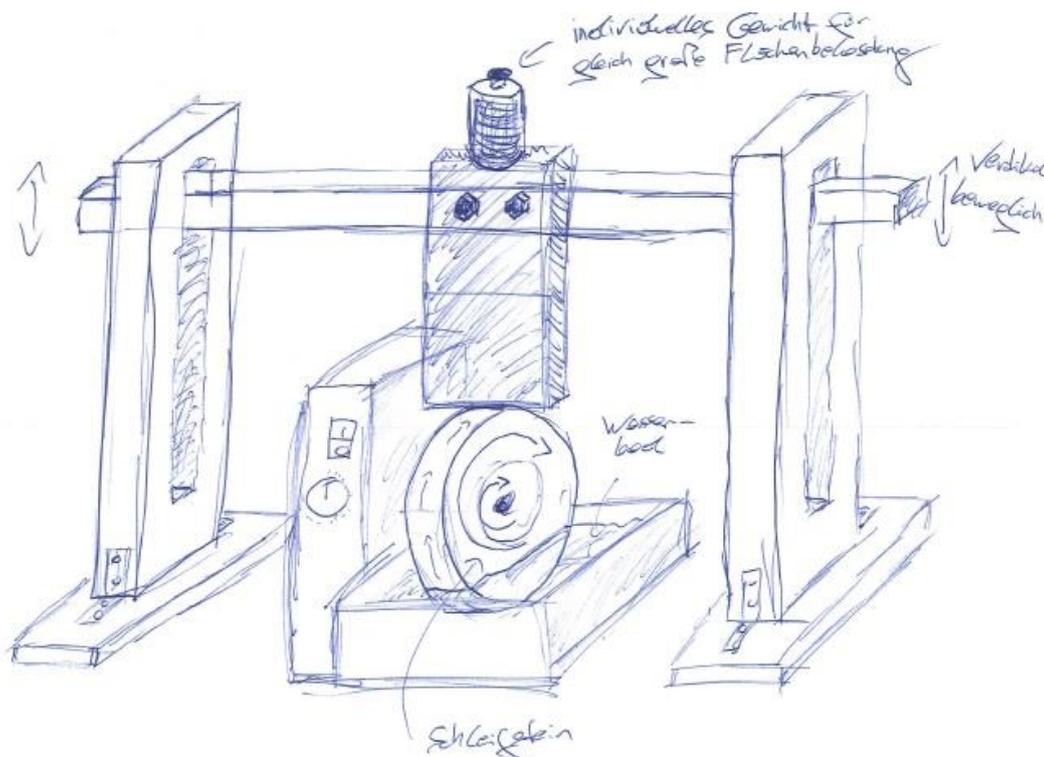


Abbildung 58: Prototyp zur Beurteilung des Räumleistenverschleißes

Das genaue Konzept des Prototyps wird im Folgenden erklärt:

Eine wie für die Feldversuche zugeschnittene und vorgebohrte Schürfleiste wird dabei auf eine Vorrichtung geschraubt, die nur vertikal beweglich ist und zusätzlich variabel belastet werden kann. Dies dient dem Zweck der Erzeugung einer realitätsnahen Pressung auf den darunterliegenden Schleifstein sowie einer gleichmäßigen Beanspruchung der unterschiedlich dicken Räumleisten. Die winterlichen Bedingungen sollen beim Schleifvorgang selbst durch Bewässerung und der damit verbundenen Kühlung des Schleifsteins simuliert werden. Nach einer noch zu definierenden Schleifzeit soll das Schürfleistensegment vermessen werden und so ein Vergleich der unterschiedlichen Typen untereinander und ein Vergleich mit den Feldprüfungen angestellt werden können.

6.5 Zusammenfassung des Kapitels und Ausblick

In einem ersten Schritt konnten die in Österreich am häufigsten verwendeten Pflüge und Schürfleisten mit Hilfe einer Umfrage bei den Straßen- und Autobahnmeistereien identifiziert werden. Ziel wäre es, die unterschiedlichen Systeme untereinander zu vergleichen und so deren Effizienz bezüglich Schneeräumung und Abnutzung der Räumleisten zu beurteilen. In dieser Arbeit wurden Vorversuche zur Entwicklung und Erprobung eines geeigneten Verfahrens dazu durchgeführt und zusätzlich, um eine qualifizierte Aussage zur Feststellung des Abriebs der Schürfleisten und eine Korrelation zwischen Labor- und Feldversuchen herstellen zu können, ein Prototyp für Abnutzungsversuche im Labor entwickelt. Mit diesen Erkenntnissen können nun im Rahmen eines weiterführenden Forschungsprojektes die nachstehenden Fragestellungen bezüglich des Vergleichs der Räumqualität und der Räumleistenabnutzung im Winter 2018/19 bearbeitet werden:

- Welche Pflugsysteme bieten ein gutes Räumbild?
- Wie wirkt sich Zusatzausrüstung (z.B.: Pflugentlastung) auf die Räumqualität aus?
- Welche Räumleisten haben den geringsten Abrieb?
- Welche Räumleisten bieten das beste Verhältnis zwischen Laufleistung und Kosten?

7 Restsalz

7.1 Inhalt und Methodik

Für diese Aufgabenstellung wurden die Restsalzmengen von festen (FS0) und flüssigen Tausalzen (FS100) mit definierten Salzgehalten (10, 20, 30, 40 g/m²) unter Laborbedingungen auf verschiedenen Oberflächen (glatt, rau) mit dem Restsalzmessgerät SOBO 20 ermittelt. Diese Restsalzmengen wurden verglichen und die Differenzen zu den theoretischen Sollsalzmengen bestimmt. Ergänzend wurde dabei auch der Einfluss von trockenen und befeuchteten Oberflächen sowie aufgetrocknetem Tausalz untersucht.

Weiters wurden Feldmessungen an Tagen mit winterlichen Bedingungen in der Nähe von Glättemeldeanlagen (kurz: GMA) durchgeführt, um die aufgenommenen Werte (Salzgehalt, Glättegefahr, Fahrbahn- und Lufttemperatur etc.) mit den Anzeigen der GMA zu vergleichen.

Außerdem wurden verschiedene Streuszenarien (FS30, FS50, FS70 und FS100) im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf ihres Restsalzgehaltes untersucht. Zum Schluss des Kapitels wurde noch ein kurzer Vergleich zwischen den beiden Restsalzmessgeräten SOBO 20 und dem Spül-Saug-Gerät der deutschen Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) angestellt.

7.2 Überprüfung der Eignung des SOBO 20 Restsalzmessgerätes im Labor

7.2.1 Restsalzmessgerät SOBO 20

Die Funktionsweise des in Abbildung 59 zu sehenden mobilen Restsalzmessgerätes SOBO 20 der Firma Boschung wird im Folgenden beschrieben.

Das Messprinzip des SOBO 20 basiert auf der unterschiedlichen Leitfähigkeit einer Messflüssigkeit in Abhängigkeit ihres Salzgehaltes. Dabei wird eine Gleichspannung zwischen zwei Elektroden angelegt und mittels der elektrischen Leitfähigkeit eines bestimmten Volumens der Messflüssigkeit und des auf einer definierten Fläche des am Boden befindlichen Salzes der Salzgehalt auf g/m² umgerechnet und angezeigt. Die Messflüssigkeit besteht dabei aus 85 % destilliertem bzw. entmineralisiertem Wasser und 15 % Aceton, letzteres um ein Gefrieren zu verhindern.



Abbildung 59: SOBO20 Restsalzmessgerät

Vor jeder Messreihe ist die Funktionsfähigkeit zu überprüfen. Laut Hersteller gibt es dazu zwei Verfahren:

- Prüfung der Menge der Messflüssigkeit
- Prüfung der Elektronikeinheit durch Messen einer definierten Salzlösung

Die Kontrolle der Messflüssigkeitsmenge erfolgt durch fünfmaliges Betätigen des SOBO 20, wobei die abgegebene Flüssigkeit in einem Behälter o.ä. gesammelt und abgewogen wird. Das Resultat sollte zwischen 190 und 220 g liegen, ansonsten sind Ventile und Dichtungen zu prüfen.

Bei der Prüfung der Elektronikeinheit wird eine Einwegspritze mit 23%-NaCl-Lösung befüllt, anschließend ein bestimmtes Volumen auf eine ebene Oberfläche gespritzt und mittels SOBO 20 gemessen. Dieser Vorgang wird dreimal wiederholt, dabei sollte das Messergebnis die in nachstehender Tabelle 11 aufgelisteten Werte einhalten, ansonsten sind Ventile und Dichtungen zu überprüfen bzw. das Gerät zur Kalibrierung an den Hersteller zu schicken.

Tabelle 11: Einzuhaltende Werte der Überprüfung der SOBO 20 Elektronikeinheit

23% NaCl-Lösung	SOBO 20 Messung	Mess-toleranz
0,5 ml	5 g/m ²	±1 g/m ²
1,0 ml	10 g/m ²	±2 g/m ²
1,5 ml	15 g/m ²	±3 g/m ²

7.2.2 Laborprüfung

Um die Messgenauigkeit des mobilen Restsalzmessgerätes SOBO 20 unter Laborbedingungen zu überprüfen, wurde folgende Prüfmethode entwickelt: Es wurde eine bestimmte Salz- bzw. Solemenge vorbereitet und in definierten Mengen auf eine Petrischale bzw. einen Bohrkern aufgebracht, danach wurde die Salzmenge mit dem SOBO 20 gemessen. Dieser Vorgang

ist für reine Sole FS100 exemplarisch in Abbildung 60 ersichtlich, wurde dreimal wiederholt und aus den Messwerten der Mittelwert gebildet.

In nachstehender Tabelle 12 sind die Salz- und Solemengen in mg angegeben, die auf die Petrischale bzw. auf den Bohrkern aufgebracht wurden. Die geringen Mengen resultieren aus dem Umstand, dass beispielsweise bei einer Trockenstreuung FS0 mit 40 g/m^2 tatsächlich 40.000 mg Salz auf einem Quadratmeter Oberfläche liegen und das SOBO 20 auf seiner Messfläche (ca. $24,63 \text{ cm}^2$) im Idealfall $98,5 \text{ mg}$ Salz detektieren würde. Analoges gilt für reine Solestreuung FS100, denn dort beträgt für eine Messung von 40 g/m^2 der Salzgehalt auf der Messfläche des SOBO 20 ebenfalls $98,5 \text{ mg}$. Die aufgebrachte Solemenge ist jedoch wesentlich größer, da bei einer 20%-Lösung diese Menge nur 20 M-% Salz und die restlichen 80 M-% (hier $394,1 \text{ mg}$) Wasser darstellt. Somit liegt bei beiden Streuarten derselbe absolute Salzgehalt vor und soll zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Trockenstreuung FS0 und der reinen Solestreuung FS100 dienen.

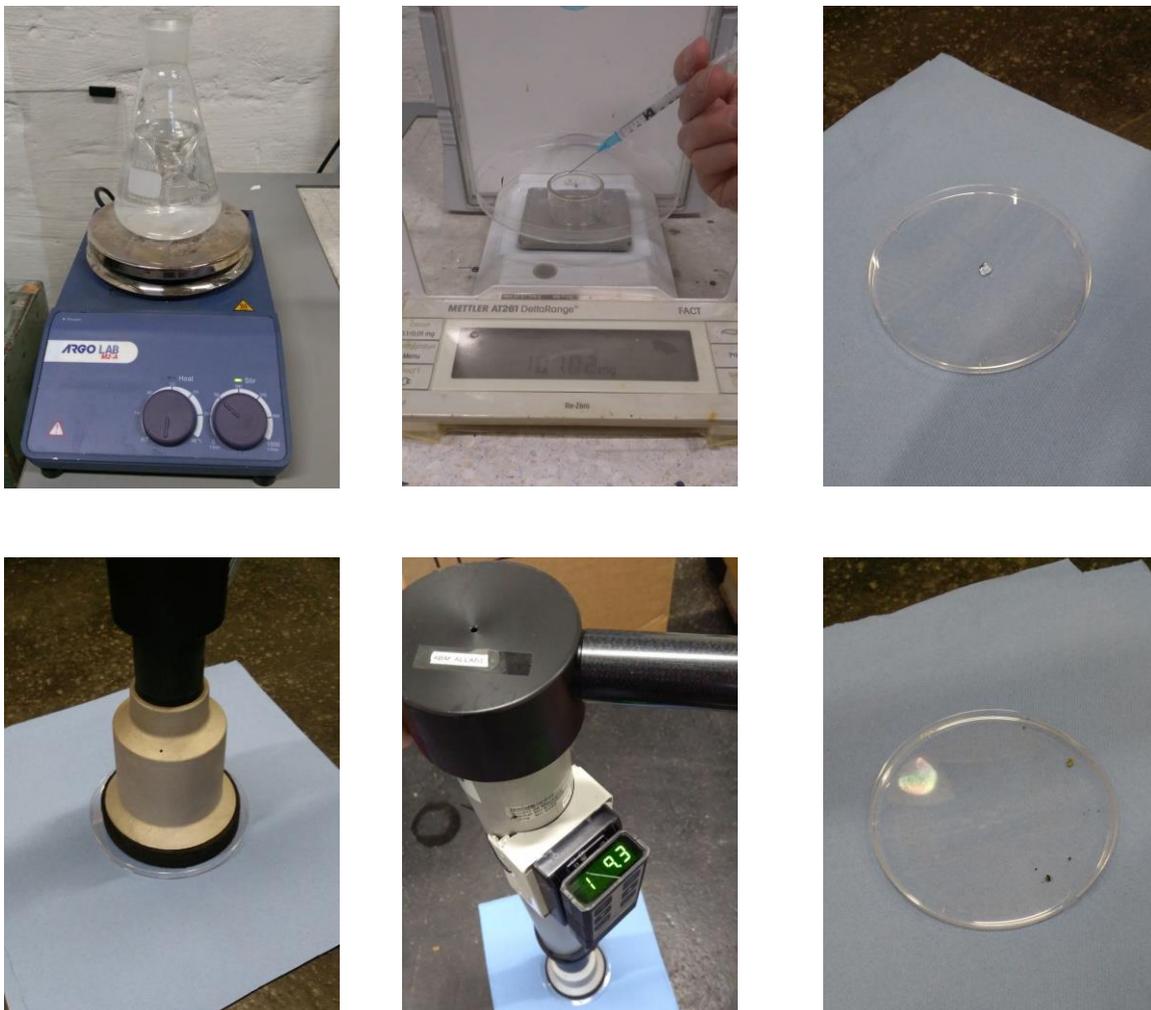


Abbildung 60: Restsalzmessungen im Labor (FS100)

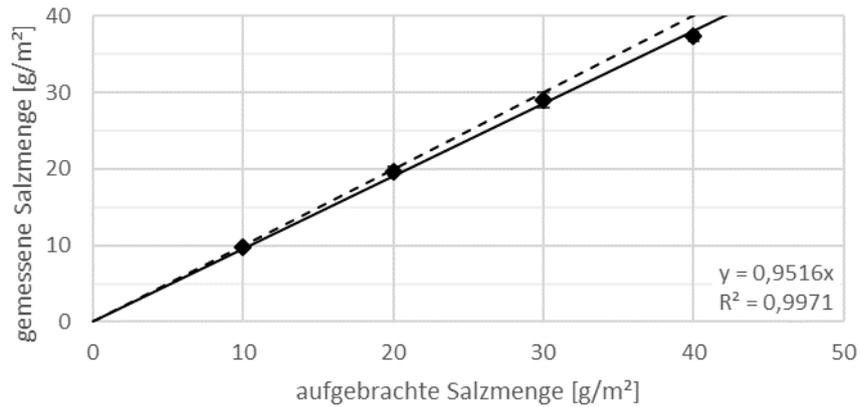
Tabelle 12: Für SOBO 20 aufgebrauchte Salz- bzw. Solemenge in mg

Trockensalz FS0			Salzstreu- menge	Sole FS100		
Salzanteil 100%	Wasser 0%	[mg] Summe		Salzanteil 20%	Wasser 80%	[mg] Summe
24,6	0	24,6	10 g/m ²	24,6	98,6	123,2
49,3	0	49,3	20 g/m ²	49,3	197	246,3
73,9	0	73,9	30 g/m ²	73,9	295,6	369,5
98,5	0	98,5	40 g/m ²	98,5	394,1	492,6

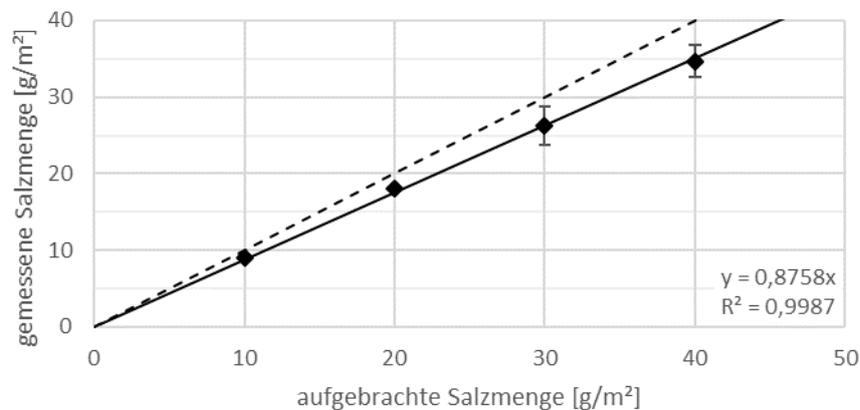
7.2.3 Vergleichsmessung reine Sole (FS100)

Die in Abbildung 61 ersichtlichen Ergebnisse zeigen, dass das Restsalzmessgerät SOBO 20 die aufgebrauchte Solemenge (FS100) sowohl auf einer glatten (Petrischale) als auch auf einer rauen Oberfläche (Bohrkern) leicht unterschätzt. Zur übersichtlicheren Darstellung der Ergebnisse sind die bei idealer Messgenauigkeit zu erwartenden Ergebnisse strichliert eingezeichnet.

Auf der Petrischale sind die Abweichungen vom Sollwert allgemein geringer und steigen von 2 % bei 10 g/m² auf 6,7 % bei 40 g/m². Auf der rauen Oberfläche (Bohrkern) steigt mit höherem Salzanteil auch die Streuung und die Unterschätzung der tatsächlich ausgebrachten Salzmenge; beispielsweise werden von 40 g/m² ausgebrachtem Streumittel nur zwischen 33 und 37 g/m² und damit 8 bis 18 % weniger detektiert.



a) FS100 auf Petrischale



b) FS100 auf Bohrkern

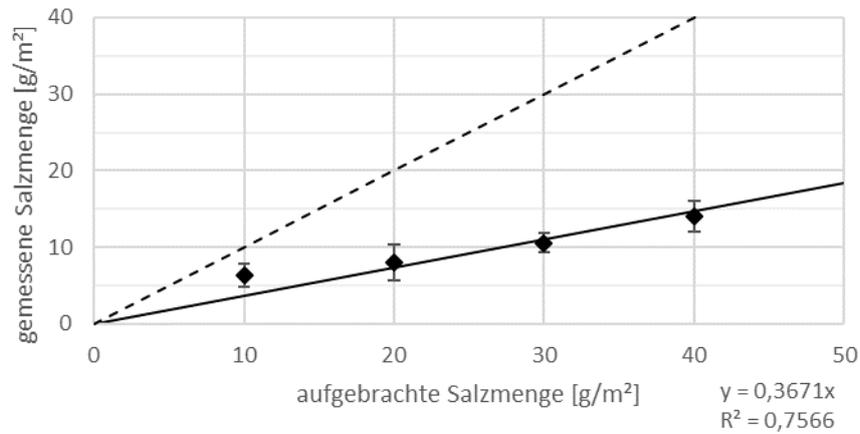
Abbildung 61: Restsalzmessungen im Labor FS100: oben Petrischale; unten Bohrkern

7.2.4 Vergleichsmessung Trockensalz (FS0)

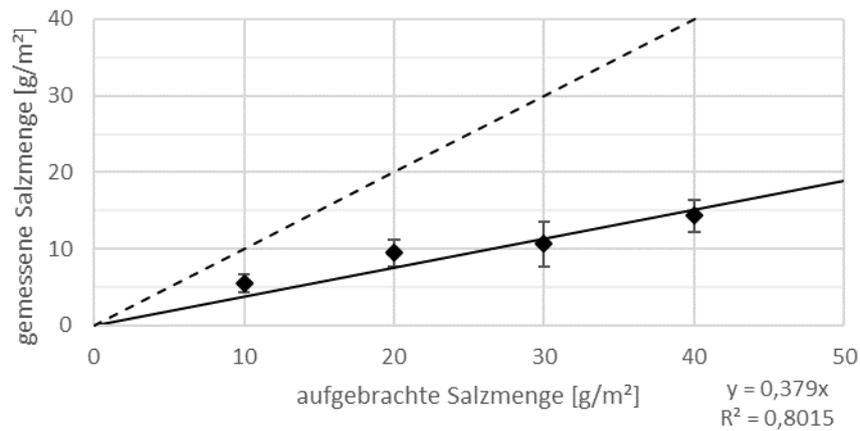
Aufwendiger gestaltete sich die Handhabung von Trockensalz, da das Aufbringen der geforderten Mengen (siehe Tabelle 12) nur durch Hinzufügen oder Entfernen einzelner Salzkörner zu bewerkstelligen war. Das Prüfprogramm umfasste sowohl feines Siedesalz als auch gröberes Steinsalz als Streumittel.

Siedesalz wird durch das SOBO 20 schon bei geringen Streumengen von 10 g/m² auf der glatten Oberfläche gegenüber dem Sollwert um 35 % unterschätzt, auf dem rauen Bohrkern steigt dieser Wert auf knapp 45 %. Unabhängig der Oberfläche werden ausgebrachte Siedesalze bei 40 g/m² mit einem Messwert von 14 g/m² und damit mit einer Abweichung von 65 % sehr deutlich unterschätzt. Siehe dazu die ersten beiden Grafiken in Abbildung 62. In der dritten Grafik ist das Ergebnis der Salzmessung von gröberem Steinsalz zu sehen. Vermutlich aufgrund der (im Vergleich zu feinen Siedesalzkörnern) kleineren spezifischen Oberfläche gehen grobe Steinsalzkörner weniger schnell mit der Messflüssigkeit in Lösung und werden daher nicht durch das SOBO 20 detektiert. Wie in der letzten der untenstehenden Abbildungen

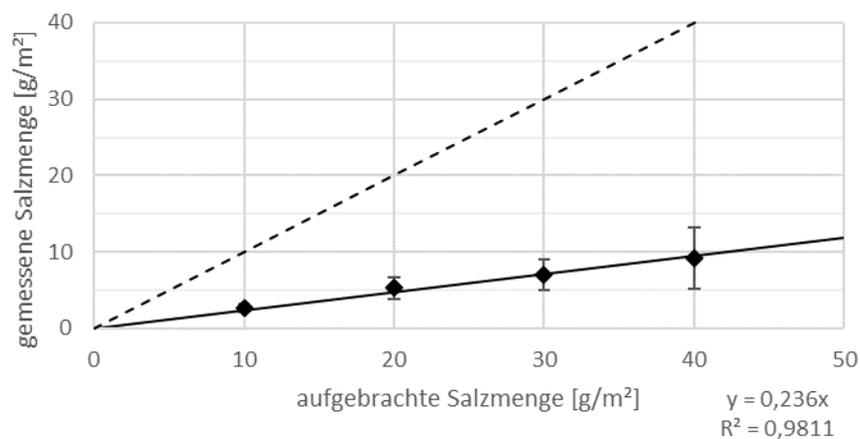
ersichtlich, werden die tatsächlich ausgebrachten Salzmengen deswegen noch stärker (zwischen 70 und 80 % bzw. 10 g/m² statt 40 g/m²) unterschätzt, d.h. es zeigt sich ein systematischer Fehler.



a) Siedesalz FS0 auf Petrischale



b) Siedesalz FS0 auf Bohrkern



c) Steinsalz FS0 auf Petrischale

Abbildung 62: Restsalzmessungen im Labor FS0: oben Petrischale Siedesalz; mittig Bohrkern Siedesalz; unten Petrischale Steinsalz

7.2.5 Vergleichsmessung aufgetrocknete Sole (FS100 getrocknet)

Da die Genauigkeit der Salzmessung mit dem SOBO 20 offensichtlich stark davon abhängig ist ob bzw. wie schnell Salz gelöst werden kann, wurde eine weitere Versuchsreihe durchgeführt, bei der die Messung von aufgetrocknetem Salz untersucht werden sollte. Dafür wurden, wie in Abbildung 63 beispielhaft zu sehen ist, unterschiedliche Mengen reiner Sole einige Tage der Luft ausgesetzt um die enthaltene Flüssigkeit verdampfen und so das Salz rekristallisieren zu lassen.

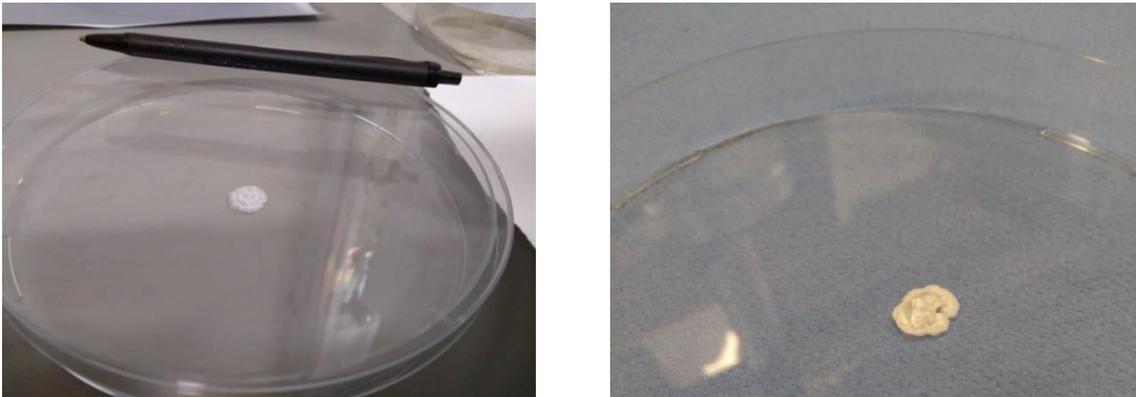
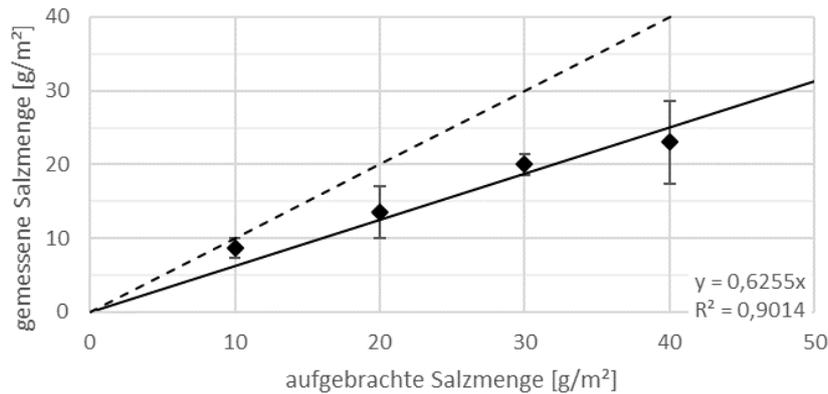
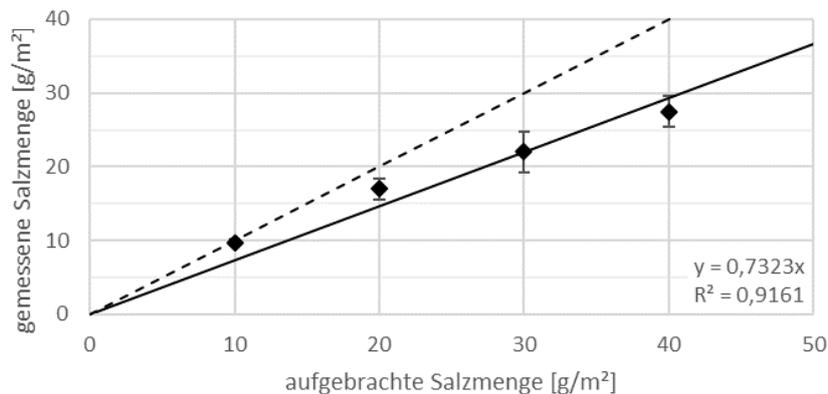


Abbildung 63: FS100 aufgetrocknet (5 Tage)

Wie in Abbildung 64 ersichtlich wird die aufgetrocknete Salzmenge unter großer Streuung der Messergebnisse stark gegenüber dem Sollwert unterschätzt, wobei geringe Streumengen um 14 % und größere um 35 bis 40 % vom ursprünglich ausgebrachten Salz abweichen. Dabei wurde beobachtet, dass das SOBO 20 längere Zeit benötigt um das rekristallisierte Salz in Lösung zu bringen – und zwar dauert es oft länger als 15 Sekunden bis keine Veränderungen im Messergebnis mehr registriert werden können. Daher wurde in einer zweiten Versuchsreihe das aufgetrocknete Salz zuerst mit der Messflüssigkeit befeuchtet und erst nach einer Minute Einwirkzeit der Messung unterzogen. Die Ergebnisse im zweiten Diagramm in untenstehender Abbildung 64 zeigen, dass durch diese Vorgehensweise das Messergebnis verbessert werden kann, jedoch weiterhin eine Abweichung von bis zu 30 % zum Sollwert besteht. Eine Steigerung der Genauigkeit erfolgt lediglich im Bereich mit geringem Salzgehalt.



a) FS100 aufgetrocknet



b) FS100 aufgetrocknet und vor Messung befeuchtet

Abbildung 64: FS100 oben aufgetrocknet; unten aufgetrocknet und vor Messung befeuchtet

7.3 Restsalz auf der Fahrbahn bei Glättemeldeanlagen

Um die Messwerte einiger Glättemeldeanlagen (GMA) mit dem SOBO 20 zu überprüfen, wurden an vier verschiedenen GMA der Stadt Wien Messungen durchgeführt. Dabei wurden folgende Daten erfasst:

- Lufttemperatur
- Oberflächentemperatur mittels Thermokamera
- Fahrbahnzustand der Rollspur (trocken – feucht – nass – glatt)
- Fahrbahnzustand der GMA (trocken – feucht – nass – glatt)
- Niederschlagsart (kein – Regen – Schnee – Schneeregen)
- Salzgehalt auf der Fahrbahn neben den Sensoren der GMA
- Salzgehalt auf der Fahrbahn in der Rollspur

Nachstehende Werte wurden von den Glättemeldeanlagen ausgelesen:

- Lufttemperatur
- Bodentemperatur
- Fahrbahnbelagszustand: trocken, feucht, nass
- Gefriertemperatur
- Glättegefahr

7.3.1 Messorte und Sensoren

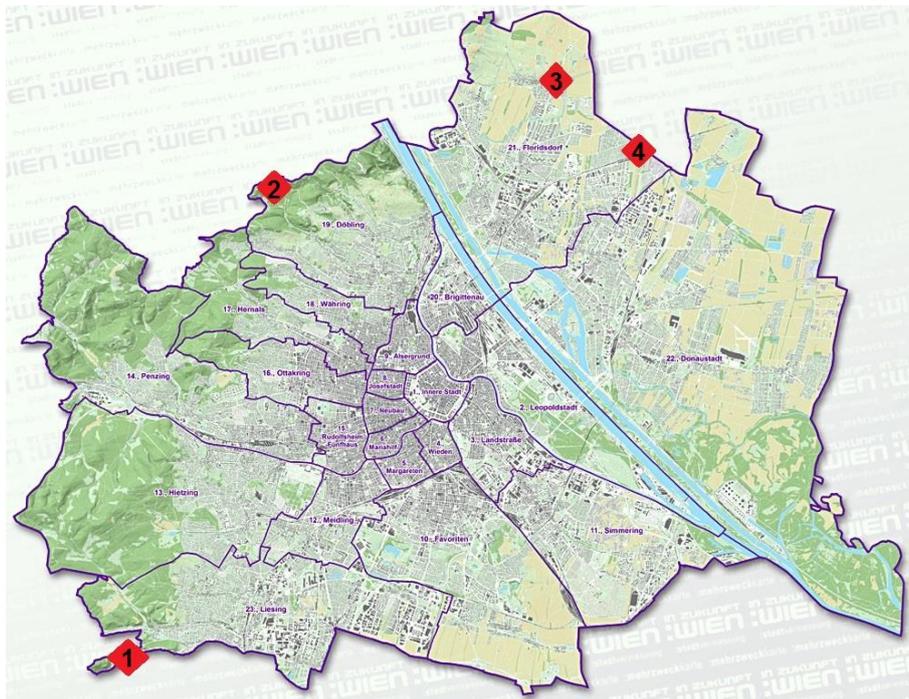


Abbildung 65: Karte der gemessenen GMA in Wien [17]

Aus insgesamt elf Glättemeldeanlagen wurden vier aufgrund ihrer guten Erreichbarkeit und einfachen Messmöglichkeit ausgewählt. Dabei wurden an insgesamt drei Messtagen jeweils eine Messung am Vormittag und eine Folgemessung am Nachmittag durchgeführt. In Abbildung 65 oberhalb und in der Tabelle 13 unterhalb sind die Standorte der GMA ersichtlich.

Tabelle 13: Messorte

Nr	Adresse	Bemerkung
1	Kaltenleutgebner Str. 14, 1230 Wien	Fahrstreifen stadteinwärts
2	Höhenstr. / Rohrerwiese, 1190 Wien	Fahrstreifen Richtung Cobenzl
3	Brünner Straße 232, 1210 Wien	Fahrstreifen stadtauswärts
4	Seyringer Straße 185, 1210 Wien	Fahrstreifen stadtauswärts

In Abbildung 66 sind jene in Abbildung 67 abgebildeten Bodensensoren in Asphalt eingelassen zu sehen.



Abbildung 66: Bodensensoren eingebaut

Alle in Wien überprüften GMA sind mit Sensoren der Firma Boschung ausgestattet, da die Sensoren jedoch nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen, konnten nur folgende Werte ausgelesen werden:

- Belags- und Lufttemperatur
- Feststellen des Gefrierpunkts durch Abkühlung (nicht möglich bei trockenem Sensor)
- Feststellen des Belagszustandes (trocken, feucht, nass)
- Glättewarnung in Abhängigkeit des Gefrierpunkts



Abbildung 67: Symbolfoto Bodensonden [15]

7.3.2 Messmethodik

Wie in Abbildung 68 ersichtlich wurden mit dem SOBO 20 mindestens drei Punkte jeweils auf Höhe der GMA, in der Rollspur und bei Notwendigkeit auch im Randbereich durchgeführt. Vor und nach jeder Messreihe sind zusätzlich am Gehsteig zwei Probemessungen zu tätigen, um die Messkammer zu reinigen und mögliche Probleme bei der Injektion der Messflüssigkeit, die durch den Transport auftreten können, zu eliminieren.

Zusätzlich wurde zur Beurteilung der Oberflächen- und Lufttemperatur der Nahbereich der Sensoren mit einer Thermobildkamera (Testo 880-3) bzw. einem Thermometer gemessen und weiters auch der Feuchtigkeitszustand der Sensoren und der Rollspur optisch bewertet.



Abbildung 68: SOBO20 Messpunkte

7.3.3 Kaltenleutgebner Straße

Die Glättmeldeanlage befindet sich auf der Kaltenleutgebner Straße gegenüber der Hausnummer 14 in einem 30 km/h Abschnitt (Abbildung 69). Die Restsalzmessung wurde an drei Tagen jeweils um 8 und um 13 Uhr durchgeführt – die Messergebnisse des SOBO 20 und die Daten der Glättmeldeanlage sind in nachstehender Tabelle 14 zusammengefasst.



Abbildung 69: Kaltenleutgebner Straße Örtlichkeit und Bodensensoren

Tabelle 14: Kaltenleutgebner Straße – Messung I bis III

Ort	23. Kaltenleutgebner Straße				23. Kaltenleutgebner Straße				23. Kaltenleutgebner Straße			
	Messung I				Messung II				Messung III			
	Vormittag		Nachmittag		Vormittag		Nachmittag		Vormittag		Nachmittag	
	08:15		13:30		08:15		13:30		08:15		13:15	
Instrument	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA
T _{Luft} [°C]	-1,5	-2,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0		-2,2	-1,5	0,0	
T _{Oberfläche} [°C]	-6,5	-1,4	-2,2	2,7	-2,8	0,1	-2,2		-1,6	-1,5	1,1	
Zustand GMA	trocken	trocken	trocken	trocken	feucht	nass	feucht		feucht	nass	feucht	
Zustand Rollspur	trocken	-	trocken	-	nass	-	nass		feucht	-	feucht	
Niederschlag	kein	kein	kein	kein	kein	leicht	kein		kein	kein	kein	
Salz GMA [g/m ²]	∅ 6,0		∅ 9,3		∅ 6,3		∅ 2,3		∅ 12,5		∅ 9,3	
Salz Rollspur [g/m ²]	∅ 3,8		∅ 6,6		∅ 23,5		∅ 6,8		∅ 20,3		∅ 8,7	
Salz Rand [g/m ²]											∅ 11	
Glättewarnung GMA		trocken		trocken		-7,9				-6,5		

Interpretation der Messergebnisse

Für diese Glätteldealanlage lagen aufgrund von Störungen der Datenübertragung an zwei Nachmittagen keine Ergebnisse vor. Ungeachtet dessen liegen bezüglich der Vergleichbarkeit der Lufttemperatur kaum Unterschiede vor, die Oberflächentemperatur wurde jedoch an zwei von drei Tagen von der GMA deutlich höher (um 4 bis 5 °C) eingeschätzt. Der angezeigte Oberflächenzustand entsprach immer den tatsächlichen Zuständen, Glättewarnungen wurden nicht ausgelöst, da zu den Messzeitpunkten ein ausreichender Salzgehalt im Nahbereich der GMA festgestellt wurde. In Abbildung 70 ist das Wärmebild zur Beurteilung der Oberflächentemperatur exemplarisch für einen Vormittag und einen Nachmittag dargestellt, wobei alle Wärmebilder mit der Software IRSoft der Firma Testo GmbH ausgewertet und abgebildet wurden. Des Weiteren sind in Tabelle 15 die Einzelmessungen des SOBO 20 aufgelistet.

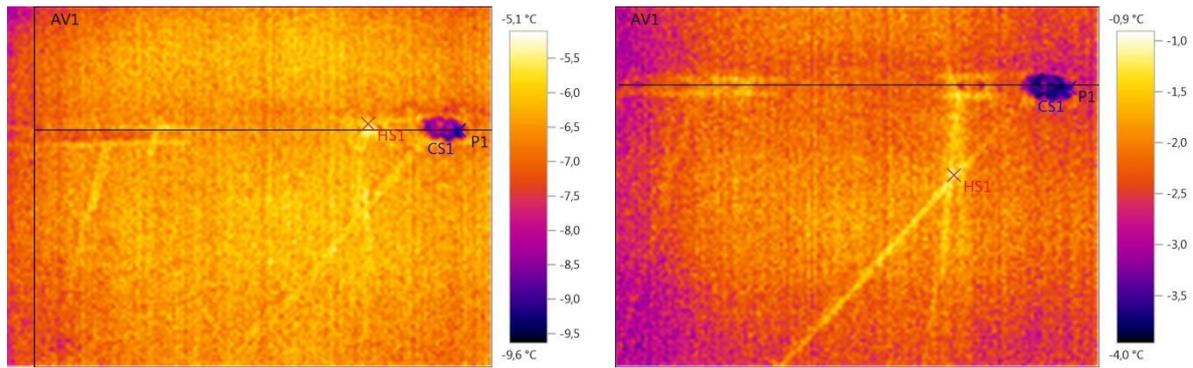


Abbildung 70: Wärmebild Kaltenleutgebner Straße Vormittag links und Nachmittag rechts

Tabelle 15: Kaltenleutgebner Straße - Restsalzmengen I bis III

Messung I						Messung II						Messung III					
Vormittag [g/m ²]			Nachmittag [g/m ²]			Vormittag [g/m ²]			Nachmittag [g/m ²]			Vormittag [g/m ²]			Nachmittag [g/m ²]		
GMA	Roll-spur	Rand	GMA	Roll-spur	Rand	GMA	Roll-spur	Rand	GMA	Roll-spur	Rand	GMA	Roll-spur	Rand	GMA	Roll-spur	Rand
6,6	3,4		8,5	10,0		12,0	7,3		3,8	5,9		10,0	21,0		18,0	5,5	11,0
6,3	3,9		11,0	4,9		7,3	10,0		2,4	16,0		14,0	22,0		8,0	11,0	
5,2	4,0		8,4	6,0		0,0	50,0		3,2	0,0		4,9	25,0		5,5	12,0	
				5,5		4,6	29,0		0,0	4,7		21,0	13,0		5,8	6,1	
						7,5	21,0		2,0	7,2							
Ø 6,0	Ø 3,8		Ø 9,3	Ø 6,6		Ø 6,3	Ø 23,5		Ø 2,3	Ø 6,8		Ø 12,5	Ø 20,3		Ø 9,3	Ø 8,7	Ø 11

7.3.4 Höhenstraße

Dieser Abschnitt der Höhenstraße befindet sich auf einer Höhe von ca. 220 m ü. A. in unmittelbarer Umgebung der Rohrerwiese bzw. des Restaurants Fischerhaus. Wie auf der Abbildung 71 ersichtlich ist die Kopfsteinpflasterung im Bereich der Glättemeldeanlage für die Bodensensoren durch Asphalt ersetzt worden. Die Messergebnisse vor Ort und der Glättemeldeanlage selbst sind in Tabelle 16 zu sehen.



Abbildung 71: Höhenstraße Örtlichkeit und Bodensensoren

Tabelle 16: Höhenstraße – Messung I bis III

Ort	19. Höhenstraße				19. Höhenstraße				19. Höhenstraße			
	Messung I				Messung II				Messung III			
	Vormittag		Nachmittag		Vormittag		Nachmittag		Vormittag		Nachmittag	
	10:30		15:00		09:45		15:00		09:45		14:45	
Instrument	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA
T _{Luft} [°C]	-1,5	-1,8	-1,0	-0,8	-1,0	0,1	-1,0	0,2	-2,0	-1,0	-1,0	0,7
T _{Oberfläche} [°C]	-1,9	2,0	-3,6	3,0	-2,0	0,5	-4,6	1,8	-3,5	1,9	0,2	5,5
Zustand GMA	trocken	trocken	trocken	trocken	feucht	nass	feucht	nass	feucht	feucht	trocken	trocken
Zustand Rollspur	trocken	-	trocken	-	feucht	-	feucht	-	feucht	-	trocken	-
Niederschlag	kein	kein	kein	kein	leicht	leicht	kein	leicht	kein	kein	kein	kein
Salz GMA [g/m ²]	∅ 1,6		∅ 0,0		∅ 3,0		∅ 0,0		∅ 19		∅ 9,8	
Salz Rollspur [g/m ²]	∅ 0,0		∅ 0,8		∅ 6,1		∅ 0,0		∅ 13,3		∅ 6,9	
Salz Rand [g/m ²]	∅ 2,9						∅ 4,5		∅ 8,0		∅ 11,0	
Glättewarnung GMA		trocken		trocken		-2		-0,5		-18		trocken

Interpretation der Messergebnisse

Ähnlich der Ergebnisse der GMA Kaltenleutgebner Straße wurden auch hier die Oberflächen-temperaturen von der GMA um 2 bis 6 °C höher angezeigt als selbst vor Ort gemessen. Dabei kann der Umstand, dass die GMA Temperaturen über 0 °C misst, obwohl die tatsächliche Bodentemperatur schon unter der Gefriertemperatur von Wasser ohne Taumitteln liegt, besonders problematisch werden. Weiters ist, wie auf den Wärmebildern in Abbildung 72 ersichtlich, die Belagstemperatur der Pflastersteine deutlich unter jener des Asphalts im Bereich der GMA, wodurch diese zusätzlich höhere Temperaturen als tatsächlich auf dem Rest der Fahrbahn vorherrschen, vermuten lässt. Die von der GMA aufgezeichnete Lufttemperatur scheint mit einer maximalen Differenz von ±1 °C zur vor Ort gemessenen Temperatur genau genug. Auch der Feuchtigkeitszustand der Oberfläche wurde stets richtig gemessen, Glättewarnungen wurden zu den Messzeitpunkten nicht ausgelöst, da entweder die Umgebungsbedingungen nicht für eine Reifbildung ausreichen oder genug Restsalz auf der Fahrbahn lag. Detailergebnisse der SOBO 20 Restsalzmessung sind in Tabelle 17 angeführt.

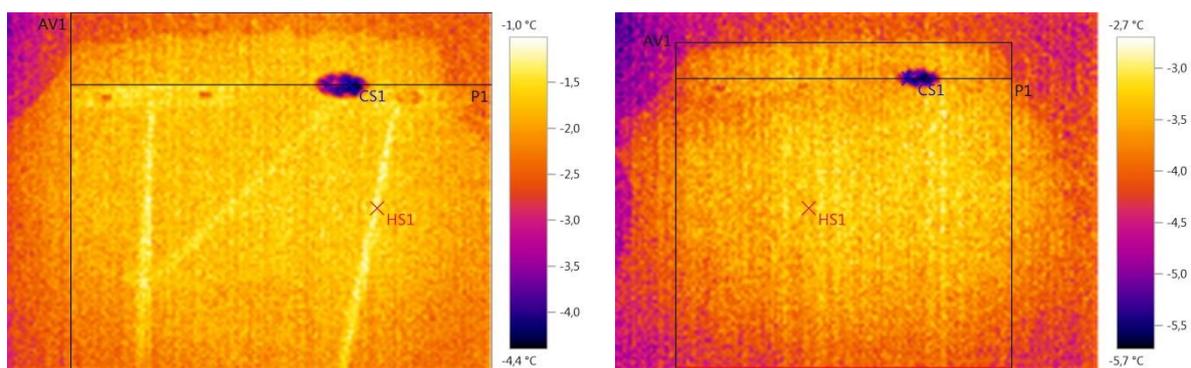


Abbildung 72: Wärmebild Höhenstraße Vormittag links und Nachmittag rechts

Tabelle 17: Höhenstraße - Restsalzmengen I bis III

Messung I						Messung II						Messung III					
Vormittag [g/m ²]			Nachmittag [g/m ²]			Vormittag [g/m ²]			Nachmittag [g/m ²]			Vormittag [g/m ²]			Nachmittag [g/m ²]		
GMA	Rollspur	Rand	GMA	Rollspur	Rand	GMA	Rollspur	Rand	GMA	Rollspur	Rand	GMA	Rollspur	Rand	GMA	Rollspur	Rand
2,6	0,0	2,9	0,0	0,0		3,6	11,0		0,0	0,0	2,0	16,0	12,0	8,0	8,2	6,1	11,0
0,0	0,0	3,1	0,0	2,3		0,0	7,3		0,0	0,0	7,8	20,0	13,0		8,0	6,3	
2,2	0,0	2,6	0,0	0,0		5,5	0,0		0,0	0,0	0,0	21,0	15,0		13,0	5,1	
									0,0	0,0	8,0				10,0	10,0	
Ø 1,6	Ø 0,0	Ø 2,9	Ø 0,0	Ø 0,8		Ø 3,0	Ø 6,1		Ø 0,0	Ø 0,0	Ø 4,5	Ø 19	Ø 13,3	Ø 8,0	Ø 9,8	Ø 6,9	Ø 11,0

7.3.5 Brünner Straße

Die Glättemeldeanlage auf der B7 Brünner Straße befindet sich in einem Bereich mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 70 km/h auf der Fahrbahn stadtauswärts ca. einen Kilometer vor der Stadtgrenze Wien (siehe Abbildung 73). Die Ergebnisse der Messungen, die an drei Tagen jeweils gegen 11 Uhr vormittags und 16 Uhr nachmittags erfolgten, sind in Tabelle 18 dargestellt.



Abbildung 73: Brünner Straße - Örtlichkeit und Bodensensoren

Tabelle 18: Brünner Straße – Messung I bis III

Ort Datum Tageszeit Uhrzeit Instrument	21. Brünner Straße				21. Brünner Straße				21. Brünner Straße			
	Messung I				Messung II				Messung III			
	Vormittag		Nachmittag		Vormittag		Nachmittag		Vormittag		Nachmittag	
	11:30		15:45		10:30		16:15		10:45		16:00	
T _{Luft} [°C]	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA
T _{Oberfläche} [°C]	0,0	0,9	0,0	1,7	1,0	2,2	0,5	2,3	0,0	2,0	0,0	2,1
Zustand GMA	-3,2	5,8	-1,7	6,2	-0,1	5,5	0,0	5,6	3,9	5,5	0,6	4,0
Zustand Rollspur	trocken	trocken	trocken	trocken	feucht	nass	feucht	feucht	trocken	trocken	trocken	trocken
Niederschlag	trocken	-	trocken	-	feucht	-	feucht	-	trocken	-	trocken	-
Salz GMA [g/m ²]	kein	kein	kein	kein	Schnee	leicht	kein	kein	kein	kein	kein	kein
Salz Rollspur [g/m ²]	Ø 0,0		Ø 0,0		Ø 1,8		Ø 0,0		Ø 13,9		Ø 13,3	
Salz Rand [g/m ²]	Ø 0,0		Ø 0,0		Ø 3,5		Ø 0,0		Ø 12,8		Ø 11,3	
Glättestufe	Ø 0,0		Ø 0,0		Ø 5,8		Ø 4,2		Ø 13,0		Ø 17,0	
Glättestufe GMA		trocken		trocken		NV		NV		trocken		trocken

Interpretation der Messergebnisse

Bei diesen Vergleichsmessungen wurden die Lufttemperaturen von der GMA mit bis zu 2 °C, und damit etwas mehr als bei den bisher überprüften Glättemeldeanlagen, überbewertet. Die aufgezeichneten Fahrbahntemperaturen lagen sogar um bis zu 9 °C höher als vor Ort mittels Wärmebildkamera (siehe Abbildung 74) festgestellt. Aufgrund dieser hohen Temperaturdifferenz wird empfohlen die Sensoren nochmals zu überprüfen um etwaige Fehlerquellen zu eruieren und gegebenenfalls genauer beurteilen zu können. Wie bei jeder bisher geprüften Glättemeldeanlage wurde auch hier zumindest der Fahrbahnzustand richtig beurteilt, bezüglich der Restsalzmengen bzw. der Gefriertemperatur waren leider wegen eines Defektes eines Sensors keine Daten abrufbar. Ungeachtet dessen sind Ergebnisse der Restsalzmessung in Tabelle 19 aufgelistet.

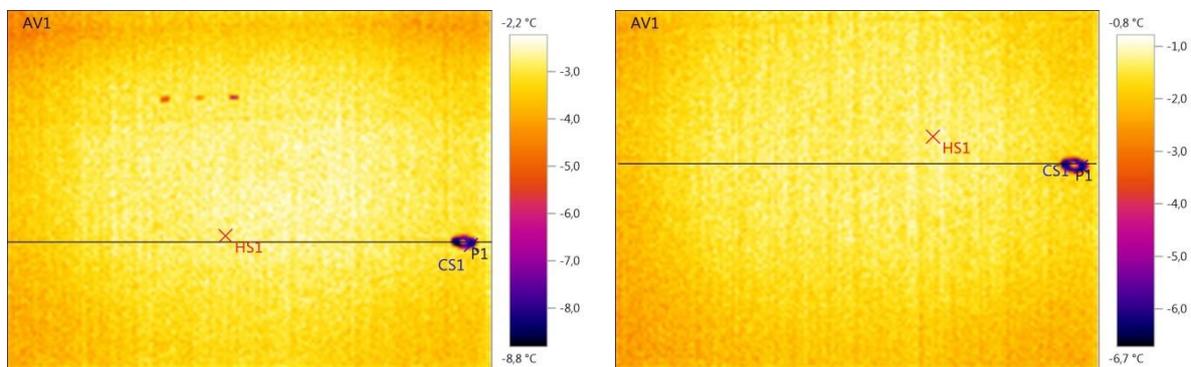


Abbildung 74: Wärmebild Brünner Straße Vormittag links und Nachmittag rechts

Tabelle 19: Brünner Straße – Restsalzmengen I bis III

Messung I						Messung II						Messung III					
Vormittag [g/m²]			Nachmittag [g/m²]			Vormittag [g/m²]			Nachmittag [g/m²]			Vormittag [g/m²]			Nachmittag [g/m²]		
GMA	Rollspur	Rand	GMA	Rollspur	Rand	GMA	Rollspur	Rand	GMA	Rollspur	Rand	GMA	Rollspur	Rand	GMA	Rollspur	Rand
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,7	8,3	0,0	0,0	4,7	8,4	9,5	13,0	10,0	12,0	17,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	5,8	0,0	0,0	4,5	11,0	9,7		15,0	12,0	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	3,1	5,3	0,0	0,0	3,1	23,0	14,0		10,0	8,2	
0,0	0,0	0,0	0,0			0,0	6,0	3,9	0,0	0,0	4,4	13,0	18,0		18,0	13,0	
∅ 0,0	∅ 0,0	∅ 0,0	∅ 0,0	∅ 0,0	∅ 0,0	∅ 1,8	∅ 3,5	∅ 5,8	∅ 0,0	∅ 0,0	∅ 4,2	∅ 13,9	∅ 12,8	∅ 13,0	∅ 13,3	∅ 11,3	∅ 17,0

7.3.6 Seyringer Straße

Diese Glättemeldeanlage befindet sich an der Seyringer Straße im Brückenbereich über der Nordbahntrasse. Im Gegensatz zu den anderen GMA sind die Bodensensoren tiefer eingebaut, dadurch kann sich bei entsprechendem Niederschlag Wasser auf den Sensoren sammeln – siehe nachstehende Abbildung 75. Auch hier wurde an drei Tagen jeweils kurz vor Mittag und am späten Nachmittag gemessen, die Ergebnisse sind in nachstehender Tabelle 20 ersichtlich.



Abbildung 75: Seyringer Straße - Örtlichkeit und Bodensensoren

Tabelle 20: Seyringer Straße – Messung I bis III

Ort	21. Seyringer Straße				21. Seyringer Straße				21. Seyringer Straße							
	Messung I								Messung II				Messung III			
	Vormittag		Nachmittag		Vormittag		Nachmittag		Vormittag		Nachmittag					
	12:00		16:30		11:15		17:00		11:15		16:45					
Instrument	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA	selbst	GMA				
T _{Luft} [°C]	1,0	0,0	0,5	0,7	1,0	1,3	1,0	1,7	1,0	1,1	0,5	1,2				
T _{Oberfläche} [°C]	0,4	2,4	-0,9	2,1	-1,5	2,0	-1,0	1,1	2,0	5,8	-1,6	5,1				
Zustand GMA	trocken	trocken	trocken	trocken	nass	nass	feucht	feucht	trocken	trocken	trocken	trocken				
Zustand Rollspur	trocken	-	trocken	-	nass	-	feucht	-	trocken	-	nass	-				
Niederschlag	kein	kein	kein	kein	kein	leicht	kein	kein	kein	kein	kein	kein				
Salz GMA [g/m ²]	∅ 5,3		∅ 6,4		∅ 8,0		∅ 51		∅ 8,5		∅ 8,4					
Salz Rollspur [g/m ²]	∅ 1,9		∅ 0,0		∅ 2,0		∅ 7,4		∅ 7,4		∅ 3,0					
Salz Rand [g/m ²]					∅ 15,5		∅ 11,2		∅ 8,7		∅ 32,7					
Glättewarnung GMA		trocken		trocken		-1		-2,6		trocken		trocken				

Interpretation der Messergebnisse

Auch bei dieser Glättmeldeanlage liegt der Unterschied der Lufttemperatur zur Messung vor Ort mit durchschnittlich 0,5 °C im vernachlässigbaren Bereich. Wiederum deutlich höher liegen die Messungen der Belagstemperatur der GMA, nämlich zwischen 3 und 7 °C im Vergleich zur Auswertung des Thermobildes (Abbildung 76). Besonders problematisch scheint die tiefe Einbaulage der Bodensensoren; das sich dort sammelnde Oberflächenwasser verdünnt die Solelösung weiter und wirkt sich daher negativ auf die Messung des Gefrierpunkts aus. Dieser Umstand war bei der zweiten Messreihe deutlich erkennbar, da die Gefrierterperatur trotz Salz auf der Fahrbahn relativ nahe an der tatsächlichen Belagstemperatur lag und eine Glättewarnung ausgegeben wurde. Siehe dazu Tabelle 20: Messung II Vor- und Nachmittag.

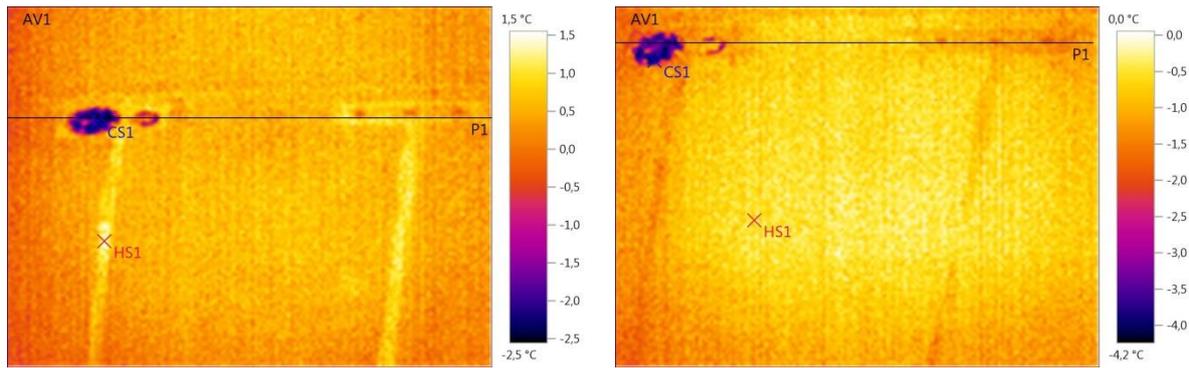


Abbildung 76: Wärmebild Seyringer Straße Vormittag links und Nachmittag rechts

Wie bei den vorherigen Messungen sind in Abbildung 76 wieder beispielhaft Wärmebilder zu sehen, wobei hier die mit Dichtmaterial verfüllten Fugen und Bodensensoren deutlich zu erkennen sind. Nachstehende Tabelle 21 stellt die Ergebnisse der Restsalzmessungen mit dem SOBO 20 für alle drei Messtage zur Schau.

Tabelle 21: Seyringer Straße – Restsalzmengen I bis III

Messung I						Messung II						Messung III					
Vormittag [g/m ²]			Nachmittag [g/m ²]			Vormittag [g/m ²]			Nachmittag [g/m ²]			Vormittag [g/m ²]			Nachmittag [g/m ²]		
GMA	Roll-spur	Rand	GMA	Roll-spur	Rand	GMA	Roll-spur	Rand	GMA	Roll-spur	Rand	GMA	Roll-spur	Rand	GMA	Roll-spur	Rand
6,2	4,3		3,9	0,0		4,8	2,1	10,0	46,0	12,0	14,0	8,2	7,5	8,7	6,0	3,1	28,0
6,6	2,8		12,0	0,0		21,0	0,0	0,0	38,0	3,2	10,0	7,4	12,0		7,1	0,0	33,0
8,0	2,3		3,4	0,0		6,3	0,0	34,0	63,0	4,7	9,6	10,0	2,7		12,0	5,9	37,0
2,7	0,0					0,0	5,7	18,0	57,0	9,6	11,0						
3,2	0,0																
Ø 5,3	Ø 1,9		Ø 6,4	Ø 0,0		Ø 8,0	Ø 2,0	Ø 15,5	Ø 51	Ø 7,4	Ø 11,2	Ø 8,5	Ø 7,4	Ø 8,7	Ø 8,4	Ø 3,0	Ø 32,7

7.4 Restsalzverteilung auf der Fahrbahn

Ergänzend zu den Restsalzmessungen in Wien wurden Restsalzmessungen an der Landesstraße bei Stockerau durch eine Straßenmeisterei durchgeführt. Dabei erfolgte eine Feuchtsalzstreuung FS30 sowohl mit 10 g/m² als auch mit 15 g/m² und wurde mittels SOBO 20 über den gesamten Fahrbahnquerschnitt unmittelbar vor und nach der Streufahrt sowie 30, 60 und 120 Minuten danach gemessen. In den nachstehenden Messergebnissen wurden die vor der Streufahrt detektierten Restsalzmengen bereits abgezogen.

In der dreidimensionalen Netzdarstellung stellt die Ordinate die gemessene Restsalzmenge in g/m², die beiden Abszissen die zweidimensionale Messfläche mit insgesamt 15 Messpunkten dar. Dabei befindet sich in einer Richtung der erste Messpunkt direkt am Fahrbahnrand, weitere 4 Messpunkte davon ausgehend je 1 m nach innen zur Gegenfahrbahn. In Richtung der Fahrbahnachse befinden sich die Messpunkte vom gewählten Querschnitt aus je 1 m dahinter in Fahrtrichtung.

Wie auf Abbildung 77 erkennbar, wurde unmittelbar nach der Streufahrt anstatt der bei FS30 und 10 g/m² erwarteten 7,6 g/m² punktuell höchstens 4 g/m² am Gegenfahrstreifen gemessen. Dieser Umstand entstand vermutlich aufgrund der Beeinflussung des Windes auf den Auswurf

direkt nach Abgabe am Drehteller des Streufahrzeuges. Da die Fahrbahn feucht war und leichter Niederschlag vorherrschte, ist eine Verteilung des am Boden liegenden Salzes durch den Wind ausgeschlossen. In Abbildung 78 sind die Messwerte 30 Minuten nach der Streufahrt dargestellt, dabei wurden maximal 2 g/m² in der Straßenmitte detektiert, 60 Minuten danach (Abbildung 79) blieb der Restsalzgehalt annähernd gleich, wurde jedoch durch den Verkehr offensichtlich besser auf der Fahrbahn verteilt. Zwei Stunden nach der Streuung war keine weitere Änderung der Restsalzmenge mehr zu beobachten. (siehe dazu Abbildung 80)

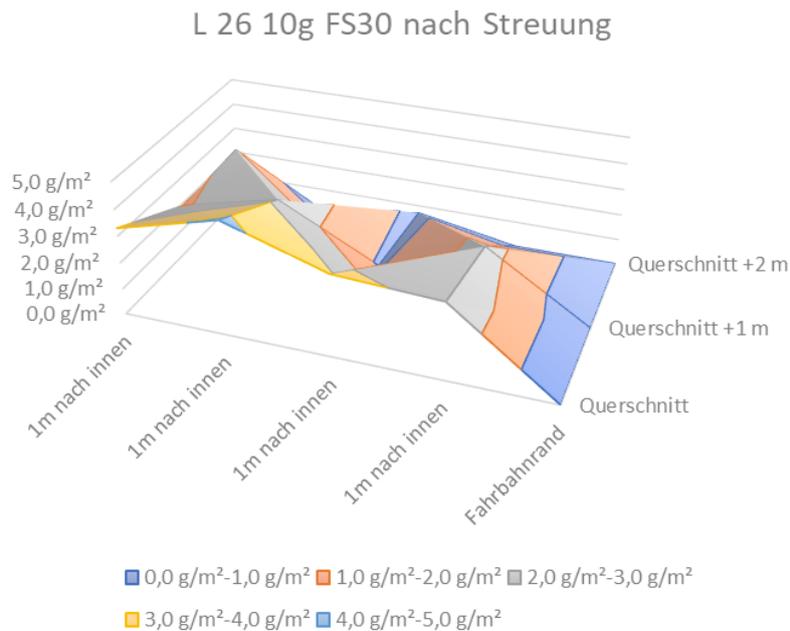


Abbildung 77: Restsalzgehalt unmittelbar nach Streuung FS30 10 g/m²

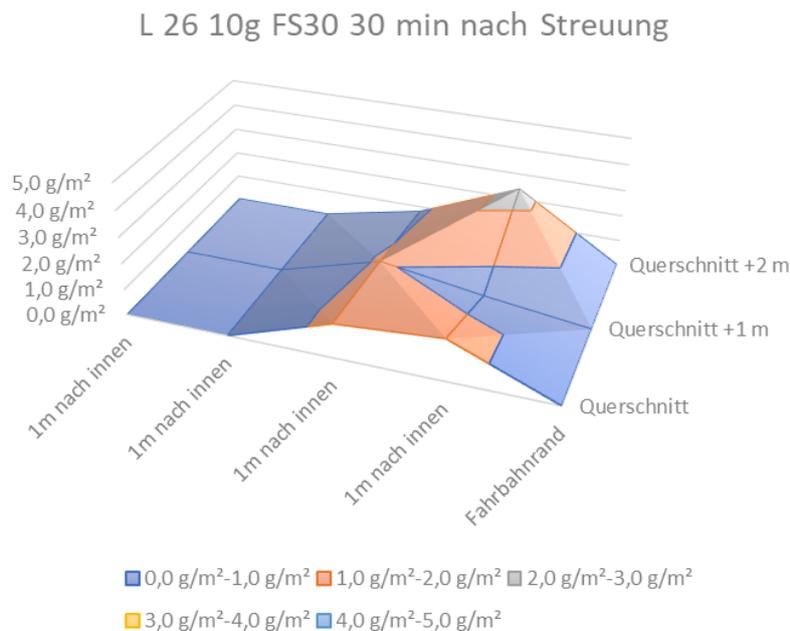


Abbildung 78: Restsalzgehalt 30 Minuten nach Streuung FS30 10 g/m²

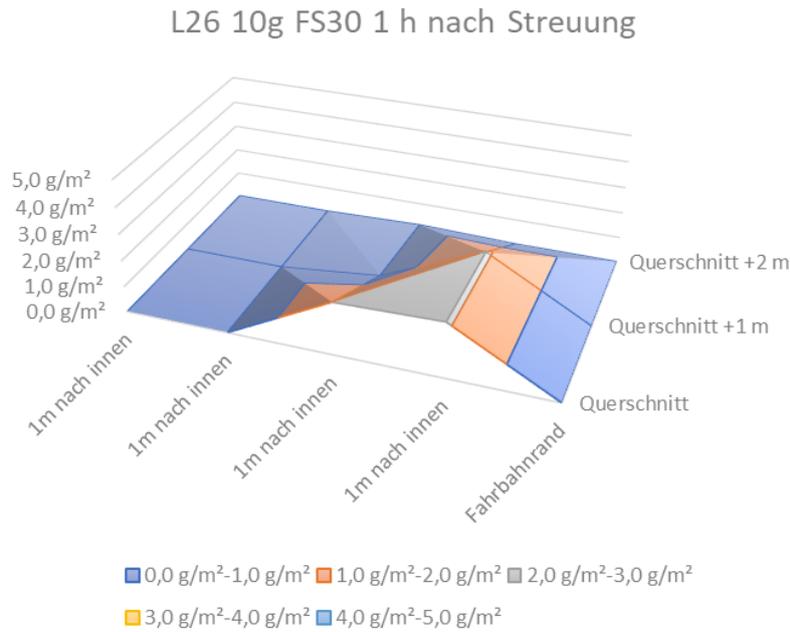


Abbildung 79: Restsalzgehalt 60 Minuten nach Streuung FS30 10 g/m²

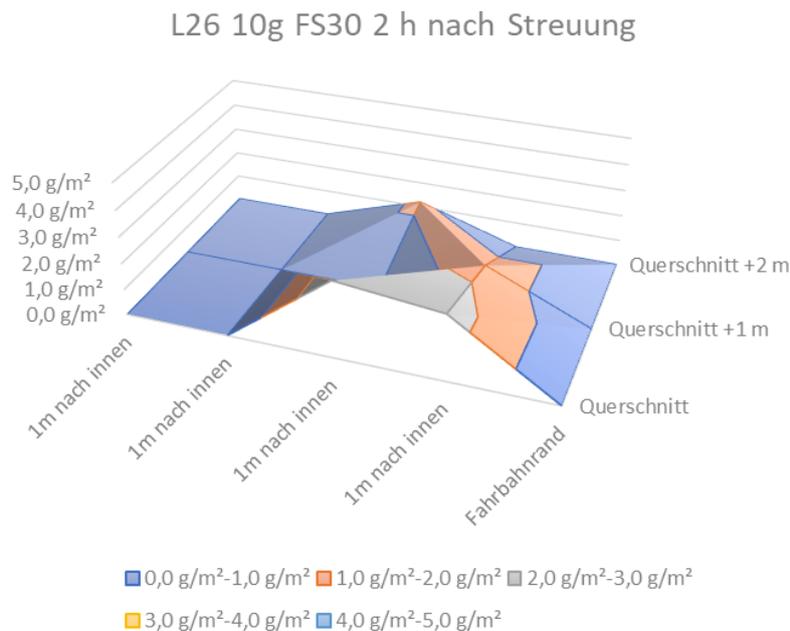


Abbildung 80: Restsalzgehalt 120 Minuten nach Streuung FS30 10 g/m²

In Abbildung 81 ist der Restsalzgehalt nach der Streufahrt FS30 mit 15 g/m² dargestellt, wobei hier punktuell maximal 6 g/m² in der Mitte der Fahrbahn gemessen wurde. Dies entspricht nur annähernd der Hälfte der bei diesem Streuszenario erwartetem Salzgehalt von 11,4 g/m². Die Ränder der Fahrbahn blieben von der Streuung der Tausalze nahezu unberührt. 30 Minuten nach der Streuung konnte sich das Salz auf der regennassen Fahrbahn offenbar gut verteilen und der Restsalzgehalt stieg leicht gegenüber zuvor (Abbildung 82). In Abbildung 83 ist die Verteilung des Salzes auf der Fahrbahn annähernd gleich wie 30 Minuten zuvor, lediglich die

Menge ist in dem gemessenen Querschnitt gesunken. 2 Stunden nach der Streufahrt wurde wieder eine merkliche Steigerung des Salzgehaltes registriert (siehe dazu Abbildung 84). Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Verkehr eine große Rolle bei der Verteilung des auf der Fahrbahn befindlichen Restsalzes spielen dürfte und dieser Umstand daher im Messquerschnitt offensichtlich zu einer Erhöhung geführt hat.

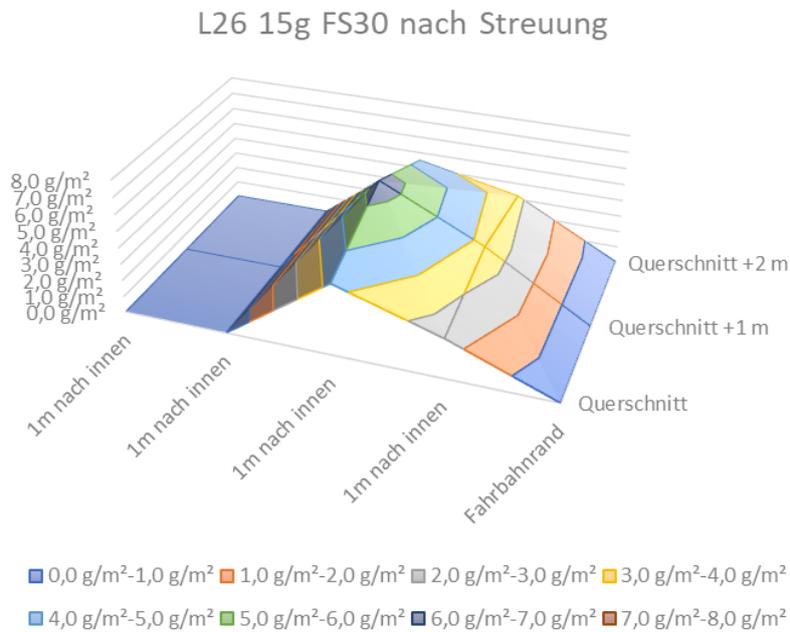


Abbildung 81: Restsalzgehalt unmittelbar nach Streuung FS30 15 g/m²

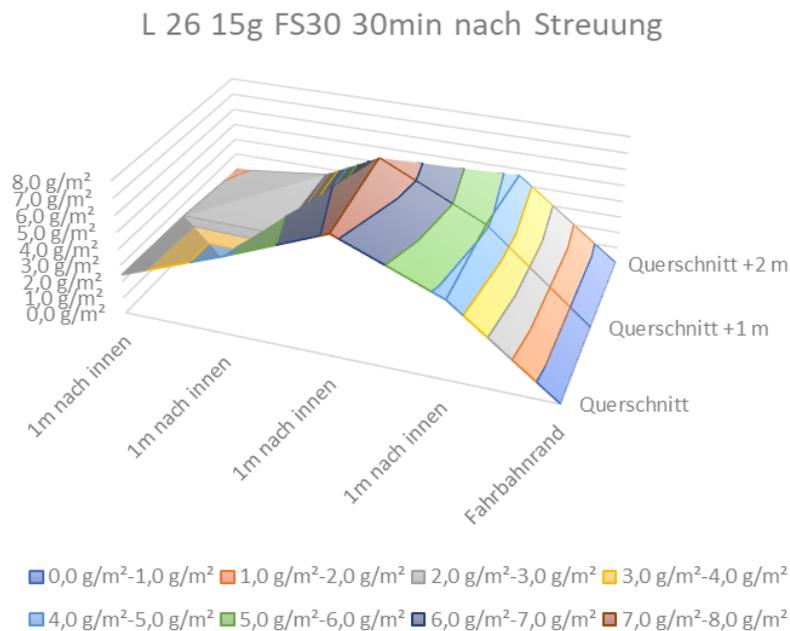


Abbildung 82: Restsalzgehalt 30 Minuten nach Streuung FS30 15 g/m²

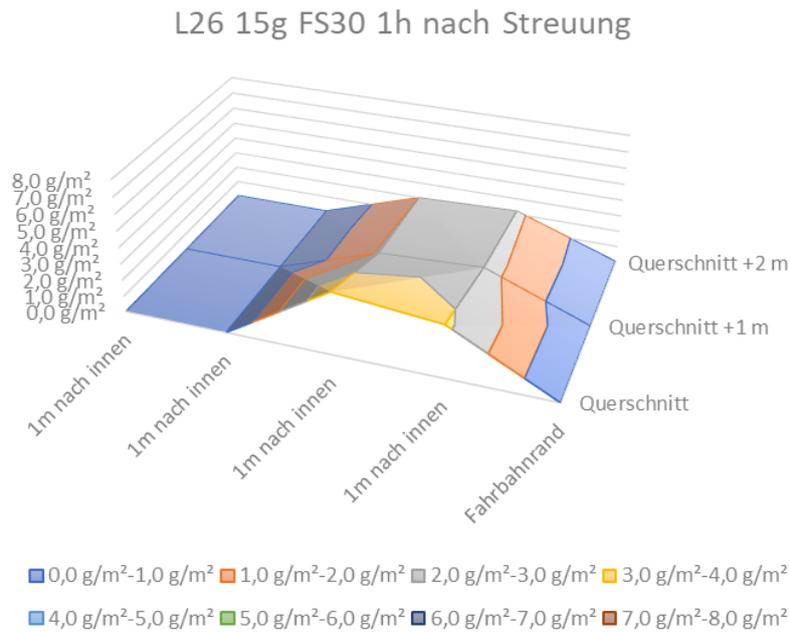


Abbildung 83: Restsalzgehalt 60 Minuten nach Streuung FS30 15 g/m²

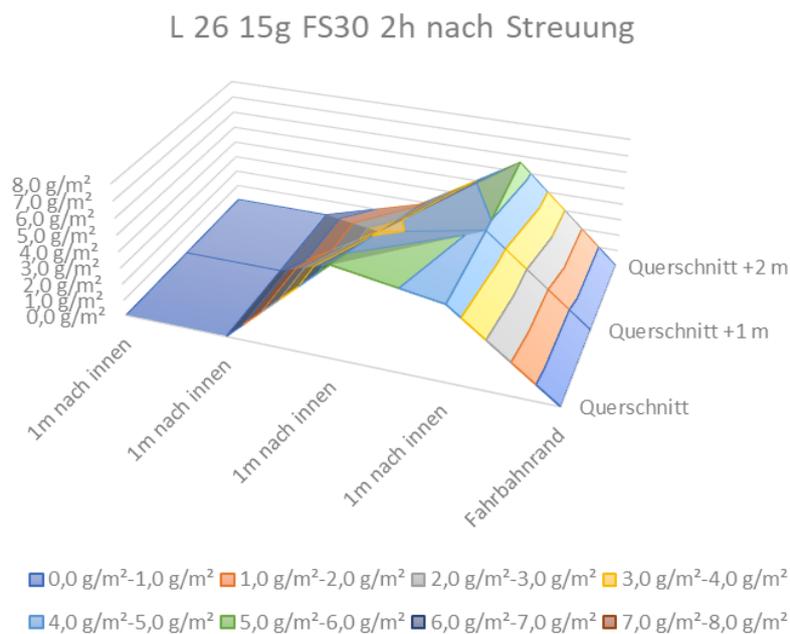


Abbildung 84: Restsalzgehalt 120 Minuten nach Streuung FS30 15 g/m²

7.5 Restsalzabnahme nach Streufahrt

Eine weitere Untersuchung verschiedener Streuszenarien wurde an einer Bundesstraße in Niederösterreich durchgeführt. Dabei wurde ein Vergleich der Restsalzmengen in Abhängigkeit der Streuart (Feuchtsalz FS30, FS50 und FS70 bis reine Sole FS100) und der Streumenge in g/m² angestrebt. Vor Durchführung der Versuche wurden die Messabschnitte alle auf bereits

vorhandene Salzrückstände überprüft und bei Notwendigkeit aus den danach stattfindenden Messungen herausgerechnet.

Die Ergebnisse stellen die Mittelwerte jedes Messquerschnittes dar, wobei dieser, soweit möglich aus bis zu 25 Messpunkten bestand. In nachstehender Abbildung 85 sind die Ergebnisse in Absolutwerten (Restsalz g/m^2), wobei Messergebnisse auf feuchtem Untergrund jeweils durch strichlierte Linien hervorgehoben werden für folgende Streuszenarien dargestellt:

- FS30 15 g/m^2 trocken und feucht
- FS30 20 g/m^2 trocken
- FS30 25 g/m^2 feucht
- FS50 15 g/m^2 trocken
- FS50 25 g/m^2 feucht
- FS70 15 g/m^2 trocken
- FS70 25 g/m^2 feucht
- FS100 16 g/m^2 trocken
- FS100 20 g/m^2 trocken

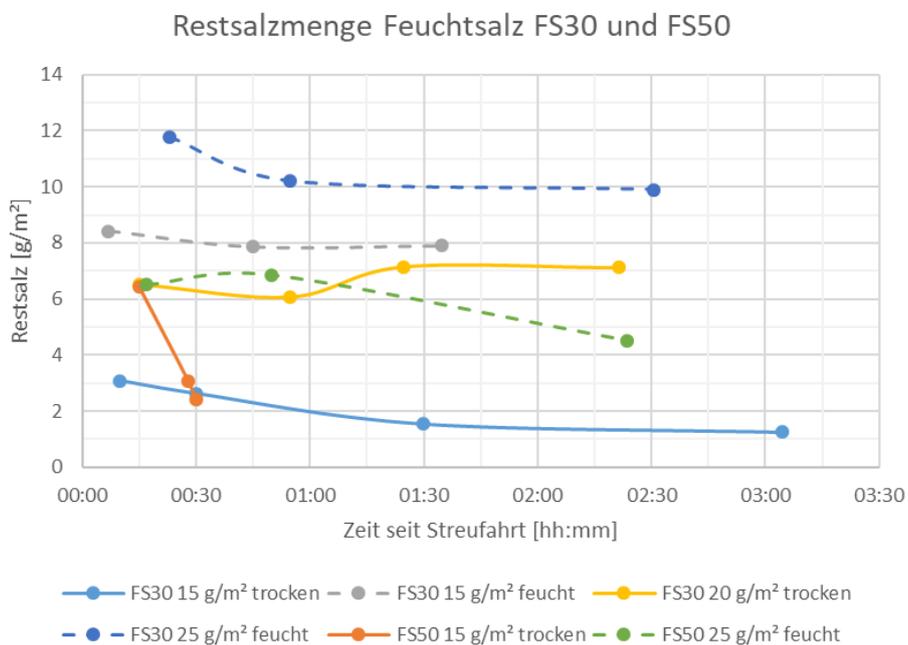


Abbildung 85: Restsalz in g/m^2 FS30 und FS50

Auf der Abbildung 85 ist zu erkennen, dass bei der Feuchtsalzstreuung FS30 15 g/m^2 bereits nach kurzer Zeit nach der Streufahrt auf trockenerer Fahrbahn deutlich weniger Restsalz als auf feuchter Fahrbahn zurückbleibt. Weiters ist die Abnahme bei späteren Messungen am feuchten Untergrund mit der Zeit deutlich geringer. Ein ähnliches Bild ergibt sich beim Vergleich der Messungen von FS30 20 g/m^2 auf trockenerer und FS30 25 g/m^2 auf feuchter Fahrbahn. Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass das Tausalz auf dem feuchten Untergrund deutlich bessere Liegezeiten und höhere Konzentrationen aufweist.

Bei der FS50 15 g/m^2 Streufahrt sieht man gegenüber der trockeneren Streuart FS30 15 g/m^2 , dass kurz nach dem Streuvorgang wesentlich mehr Restsalz auf trockenerer Fahrbahn verbleibt, jedoch bereits nach kurzer Zeit durch den Verkehr und den Wind von der Straße abtransportiert wird. Diese Messreihe musste jedoch aus betrieblichen Gründen nach ungefähr 30 Minuten abgebrochen werden. Die Messwerte von FS50 25 g/m^2 auf feuchter Fahrbahn zeigen anfänglich keine Verbesserung bezüglich der Ausbringung gegenüber FS50 auf trockenerer

Fahrbahn, das Restsalz wird jedoch immer weiter vom Verkehr verteilt und führt damit zu einer geringen Zunahme der Messwerte und zu einer längeren Liegezeit des ausgebrachten Taumittels.

Setzt man die genannten Messwerte in Relation zu ihrem Sollwert, das bedeutet beispielsweise bei einer Streufahrt von FS30 mit 15 g/m² einen theoretischen Sollwert von 11,4 g/m² auf der Fahrbahn, so folgt das in Abbildung 86 ersichtliche Diagramm. Besonders auffallend ist dabei die Differenz zwischen trockener und feuchter Fahrbahn bei relativ trockener Streufahrt FS30 mit 15 g/m². Auf der trockenen Fahrbahnoberfläche verbleiben anfänglich nur knapp 30 % der Sollsalmenge, nach 90 Minuten sinkt dieser Wert auf unter 15 % und stabilisiert sich 3 Stunden nach der Streufahrt auf 11 %. Auf feuchtem Untergrund sind kurz nach Ausbringen noch 75 % des Salzes vorhanden. Nach 45 und 90 Minuten stabilisiert sich der Restsalzgehalt bei 70 %. Der Vergleich derselben Streuart FS30 mit höherer Dosierung zeigt ein ähnliches Bild, jedoch ist die Differenz nicht mehr so eklatant als bei geringer Streumenge.

Auch diese Darstellung der Ergebnisse zeigt bei Streuart FS50 deutliche Unterschiede zwischen trockener und feuchter Fahrbahn. Untypisch ist nur der hohe Anfangsmesswert auf trockener Fahrbahn, der jedoch aufgrund von lokalen Bedingungen (wenig Wind, wenig Verkehr) entstanden sein dürfte.

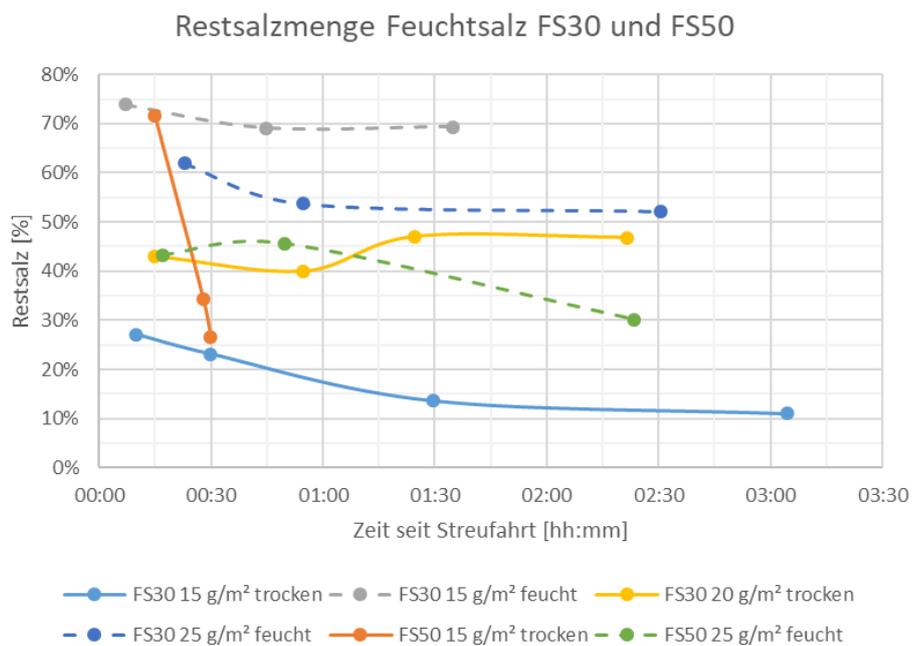


Abbildung 86: Restsalz in % vom Sollwert - FS30 und FS50

Der Vergleich zwischen FS70 Feuchtsalzausbringung und Ausbringung reiner Sole FS100 ist in Abbildung 87 ersichtlich, wobei strichlierte Linien weiterhin Messungen auf feuchter Fahrbahn hervorheben. Der Vergleich FS70 15 g/m² auf trockener Fahrbahn mit FS70 25 g/m² auf feuchter Fahrbahn zeigt in dieser Form der Darstellung einen großen Vorteil der Streuung auf der feuchten Oberfläche, obwohl das Streumittel selbst einen hohen Feuchtigkeitsgehalt besitzt und kein starker Unterschied zwischen trockener und feuchter Fahrbahn zu erwarten wäre.

Die reine Solestreueung FS100 wurde nur auf trockener Fahrbahn durchgeführt, wobei der Unterschied zwischen den Streufahrten mit 16 g/m² und 20 g/m² untypische Ergebnisse lieferte: bei der Streuung mit 16 g/m² Sole wurden größere Restsalzmengen gemessen als bei 20 g/m². Ansonsten zeigen die FS100 Streuungen sehr gute Liegezeiten bei gleichzeitig geringer Abnahme (teilweise Zunahme durch Verteilungswirkung des Verkehrs) mit der Zeit.

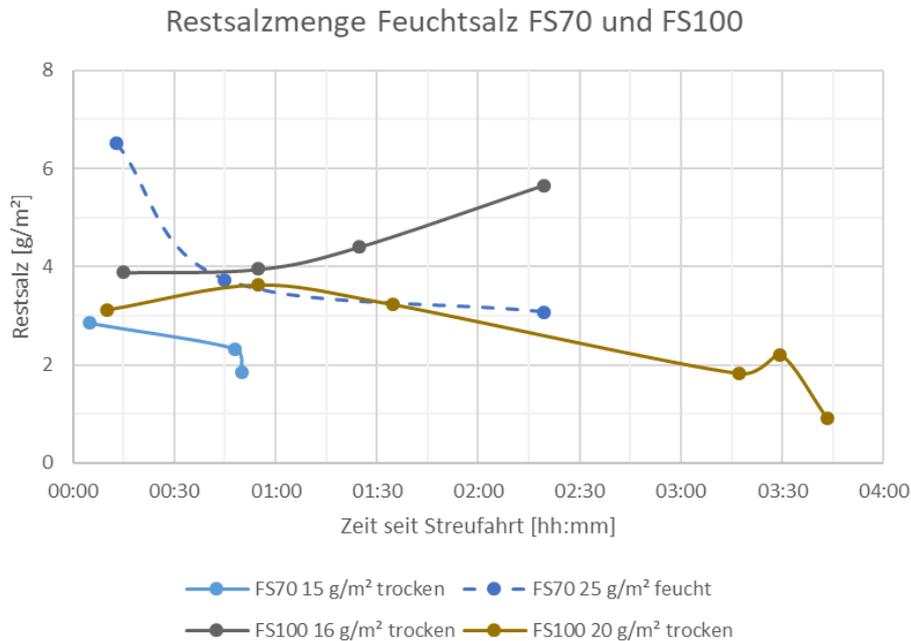


Abbildung 87: Restsalz in g/m² FS70 und FS100

In Abbildung 88, in der die gemessenen Werte in Relation zum Sollwert gesetzt sind, ist das unterschiedliche Verhalten von Feuchtsalz FS70 auf trockener und auf feuchter Fahrbahn nicht mehr so deutlich als Abbildung 87 vermuten lässt, denn prozentuell liegen hier beide annähernd auf gleichem Niveau.

Für die deutlich zu hohen Messwerte bei der reinen Solestreueung FS100 mit 16 g/m² dürfte jedoch eine falsch justierte Streu- bzw. Ausbringungsmechanik verantwortlich sein, da Werte jenseits der 100 % des möglichen Restsalzgehaltes theoretisch zwar lokal möglich, jedoch nicht über die gesamte Messzeit denkbar sind. Die Solestreueung mit 20 g/m² zeigt hingegen einen sehr guten Verbleib des Salzes bzw. der Sole auf der Fahrbahn. Von anfänglich 80 % Restsalz wird 55 Minuten nach der Streuung 90 % und 100 Minuten danach wieder 80 % gemessen. Erst nach über 3 Stunden nimmt der Restsalzgehalt auf ungefähr 40 % ab. Dies lässt im Allgemeinen auf eine sehr gute Verteilung durch den Verkehr und lange Liegezeiten für die reine Solestreueung schließen.

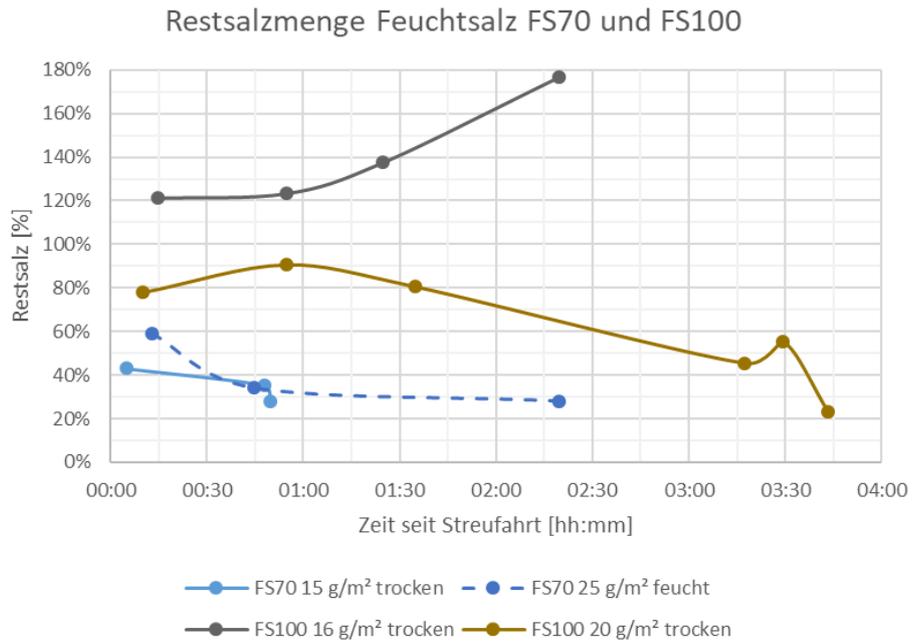


Abbildung 88: Restsalz in % vom Sollwert – FS70 und FS100

7.6 Vergleich der Restsalzgeräte SOBO 20 und Spül-Saug-Gerät

Da von der deutschen Bundesanstalt für Straßenwesen, kurz BaSt, kaum Restsalzmessgeräte SOBO 20 der Firma Boschung eingesetzt werden, sondern ein eigens von der BaSt mit Hilfe der Firma ESG entwickelte Spül-Saug-Gerät propagiert wird, lag ein Vergleich zwischen den beiden Geräten nahe.

Die Funktionsweise und Eigenschaften des Restsalzmessgerätes SOBO 20 der Firma Boschung wurde bereits erläutert. Das Spül-Saug-Gerät (kurz SSG) basiert auf einer ähnlichen Vorgehensweise, jedoch wird die Fahrbahn mit einem scharfen Strahl der Messflüssigkeit gespült, danach mittels Sauggerät samt gelöstem Salz wiederaufgenommen und in einen Behälter gespeist. Danach wird diese Lösung bezüglich ihres Salzgehaltes im Labor geprüft und mit der bekannten Menge der ausgebrachten Messflüssigkeit und der bekannten Messfläche auf die tatsächlich vorhandene Salzmenge in g/m² rückgerechnet. Folgende Abbildung 89 zeigt das Spül-Saug-Gerät in der Seiten- und Vorderansicht.



Abbildung 89: Restsalzmessgerät Spül-Saug-Gerät der Firma ESG [18]

Für die Vergleichsmessungen wurde eine Bundesstraße in Salzburg gewählt und zeitweise für die Messungen für den Verkehr gesperrt. Dieser Umstand zeigt einen Vorteil des SOBO 20 als Restsalzmessgerät, da eine Messung zwischendurch getätigt werden kann, die Vorlaufzeit und Versuchszeit für die Restsalzmessung mit dem Spül-Saug-Gerät der BaSt hingegen wesentlich größer ist. Nachstehende Abbildung 90 gibt Auskunft über die angewandte Prüfmethodik, wobei die Messungen in einer Fluchtlinie im Abstand von 0, 60 und 150 cm von der Randlinie jeweils abwechselnd mit dem SSG und dem SOBO 20 durchgeführt wurden.

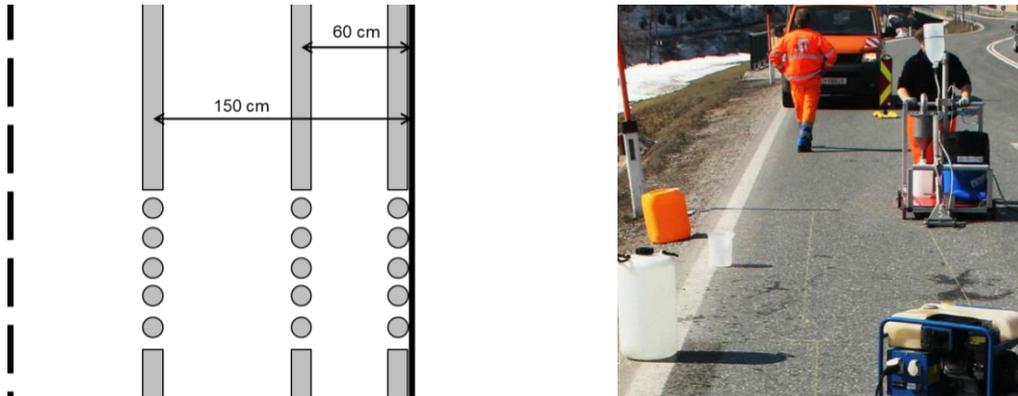


Abbildung 90: Prüfmethodik für Vergleich SOBO 20 mit SSG [18]

Die Wetterbedingungen waren für realitätsnahe Versuche nicht mehr gegeben, denn zur Versuchszeit wurden 15 °C Lufttemperatur bei Sonnenschein gemessen. Vor der Streufahrt wurde die Oberfläche mit je drei SOBO 20 und zwei Spül-Saug-Geräten der Firma ESG auf Salzurückstände überprüft. Die Ergebnisse sind in Abbildung 91, unterteilt in den Messbereich Rand und 60 bzw. 150 cm davon entfernt, ersichtlich. Hier wurden bereits im Mittel 2,5 g/m² Restsalz vom SOBO 20 und knapp 0,5 g/m² vom SSG detektiert und somit durchschnittlich 2 g/m² bzw. das Fünffache mehr gemessen. Aufgrund der kleinen Messergebnisse bildet die Abbildung 91 eine Ausnahme bezüglich der Skalierung, bei allen anderen nachfolgenden Abbildungen wurde der maximale Wert der Ordinate auf 22 g/m² erhöht.

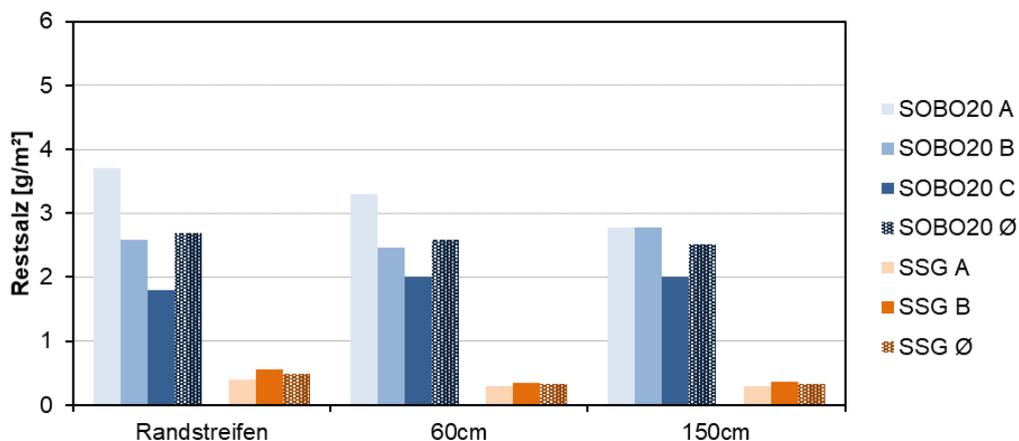


Abbildung 91: Restsalz in g/m² vor der Streufahrt

Unmittelbar nach der Streufahrt mit FS30 20 g/m², dies entspricht einem Sollsalzgehalt 15,2 g/m² auf der Fahrbahn, wurde abermals mit beiden Geräten gemessen und die Ergebnisse in Abbildung 92 dargestellt, dabei wurden jene Restsalzgehalte die vor der Streufahrt ermittelt wurden von den Ergebnissen abgezogen. Es ist ersichtlich, dass mit dem SSG, ausgenommen im Randbereich, im Mittel um 50 bis 60 % weniger Restsalz gemessen wurden als mit dem SOBO 20. Dabei ist die vom SOBO 20 gemessene Querverteilung vom Randstreifen in Richtung Fahrbahnmitte ansteigend, die Ergebnisse des SSG zeigen hingegen eine annähernd konstante Querverteilung.

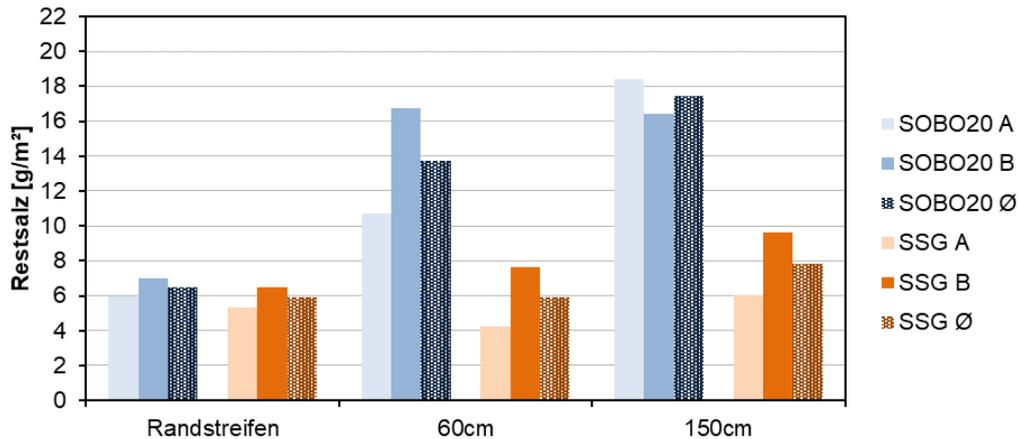


Abbildung 92: Restsalz in g/m² unmittelbar nach der Streufahrt

Abbildung 93 zeigt die Restsalzmessungen 60 Minuten nach Streufahrt. Genau wie bei der vorherigen Messung detektiert das SOBO 20 deutlich mehr Restsalz als das SSG, wobei auch hier die Unterschiede im Bereich des Randstreifens mit 15 % relativ gering sind. Innerhalb des Fahrstreifens ist die Differenz mit 60 bis 70 % Unterschreitung des SOBO 20 Wertes äußerst eklatant. Zumindest wurde die Querverteilung qualitativ bei beiden richtig erkannt.

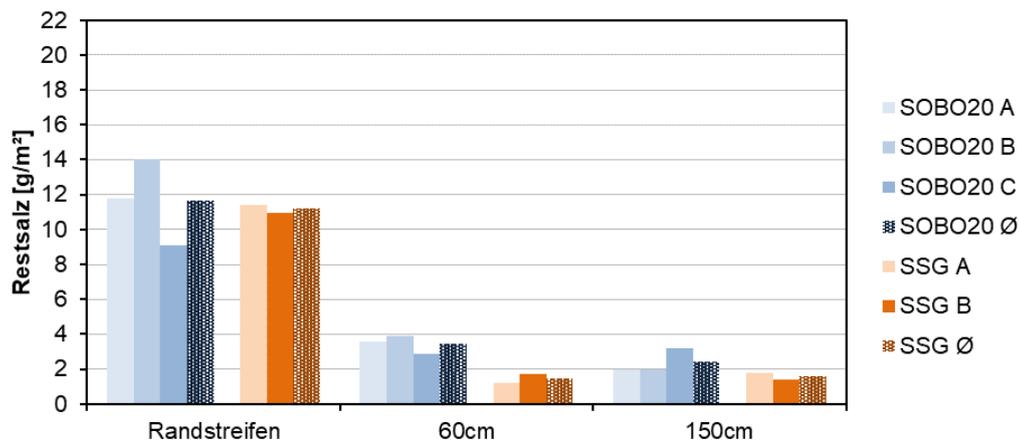


Abbildung 93: Restsalz in g/m² 60 Minuten nach der Streufahrt

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Geräte gleichen Typs annähernd gleiche Ergebnisse liefern, jedoch im Vergleich der verschiedenen Hersteller zueinander stark divergieren. Wie in den Laboruntersuchungen bereits überprüft, liefert das SOBO 20 bei Trockenstreuung FS0 mit 20 g/m² als Messergebnis im Mittel 10 g/m², bei FS100 mit 20 g/m² detektiert es ungefähr 18 g/m² Restsalz. Die hier durchgeführte FS30 Streuung mit 20 g/m² lässt ein Messergebnis des SOBO 20 zwischen 10 und 18 g/m² erwarten – dies wird durch die Messung unmittelbar nach der Streufahrt in Abbildung 92 bestätigt. Daher liegt die Vermutung nahe, dass das SOBO 20 in dieser Messung Werte detektiert hat, die eher den tatsächlichen Verhältnissen vor Ort entsprochen haben, allerdings könnten die schlechten Randbedingungen Probleme beim SSG verursacht haben.

Daher sind weitere Versuche unter Laborbedingungen anzusetzen, um eine qualifizierte Aussage über den Vergleich beider Restsalzmessgeräte geben zu können.

7.7 Zusammenfassung des Kapitels

Die Eignung des Restsalzgerätes SOBO 20 der Firma Boschung konnte nur unter bestimmten Bedingungen bestätigt werden. Ein Messergebnis bei NaCl-Sole (FS100 bei einer Streuung von 10 bis 40 g/m²) kann nur mit einer maximalen relativen Unterschreitung des Sollwerts von 2 bis 7 % bei glatten und 8 bis 18 % bei rauen Oberflächen erreicht werden. Bei Trockensalzstreuung (FS0 von 10 bis 40 g/m²) werden bei Siedesalz je nach Oberfläche und Streumenge zwischen 35 und 65 %, bei Steinsalz bis zu 80 % weniger Salz detektiert. Somit lässt sich beim SOBO 20 ein systematischer Messfehler bei Trockensalzstreuung erkennen. Rekristallisierte Sole kann durch vorheriges Besprühen mittels Messflüssigkeit (15 % Aceton und 85 % entmineralisiertes Wasser) besser detektiert werden und so eine maximale relative Unterschätzung zur ausgebrachten Salzmenge von nur mehr 30 % erreicht werden.

Die flächenhafte Restsalzverteilung wurde an einer FS30 Streufahrt untersucht und der Verdacht, dass Randbedingungen wie Wind und Witterungsverhältnisse noch vor Verkehrseinfluss enorm große Auswirkungen auf die Restsalzmenge haben, hat sich genauso bestätigt wie die verteilende Wirkung des Verkehrs, welche auch lange nach der Streufahrt noch anhält.

Weitere Feldprüfungen zur Restsalzabnahme der unterschiedlichen Ausbringungsarten von Feuchtsalz FS30, FS50 und FS70 bis reine Sole FS100 zeigten vor allem den Einfluss der Feuchtigkeit der Fahrbahnoberfläche. Je trockener die Streuart, desto geringer waren der Restsalzgehalt und die Liegedauer.

Die Vergleichbarkeit zwischen der Anzeige der Glättemeldeanlagen (GMA) und den Messungen vor Ort konnte nicht wie erwartet hergestellt werden, da die in Wien überprüften GMA nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen und somit keinen Aufschluss über die vorhandene Salzmenge liefern konnten. Beim Vergleich der restlichen Sensordaten wurde festgestellt, dass die Oberflächentemperatur von der GMA deutlich höher eingeschätzt wird als vor Ort gemessen. Dies könnte im Hinblick auf die Beurteilung der Glatteisgefahr zu Problemen führen und sollte zur Abklärung weiter untersucht werden.

Außerdem wurde ein Vergleich zwischen dem in Österreich häufig eingesetzten Restsalzmessgerät SOBO 20 der Firma Boschung und dem von der deutschen Bundesanstalt für Straßenwesen propagiertem Spül-Saug-Gerät (SSG) der Firma ESG durchgeführt. Dabei zeigte sich zumindest eine geringe Abweichung zwischen den einzelnen SOBO 20 und den einzelnen SSG, jedoch eklatante Messunterschiede von bis zu 70 % zwischen den beiden Systemen. Vermutlich sind die Messungen des SOBO 20 zuverlässiger, um Gewissheit zu schaffen werden allerdings zusätzliche Laborversuche vorgeschlagen.

8 Zusammenfassung

In den Untersuchungen zur Tauleistung konnte bestätigt werden, dass wie erwartet die Tauleistung von reiner Sole FS100 über FS70, FS50, FS30 bis hin zu Trockensalz FS0 sukzessive aufgrund des höheren Salzanteiles der ausgebrachten Streumenge bei gleicher Einwirkdauer anstieg. Somit lässt sich die **Tauleistung der Feuchtsalze gut zwischen** der Tauleistung von **festen** (FS0) und **flüssigen** (FS100) **Taumitteln einordnen**.

Bei der Ermittlung der **Geschwindigkeit der Eisbildung** unter realen winterlichen Temperaturen **mit und ohne Präventivmaßnahmen** wurde festgestellt, dass die Versuche teilweise großen zeitlichen Schwankungen bei Wiederholungsprüfungen unterliegen, da der Zeitpunkt der **Eisbildung** vor allem bei Temperaturen bis -6 °C sehr empfindlich ist und stark von **kleinen Verunreinigungen** (Kristallisationskeimen) **abhängt**. Der **Beginn** der Eisbildung wird mit **zunehmender Filmdicke und Solekonzentration verzögert** und die gesamte Eisbildungsdauer nimmt erkennbar zu. Die Zeitdifferenzen zu reinem Wasser bei Temperaturen bis -6 °C können mit ca. 15 bis 60 Minuten abgeschätzt werden. Bei tieferen Temperaturen bis -11 °C sind kaum mehr Unterschiede beim Beginn der Eisbildung vorhanden und am Ende der Eisbildung betragen diese weniger als 15 Minuten. Praktisch bedeutet dies, dass die **Verzögerung des Gefriervorganges** durch **übliche Restsalzmengen** bezogen auf **übliche Streu-umlaufzeiten** unter der Winterdienstkategorie von Autobahnen und Schnellstraßen (max. 3 Stunden Umlaufzeit) **begrenzt** ist.

Untersuchungen zur **Auswirkung** unterschiedlicher **Feuchtegehalte** und **Antibackmittel** auf die **Rieselfähigkeit** haben die Versuchsmethode mit der Auslaufbox nach Sonntag bestätigt. Die Prüfergebnisse, ausgedrückt durch die **Auslaufrate** und den **inneren Reibungswinkel**, zeigen **deutliche Unterschiede** bezüglich des Antibackmittel- und Feuchtigkeitsgehaltes. Dabei hat sich für eine ausreichende Rieselfähigkeit ein **unterer Grenzwert von 20 mg Antibackmittel pro kg Siedesalz** als geeignet erwiesen, wobei eine **Erhöhung** auf 80 mg pro kg **kaum** eine **Verbesserung** bewirkt. Siedesalz mit einer geprüften **biologischen Alternative** zu Natriumferrocyanid weist selbst bei geringen Feuchtigkeitsgehalten dieselben Ergebnisse wie Siedesalz ohne Antibackmittel auf und ist somit zur **Verbesserung der Rieselfähigkeit ungeeignet**. Für Steinsalz lag hingegen nur ein Antibackmittelgehalt zur Prüfung vor, daher kann ein **Grenzwert** zur Eignung der Rieselfähigkeit nur grob mit **130 mg pro kg Steinsalz mit einer Korngröße von 0/3 mm** bzw. mit **180 mg pro kg Steinsalz mit einer Korngröße von 0/2 mm** abgeschätzt werden. Bezüglich des **Einflusses von Antibackmitteln auf die Tauleistung** der Salze konnten **weder** für Trockensalz **FS0** noch für reine Sole **FS100** **nachteilige Einwirkungen** festgestellt werden.

Die **Eignung des Restsalzmessgerätes SOBO 20** der Firma Boschung konnte **nur** unter **bestimmten Bedingungen** bestätigt werden. Ein Messergebnis von NaCl-Sole (**FS100** bei einer Streuung von 10 bis 40 g/m^2) kann nur mit einer maximalen relativen **Unterschreitung des Sollwerts von 2 bis 7 % bei glatten** und **8 bis 18 % bei rauen Oberflächen** erreicht werden. Bei Trockensalzstreuung (**FS0** von 10 bis 40 g/m^2) werden bei Siedesalz je nach Oberfläche und Streumenge **zwischen 35 und 65 %, bei Steinsalz bis zu 80 % weniger Salz detektiert**.

Rekristallisierte Sole kann durch vorheriges Besprühen mittels Messflüssigkeit (15 % Aceton und 85 % entmineralisiertes Wasser) besser detektiert werden und so eine maximale relative Unterschätzung zur ausgebrachten Salzmenge von nur mehr 30 % erreicht werden.

Die **flächenhafte Restsalzverteilung** wurde an einer **FS30** Streufahrt untersucht und der Verdacht, dass Randbedingungen wie **Wind** und **Witterungsverhältnisse** noch vor Verkehrseinfluss enorm **große Auswirkungen** auf die **Restsalzmenge** haben, hat sich genauso bestätigt wie die **verteilende Wirkung des Verkehrs**, welche auch lange nach der Streufahrt noch anhält.

Weitere Feldprüfungen zur **Restsalzabnahme** der unterschiedlichen Ausbringungsarten von Feuchtsalz **FS30, FS50 und FS70 bis reine Sole FS100** zeigen vor allem den **Einfluss der Feuchtigkeit der Fahrbahnoberfläche**. Je **trockener die Streuart**, desto **geringer** sind der **Restsalzgehalt** und die **Liegedauer**.

Die **Vergleichbarkeit** zwischen der Anzeige der **Glättemeldeanlagen (GMA)** und den **Messungen vor Ort** konnte **nicht wie erwartet** hergestellt werden, da die in Wien überprüften GMA **nicht mehr dem Stand der Technik** entsprechen und somit **keinen Aufschluss über die vorhandene Salzmenge** liefern konnten. Beim Vergleich der restlichen Sensordaten wurde festgestellt, dass **die Oberflächentemperatur von der GMA deutlich höher** eingeschätzt wird **als vor Ort** gemessen. Dies könnte im Hinblick auf die Beurteilung der Glatteisgefahr zu Problemen führen und sollte zur Abklärung weiter untersucht werden.

Außerdem wurde ein **Vergleich** zwischen dem in Österreich häufig eingesetzten **Restsalzmessgerät SOBO 20 der Firma Boschung** und dem von der **deutschen Bundesanstalt für Straßenwesen** propagiertem **Spül-Saug-Gerät (SSG) der Firma ESG** angestrebt. Dabei zeigt sich eine geringe Abweichung zwischen den einzelnen SOBO 20 (3 Stk.) und den einzelnen SSG (2 Stk.), jedoch **eklatante Messunterschiede von bis zu 70 %** zwischen den beiden Systemen. Vermutlich sind die Messungen des SOBO 20 zuverlässiger, um Gewissheit zu schaffen werden allerdings zusätzlich Laborversuche vorgeschlagen.

9 Anhang

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Tauleistung feste Taumittel [2]	4
Abbildung 2: Tauleistung flüssige Taumittel [2]	4
Abbildung 3: Methodik zur Bestimmung der Tauleistung flüssiger Taumittel [14]	5
Abbildung 4: Vergleich Tauleistung Fest – Feuchtsalz – Flüssig nach 5, 30 und 240 Minuten [8]	7
Abbildung 5: Gefrierpunktkurven für Natriumchlorid und Calciumchlorid [1]	8
Abbildung 6: Versuchslayout Eisbildung dünne Wasser- bzw. Solefilme in Plexiglasschale [14]	9
Abbildung 7: Gefrierpunktermittlung und Gefrierphasen [9]	10
Abbildung 8: Gefrierkurve für NaCl und Probekörperzustand nach Gefriervorgang [8]	12
Abbildung 9: Charakteristische Konsistenz der Proben nach dem Gefriervorgang [8]	13
Abbildung 10: Gefrierverlauf dest. Wasser bei -3,7 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [8]	14
Abbildung 11: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -3,7 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]	14
Abbildung 12: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -3,7 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]	14
Abbildung 13: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -3,7 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]	15
Abbildung 14: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -3,7 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [8]	15
Abbildung 15: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -3,7 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [8]	15
Abbildung 16: Konzentrations- und Gefrierpunktverlauf während des Tauvorganges [16]	17
Abbildung 17: Auswertung der Tauleistungsversuche NaCl (FS0) nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [10]	18
Abbildung 18: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [10]	18
Abbildung 19: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -5,0 °C [10]	19
Abbildung 20: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -7,5 °C [10]	19
Abbildung 21: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -10,0 °C [10]	19
Abbildung 22: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [10]	20
Abbildung 23: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -5,0 °C [10]	20
Abbildung 24: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -7,5 °C [10]	21
Abbildung 25: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -10,0 °C [10]	21
Abbildung 26: Schematische Darstellung der Phasen des Gefriervorganges zusammen mit der Entwicklung der Griffbarkeit [16]	22
Abbildung 27: Sieblinien Stein- und Siedesalz je mit und ohne Antitackmittel	25
Abbildung 28: Anforderungen an Sieblinie nach ÖN 16811-1 [12]	25
Abbildung 29: Korrelation der Auslaufrate und des inneren Reibungswinkels	27

Abbildung 30: Zusammenhang der Auslaufrate und des inneren Reibungswinkels in Abhängigkeit des Antibackmittels und der Feuchtigkeit	28
Abbildung 31: Verhalten des Streusalzes VS6-12-Bio	28
Abbildung 32: Relative Auslaufrate von Steinsalz bezogen auf vollkommene Trockenheit	29
Abbildung 33: Auslaufraten in Abhängigkeit des Taumittels und der Feuchtigkeit	30
Abbildung 34: Innerer Reibungswinkel in Abhängigkeit des Taumittels und der Feuchtigkeit	30
Abbildung 35: Optimum des Antibackmittelgehaltes für Steinsalze [11]	31
Abbildung 36: Optimum des Antibackmittelgehaltes für Siedesalze [11]	31
Abbildung 37: Tauleistung Steinsalz FS0 und FS100 mit und ohne Antibackmittel	32
Abbildung 38: Tauleistung Siedesalz FS0 und FS100 mit/ohne Antibackmittel	33
Abbildung 39: Taurate FS0 mit und ohne Antibackmittel für 60 und 240 Minuten	33
Abbildung 40: Taurate FS100 mit/ohne Antibackmittel für 60 und 240 Minuten	34
Abbildung 41: Tauleistung Steinsalz auf tatsächlichen Salzgehalt rückgerechnet	34
Abbildung 42: Tauleistung Siedesalz auf tatsächlichen Salzgehalt rückgerechnet	35
Abbildung 43: Meistereien und Pflüge je Bundesland	37
Abbildung 44: Pflug- und Räumleistenhersteller	37
Abbildung 45: prozentuelle Aufteilung der Pflugerhersteller je Bundesland	38
Abbildung 46: prozentueller Anteil an bestimmter Zusatzausrüstung	38
Abbildung 47: Aufteilung des Pflugalters	39
Abbildung 48: Räumleistenverbrauch und. Tauschintervall	39
Abbildung 49: v.l.n.r. Flötzingler DKV-A und Springer SHL 3204 mit Nachräumklavier	40
Abbildung 50: Küper Kombi S50 Wave Räumleiste und Nachräumleiste	41
Abbildung 51: Methodik zur Beurteilung der Räumqualität	42
Abbildung 52: Vorversuch Schneeaufnahme: a) unberührt; b) geräumt; c) gesaugt; d) verstopft	43
Abbildung 53: Vorversuch Schneeaufnahme: a) unberührt; b) geräumt; c) manuell gekehrt; d) Restschnee	44
Abbildung 54: Vorversuch Schneeaufnahme am Mistplatz Wien-Auhof - Flötzingler DK-V	45
Abbildung 55: Vorversuch Schneeaufnahme am Mistplatz Wien-Auhof – Springer SHL 3204	45
Abbildung 56: Vorversuch Schneeaufnahme mit Schwammfix von Pergo Tools	46
Abbildung 57: Feldversuch Verschleiß der Räumleisten	46
Abbildung 58: Prototyp zur Beurteilung des Räumleistenverschleißes	47
Abbildung 59: SOBO20 Restsalzmessgerät	50
Abbildung 60: Restsalzmessungen im Labor (FS100)	51
Abbildung 61: Restsalzmessungen im Labor FS100: oben Petrischale; unten Bohrkern	53
Abbildung 62: Restsalzmessungen im Labor FS0: oben Petrischale Siedesalz; mittig Bohrkern Siedesalz; unten Petrischale Steinsalz	54
Abbildung 63: FS100 aufgetrocknet (5 Tage)	55
Abbildung 64: FS100 oben aufgetrocknet; unten aufgetrocknet und vor Messung befeuchtet	56
Abbildung 65: Karte der gemessenen GMA in Wien [17]	57
Abbildung 66: Bodensensoren eingebaut	57

Abbildung 67: Symbolfoto Bodensonden [15]	58
Abbildung 68: SOBO20 Messpunkte	58
Abbildung 69: Kaltenleutgebner Straße Örtlichkeit und Bodensensoren	59
Abbildung 70: Wärmebild Kaltenleutgebner Straße Vormittag links und Nachmittag rechts	60
Abbildung 71: Höhestraße Örtlichkeit und Bodensensoren	60
Abbildung 72: Wärmebild Höhensstraße Vormittag links und Nachmittag rechts	61
Abbildung 73: Brünner Straße - Örtlichkeit und Bodensensoren	62
Abbildung 74: Wärmebild Brünner Straße Vormittag links und Nachmittag rechts	63
Abbildung 75: Seyringer Straße - Örtlichkeit und Bodensensoren	64
Abbildung 76: Wärmebild Seyringer Straße Vormittag links und Nachmittag rechts	65
Abbildung 77: Restsalzgehalt unmittelbar nach Streuung FS30 10 g/m ²	66
Abbildung 78: Restsalzgehalt 30 Minuten nach Streuung FS30 10 g/m ²	66
Abbildung 79: Restsalzgehalt 60 Minuten nach Streuung FS30 10 g/m ²	67
Abbildung 80: Restsalzgehalt 120 Minuten nach Streuung FS30 10 g/m ²	67
Abbildung 81: Restsalzgehalt unmittelbar nach Streuung FS30 15 g/m ²	68
Abbildung 82: Restsalzgehalt 30 Minuten nach Streuung FS30 15 g/m ²	68
Abbildung 83: Restsalzgehalt 60 Minuten nach Streuung FS30 15 g/m ²	69
Abbildung 84: Restsalzgehalt 120 Minuten nach Streuung FS30 15 g/m ²	69
Abbildung 85: Restsalz in g/m ² FS30 und FS50	70
Abbildung 86: Restsalz in % vom Sollwert - FS30 und FS50	71
Abbildung 87: Restsalz in g/m ² FS70 und FS100	72
Abbildung 88: Restsalz in % vom Sollwert – FS70 und FS100	73
Abbildung 89: Restsalzmessgerät Spül-Saug-Gerät der Firma ESG [18]	73
Abbildung 90: Prüfmethdik für Vergleich SOBO 20 mit SSG [18]	74
Abbildung 91: Restsalz in g/m ² vor der Streufahrt	74
Abbildung 92: Restsalz in g/m ² unmittelbar nach der Streufahrt	75
Abbildung 93: Restsalz in g/m ² 60 Minuten nach der Streufahrt	75
Abbildung 94: Gefrierverlauf reines Wasser bei -6,2 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [8]	86
Abbildung 95: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]	86
Abbildung 96: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]	86
Abbildung 97: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]	87
Abbildung 98: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [8]	87
Abbildung 99: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [8]	87
Abbildung 100: Gefrierverlauf reines Wasser bei -8,6 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [8]	88
Abbildung 101: Gefrierverlauf 0,5 mm und 2 mm bei -8,6 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]	88
Abbildung 102: Gefrierverlauf reines Wasser bei -11,1 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [8]	88
Abbildung 103: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]	89
Abbildung 104: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]	89

Abbildung 105: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei $-11,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8] 89

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prüfprogramm Tauleistung Feuchtsalz	6
Tabelle 2: Prüfergebnisse Tauleistung Feuchtsalz	6
Tabelle 3: Prüfprogramm Eisbildungsdauer	10
Tabelle 4: Unterschied eingestellter zu gemessener Temperatur des Klimaschranks	12
Tabelle 5: Verfügbare Auftausalze und Antibackmittel sowie -gehalte für Österreich	24
Tabelle 6: Prüfprogramm Rieselfähigkeit	26
Tabelle 7: Prüfprogramm Tauleistung mit und ohne Antibackmittel	26
Tabelle 8: Auslaufrate bezogen auf den prozentualen Auslauf vollkommener Trockenheit	29
Tabelle 9: Auswahl Pflüge für Feldversuche [technische Details lt. Herstellerdatenblätter]	40
Tabelle 10: Auswahl Räumleisten für Feldversuche	40
Tabelle 11: Einzuhaltende Werte der Überprüfung der SOBO 20 Elektroneinheit	50
Tabelle 12: Für SOBO 20 aufgebrachte Salz- bzw. Solemenge in mg	52
Tabelle 13: Messorte	57
Tabelle 14: Kaltenleutgebner Straße – Messung I bis III	59
Tabelle 15: Kaltenleutgebner Straße - Restsalzmengen I bis III	60
Tabelle 16: Höhenstraße – Messung I bis III	61
Tabelle 17: Höhenstraße - Restsalzmengen I bis III	62
Tabelle 18: Brünner Straße – Messung I bis III	62
Tabelle 19: Brünner Straße – Restsalzmengen I bis III	63
Tabelle 20: Seyringer Straße – Messung I bis III	64
Tabelle 21: Seyringer Straße – Restsalzmengen I bis III	65

9.3 Literaturverzeichnis

- [1] M. Hoffmann, R. Blab, P. Nutz: „Forschungsbericht Optimierung der Feuchtsalzstreuung“; Bericht für Bundesländer, ASFINAG, BMVIT, 2011.
- [2] B. Hofko, D. Steiner, M. Hoffmann: „Eignungskriterien für auftauende Streumittel“; Berichts-Nr. 045, 2015.
- [3] Österreichische Forschungsgesellschaft für Schiene - Straße – Verkehr (FSV): Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau - RVS 12.04.12 Qualitätssicherung Betrieb – Winterdienst - Schneeräumung und Streuung“; Ausgabe 10/2010, 2010.
- [4] P. Nutz: „Entwicklung eines Straßenzustandsmodells beim Einsatz auftauender Streumittel beim Winterdienst“; BetreuerInnen, BegutachterInnen: R. Blab, M. Mailer; Institut für Verkehrswissenschaften FB Straßenwesen, 2015.
- [5] R. Zulauf: „Über das Haftvermögen des Haftsatzes auf der Straßenoberfläche“; Straße und Autobahn, Heft 1/1969, Kirschbaum Verlag, Bonn (D), 1969.
- [6] B. Wehner: „Griffigkeitsmessungen auf winterglatten Fahrbahnoberflächen“; Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 40, Bad Godesberg (D), 1960.
- [7] Erkenntnis des Verwaltungsgerichtshofes (VwGH), Geschäftszahl 2010/10/0092, Entscheidungsdatum 14.07.2011, 2011.
- [8] M. Kotz: „Einfluss der Präventivstreuung auf die Eisbildung“, Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur – Institut für Verkehrswesen (Betreuer: R. Blab, W. Kluger-Eigl), Wien, 2017.
- [9] ASTM D1177-16; “Standard Test for Freezing Point of Aqueous Engine Coolants“; ASTM International, West Conshohocken (USA), 2007.
- [10] M. Hoffmann, W. Kluger-Eigl, B. Hofko, R. Blab: „Thawing Capacity, Freezing Time and High Shares of Brine as Main Factors in the Success of Preventive Winter Maintenance“; 15th International Winter Road Congress, Danzig (PL), 2018.
- [11] L. Enjuanes: „Effect of anti-caking agents on flowability of de-icing salts“; Masterarbeit an der Technischen Universität Wien – Institut für Verkehrswissenschaften (Betreuer: R. Blab, W. Kluger-Eigl), Wien, 2017.
- [12] Austrian Standards (AS); ÖNORM EN 16811-1: Winterdienstausrüstung – Enteisungsmittel – Teil 1: Natriumchlorid – Anforderungen und Prüfmethode, Wien, 2016.
- [13] W. Kluger-Eigl (Konzept), A. Haberl (Umsetzung): Umfrage zur Ausstattung von Schneepflügen in österreichischen Straßen- und Autobahnmeistereien, Institut für Verkehrswissenschaften (IVWS), Technische Universität Wien, 2017.
- [14] IVWS TU Wien: „Arbeitsanleitung Bestimmung des Eisbildungszeitpunktes in Abhängigkeit der Lösungskonzentration, Wasserfilmdicke und Lufttemperatur“; Arbeitsanweisung Labor des Instituts für Verkehrswissenschaften an der Technischen Universität Wien, 2017.
- [15] Internetquelle: Boschung AG (CH) – Glatteisfrühwarnsystem GFS3000 – Bodensensoren ARCTIS und BOSO II; <https://boschung.com/detail/50001-gfs-3000-glatteis-fruehwarnsysteme> ; überprüft am 23.09.2018.
- [16] P. Nutz, M. Hoffmann: Vorlesungsunterlagen der Lehrveranstaltung Straßenbetrieb an der Technischen Universität Wien, 2017.
- [17] Internetquelle: Stadt Wien – Karte von Wien; <https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/images/wienkarte.jpg> ; überprüft am 23.09.2018.
- [18] H. Badelt, P. Nutz: Fotoaufnahmen SOBO20 und SSG Vergleichsmessung, St. Johann, 2012.

9.4 Temperaturverläufe Eisbildung

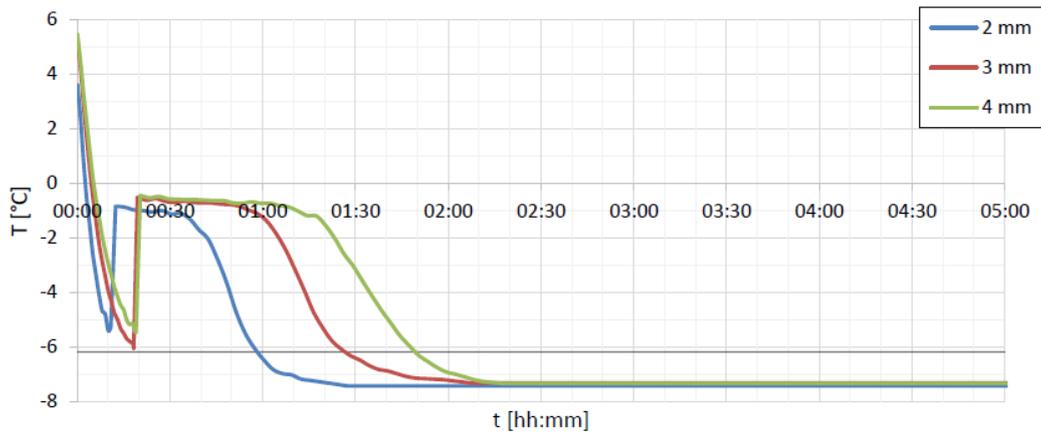


Abbildung 94: Gefrierverlauf reines Wasser bei -6,2 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [8]

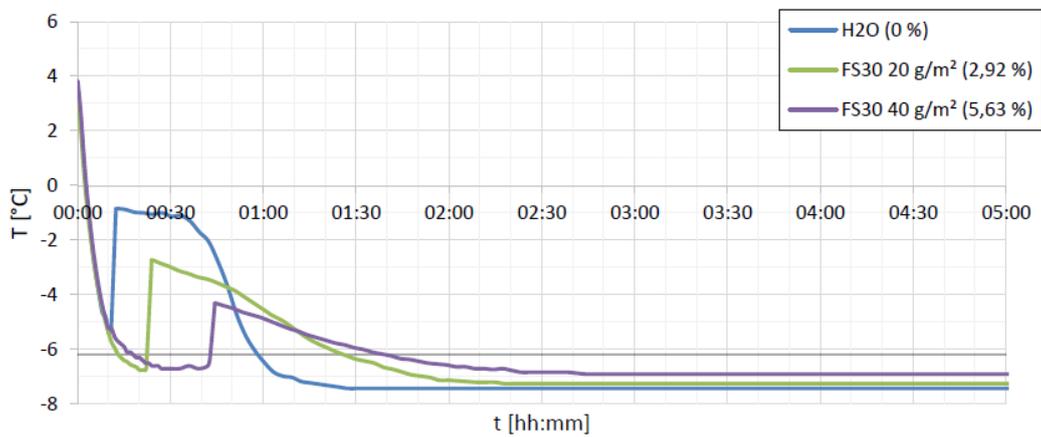


Abbildung 95: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]

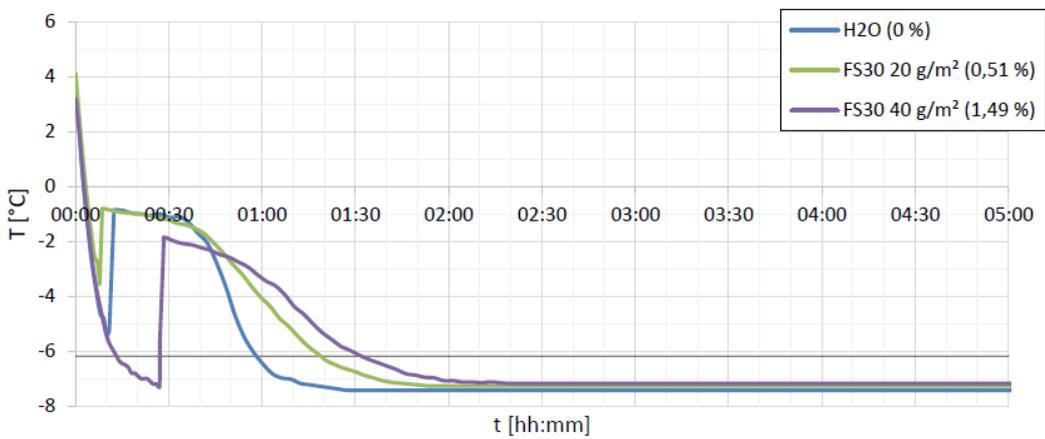


Abbildung 96: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]

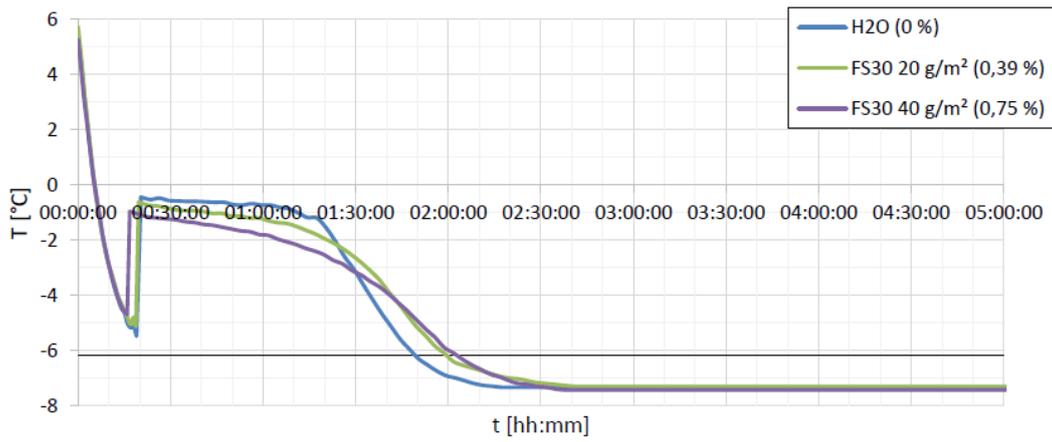


Abbildung 97: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]

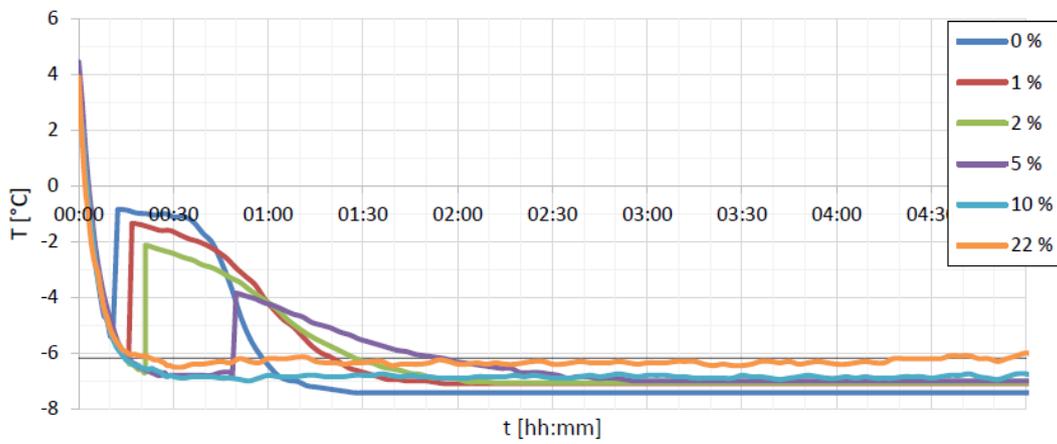


Abbildung 98: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [8]

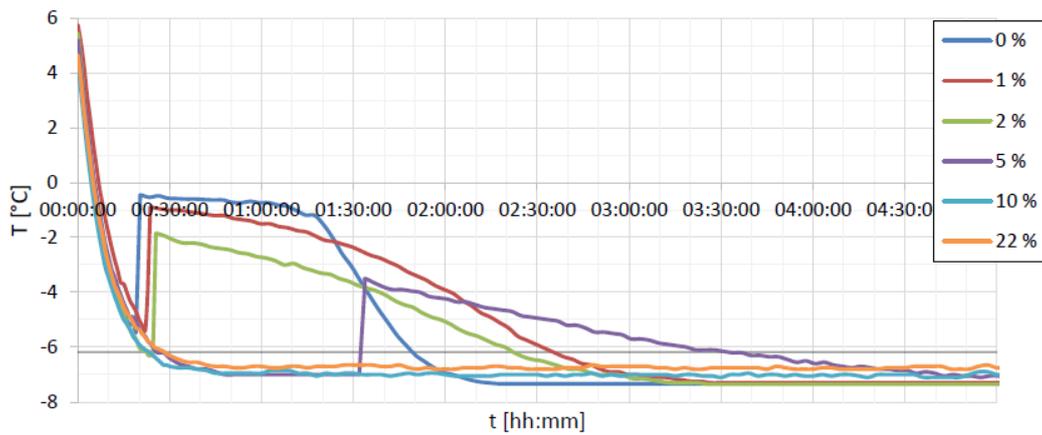


Abbildung 99: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [8]

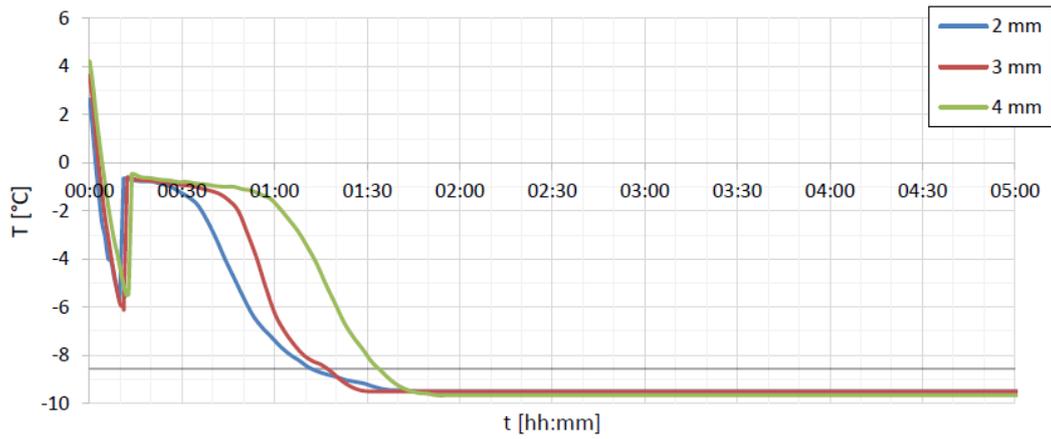


Abbildung 100: Gefrierverlauf reines Wasser bei -8,6 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [8]

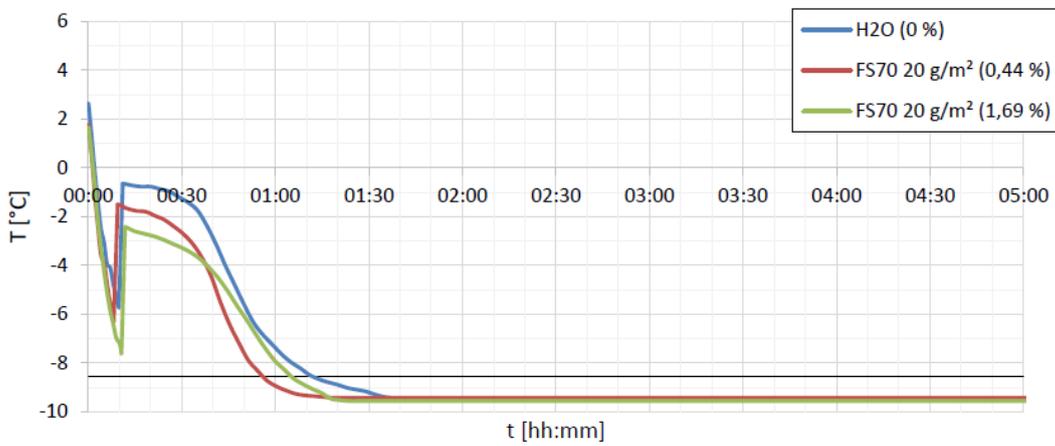


Abbildung 101: Gefrierverlauf 0,5 mm und 2 mm bei -8,6 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]

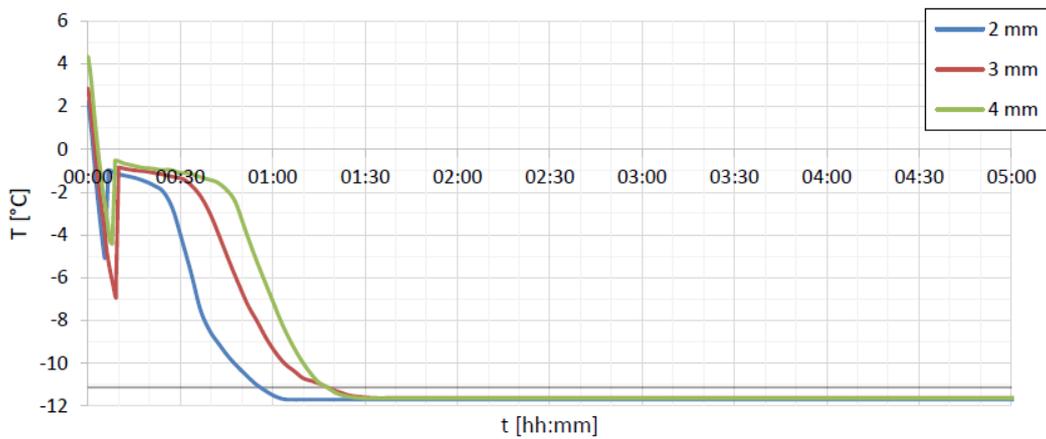


Abbildung 102: Gefrierverlauf reines Wasser bei -11,1 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [8]

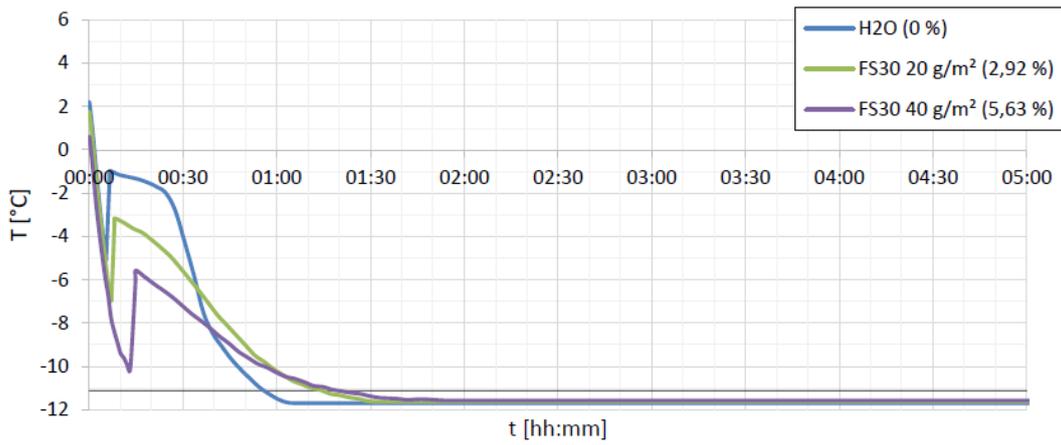


Abbildung 103: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]

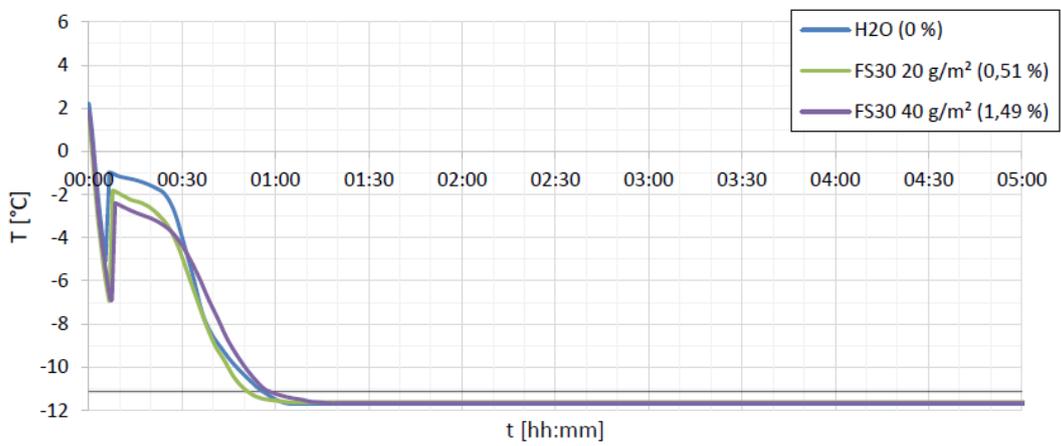


Abbildung 104: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]

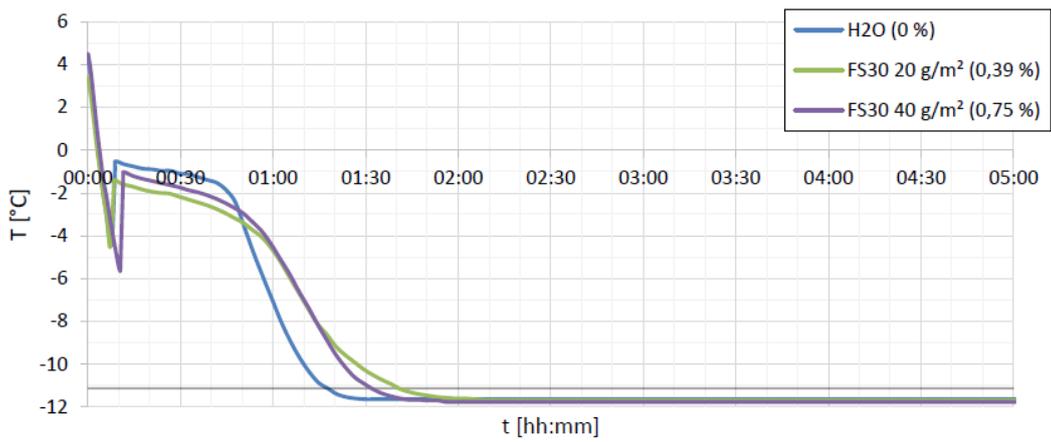


Abbildung 105: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [8]