



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

# Endbericht Forschungsprojekt

## Wirkmodell Streuung, Räumung und Restsalz

Projektnummer: 786704



Im Auftrag der österr. Bundesländer, ASFINAG und BMVIT

Wien, Dezember 2019

Dieser Projektbericht enthält 105 Seiten einschließlich Anhang.

Im Falle einer Vervielfältigung oder Veröffentlichung des gegenständlichen Projektberichts darf dessen Inhalt nur wort- und formgetreu und ohne Auslegung oder Zusatz wiedergegeben werden. Auszugsweise Vervielfältigung oder Veröffentlichung unter Berufung auf den Projektbericht bedarf der Genehmigung des Instituts für Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Wien und des Büro Hoffmann.

## **FORSCHUNGSPROJEKT WIRKMODELL STREUUNG, RÄUMUNG UND RESTSALZ**

Projektnummer: 786704

Innenauftragsnummer: D230030-5001

### **AUFTRAGGEBER**

**Bundesländer, ASFINAG, BMVIT**

vertreten durch Dipl.-Ing. Josef Neuhold



### **PROJEKTTEAM**

**Technische Universität Wien, Institut für Verkehrswissenschaften  
Forschungsbereich Straßenwesen (IVWS)**

Dipl.-Ing. Michael Ronald Gruber  
Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Hofko

Dipl.-Ing. Dr.techn. Wolfgang Kluger-Eigl  
Alexander Haberl, BSc  
David Valentin

**Technisches Büro Hoffmann**

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Hoffmann

#### **Impressum:**



Institut für Verkehrswissenschaften  
Forschungsbereich Straßenwesen

Gußhausstraße 28/230-3  
A-1040 Wien  
[www.ivws.tuwien.ac.at](http://www.ivws.tuwien.ac.at)

DVR: 0005886

**bi.ivws**

## Vorwort

Dieses österreichweite Winterdienst-Forschungsprojekt schließt an zwei äußerst erfolgreiche Forschungsprojekte an. So wurde im Jahre 2011 das damals erste österreichische Winterdienst-Forschungsprojekt „Optimierung der Feuchtsalzstreuung“ veröffentlicht und erlangte sofort, sowohl national als auch international, große Beachtung und Anerkennung. Aber was ganz wesentlich war, es leitete einen echten Wandel in der Winterdiensttechnik mit auftauenden Streumitteln ein, denn es wurden erstmals „Streuungsgrundsätze für Standardsituationen“ als auch „Streumengenermittlungen in Abhängigkeit von Niederschlag, Fahrbahntemperatur und Verkehr“ angegeben.

Im Jahre 2016 wurde dann das nächste Winterdienst-Forschungsprojekt „Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Winterdienst“ veröffentlicht. Bei dieser Arbeit wurden objektive und nachvollziehbare Kriterien für die Prüfung, und in weiterer Folge für die Eignung verschiedener auftauender Streumittel in der Winterdienstpraxis, erarbeitet.

Mit dem nunmehrigen Forschungsprojekt „Wirkmodell Streuung, Räumung und Restsalz“ konnte ein weiterer Schritt in Richtung effizienter und umweltschonender Winterdienst erreicht werden. Es wurden nun die Tauleistungen von Feuchtsalz mit höheren Soleanteilen (FS50 und FS70) untersucht. Ebenso die Eisbildungsdauer im Zusammenhang mit der Wirkdauer der Präventivstreuung. Und ein weiterer erstmals in dieser Form untersuchter Aspekt des Winterdienstes ist die Qualität der Schneeräumung in Abhängigkeit von Schneepfluggtyp und Straßenzustand. Denn, geräumter Schnee muss nicht getaut werden, und dies reduziert die Menge der erforderlichen Streumittel.

Erfreulich ist, dass sich auch bei diesem dritten Winterdienst-Forschungsprojekt wiederum alle neun Bundesländer, die ASFINAG und das BMVIT beteiligten und dieses auch finanziert haben. Durchgeführt wurde das Projekt wiederum in bewährter Weise vom Institut für Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Wien. Mögen die gewonnenen Erkenntnisse wieder ein weiterer Beitrag für einen bestmöglichen und umweltschonenden Straßenwinterdienst sein.

**Hofrat Dipl.-Ing. Josef NEUHOLD**

Leiter des österr. Arbeitsausschuss  
Winterdienst des FSV

Amt der NÖ Landesregierung  
Abteilung Straßenbetrieb  
Leiter des Fachbereiches  
Winterdienst und  
Verkehrsmanagement

St.Pölten, Dezember 2019



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Problem- und Fragestellung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Projektkonzeption</b> .....	<b>3</b>
2.1	Projektziele .....	3
2.2	Projektorganisation .....	3
2.3	Projektstruktur.....	4
2.3.1	Projektphasen .....	4
2.3.2	Arbeitspakete .....	4
2.3.3	Meilensteine .....	4
2.4	Projektzeitplan .....	4
<b>3</b>	<b>Tauleistung Feuchtsalz</b> .....	<b>7</b>
3.1	Ausgangslage .....	7
3.2	Inhalt und Methodik.....	8
3.3	Prüfprogramm.....	9
3.4	Auswertung.....	10
3.4.1	Prüfergebnisse .....	10
3.5	Zusammenfassung .....	11
<b>4</b>	<b>Eisbildungsdauer</b> .....	<b>13</b>
4.1	Ausgangslage .....	13
4.2	Inhalt und Methodik.....	13
4.3	Prüfprogramm.....	14
4.4	Auswertung.....	15
4.4.1	Grundlagen.....	15
4.4.2	Prüfergebnisse .....	16
4.5	Zusammenfassung .....	21
<b>5</b>	<b>Tau- und Gefriermodell</b> .....	<b>22</b>
5.1	Taumodell .....	22
5.1.1	Grundlagen und methodische Überlegungen.....	22
5.1.2	Versuchsauswertung und Regressionsmodelle .....	22
5.1.3	Ergebnisse universelles Tauleistungsmodell .....	26
5.2	Gefriermodell .....	28
5.2.1	Grundlagen und methodische Überlegungen.....	28
5.2.2	Ergebnisse Gefriermodell .....	28
<b>6</b>	<b>Rieselfähigkeit</b> .....	<b>30</b>
6.1	Inhalt und Methodik.....	30
6.2	Auftausalze und Prüfprogramm.....	30

6.2.1	Materialauswahl.....	30
6.2.2	Sieblinienvergleich Steinsalz und Siedesalz .....	31
6.2.3	Prüfprogramm Rieselfähigkeit.....	32
6.2.4	Prüfprogramm Tauleistung mit und ohne Antibackmittel .....	33
6.3	Ergebnisse Rieselfähigkeit.....	33
6.4	Ergebnisse Tauleistung mit und ohne Antibackmittel .....	39
6.5	Zusammenfassung .....	43
<b>7</b>	<b>Räumqualität.....</b>	<b>44</b>
7.1	Inhalt und Methodik.....	44
7.2	Umfrage Schneepflüge und Räumleisten.....	44
7.2.1	Teilnehmer .....	45
7.2.2	Pflug- und Räumleistenhersteller .....	45
7.2.3	Sonstige Erkenntnisse .....	46
7.2.4	Auswahl Pflug- und Räumleisten für Feldversuche.....	48
7.3	Prüfprogramm Restschneemenge .....	50
7.3.1	Beschreibung Haupt- und Vorversuch .....	50
7.3.2	Erprobung der Methodik für den Hauptversuch mit Schnee.....	51
7.3.3	Vorversuche mit Schneersatzmaterial .....	55
7.3.4	Hauptversuche mit Ersatzmaterial .....	59
7.3.5	Neue Versuchskonzeption Restschneemengen .....	61
7.4	Prüfprogramm Räumleistenverschleiß .....	65
7.4.1	Lebensdauer Pflüge und Räumleisten (Befragung) .....	65
7.4.2	Beschreibung Hauptversuch.....	67
7.4.3	Hauptversuch .....	68
7.4.4	Ergebnisse Stahlleisten .....	69
7.4.5	Ergebnisse Kombineisten .....	70
7.4.6	Vergleich Stahl- und Kombineisten .....	71
7.4.7	Prototyp für Abriebversuche im Labor.....	73
<b>8</b>	<b>Restsalz.....</b>	<b>74</b>
8.1	Inhalt und Methodik.....	74
8.1.1	Laborprüfungen .....	74
8.1.2	Feldprüfungen .....	74
8.1.3	Ergebnisse .....	74
8.2	Überprüfung der Eignung des SOBO 20 Restsalzmessgerätes im Labor.....	74
8.2.1	Restsalzmessgerät SOBO 20 .....	74
8.2.2	Laborprüfung .....	76
8.2.3	Vergleichsmessung reine Sole (FS100).....	77
8.2.4	Vergleichsmessung Trockensalz (FS0) .....	78

---

8.2.5	Vergleichsmessung aufgetrocknete Sole (FS100 getrocknet).....	79
8.3	Restsalz auf der Fahrbahn.....	81
8.4	Zusammenfassung und Ausblick .....	84
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>86</b>
<b>10</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>88</b>
<b>11</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>90</b>
11.1	Abbildungsverzeichnis .....	90
11.2	Tabellenverzeichnis .....	94
11.3	Literaturverzeichnis.....	95
11.4	Temperaturverläufe Eisbildung .....	96

# 1 Problem- und Fragestellung

Das Forschungsprojekt baut insbesondere auf den Erkenntnissen der bereits abgeschlossenen Forschungsprojekte „Optimierung der Feuchtsalzstreuung“ [1] und „Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Winterdienst“ [2] auf. Weiters fließen sowohl praktische Erfahrungen der Fördergeber aus dem Winterdienst sowie Erkenntnisse aus laufenden Forschungsvorhaben zum Winterdienst in Österreich sowie der Literatur ein. In dem Forschungsvorhaben soll ausgehend von der bekannten **Tauleistung von festen und flüssigen Taumitteln die Tauleistung von Salz mit unterschiedlichem Anfeuchtungsgrad mittels standardisierter Laborverfahren untersucht werden**. Weiters soll die **Geschwindigkeit der Eisbildung bei Minusgraden mit und ohne Restsalz als Basis für die Optimierung von Eingriffszeitpunkt und Wirkdauer der Präventivstreuung untersucht werden**. Zudem soll auf dieser Basis zusammen mit der Entwicklung der Restsalzmengen der **Zeitpunkt der Glättebildung** in Abhängigkeit von Verkehr und Niederschlagsmenge abgeleitet werden.

Die Thematik des **Feuchtegehaltes** von Salz ist **aus Sicht der Lieferung, Lagerung, Ausbringung und Liegedauer** wesentlich. Während ein erhöhter Soleanteil vorteilhaft für ein gleichmäßiges Streubild und die Minimierung der Streuverluste ist, ist ein hoher Feuchtegehalt bzw. eine ungewollte Anfeuchtung für die Lagerung in Hallen und Salzsilos ungünstig. So kann ein Feuchtegehalt unter 1% bereits zu Klumpenbildung und beeinträchtigter Rieselfähigkeit führen und in weiterer Folge Verstopfungen in Salzsilos, eine erschwerte Aufbereitung wie auch eine erschwerte Beladung der Streufahrzeuge zur Folge haben. 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]. Zur Vermeidung von Ablagerungen und Erhöhung der Lagerfähigkeit werden in dem Forschungsprojekt **weitergehende Untersuchungen zu den Auswirkungen des Feuchtegehalts sowie von Antibackmitteln auf die Rieselfähigkeit** als sinnvoll angesehen. In weitergehenden Versuchen soll zudem die Frage geklärt werden, ob diese **Antibackmittel in Abhängigkeit von ihrer Dosierung einen Einfluss auf die Tauleistung haben**.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt des Winterdienstes ist die **Schneeräumung bzw. spezifischer das Räumbild und die Restschneemenge in Abhängigkeit von Pfluggtyp und Straßenzustand**. Da geräumter Schnee nicht getaut werden muss, ist ein gutes Räumbild für einen wirtschaftlichen Winterdienst von wesentlicher Bedeutung [3]. Die Kenntnis der Restschneemenge zusammen mit der Temperatur erlaubt zudem Rückschlüsse auf die zu streuende Salzmenge während und nach Niederschlagsereignissen. In dem Forschungsprojekt soll daher in einem ersten Schritt untersucht werden, wo und in welchem Ausmaß die unterschiedlichen Pflugsysteme (Einfach-, Doppelschild, Keil-, Seiten-, Elementpflug, einscharig/mehrscharig, mit/ohne Pflugentlastung, etc.) verwendet werden. Hersteller geben fallweise eine Räumleistung ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) 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 in Hinblick auf die Abnutzung und Lebensdauer der Schürfleisten sowie den Restschneemengen

unter vergleichbaren Bedingungen wenig belastbare Daten gibt, sind entsprechende Erhebungen und Versuche ebenfalls Teil des Forschungsprojektes.

Gemäß bisherigen Untersuchungen sind die Streu- und Austragungsverluste unmittelbar nach der Ausbringung von Auftausalzen besonders hoch, weshalb jede Verbesserung zur **Erhöhung der Restsalzmenge wesentliche Einsparung im Winterdienst bewirkt** [4,5,6]. 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. Derzeit stehen für Restsalzmessung verschiedene Geräte/Systeme zu Verfügung, aber es gibt nur sehr begrenzte Daten aus Vergleichsmessungen zwischen diesen. In Österreich wird am häufigsten das SOBO 20 Restsalzmessgerät der Firma Boschung eingesetzt (ca. 42 Stück). Allerdings ist nicht bekannt, ob das **SOBO 20 die Restsalzmenge von festen und flüssigen Taustoffen gleichwertig erfasst und wie hoch die jeweilige Messgenauigkeit** ist. Weiters besteht 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 im vorliegenden Forschungsvorhaben näher betrachtet werden soll.

## 2 Projektkonzeption

### 2.1 Projektziele

Mit dem gegenständlichen Forschungsprojekt „Wirkmodell Streuung, Räumung und Restsalz“ werden folgende Ziele angestrebt:

- Belastbare Bewertung der Tauleistung von Feuchtsalz im Vergleich zu festen und flüssigen Taumitteln.
- Ermittlung der Eisbildungsdauer unter realen Temperaturen mit und ohne Präventivstreuung.
- Einfluss von Antibackmitteln und Feuchte auf die Rieselfähigkeit.
- Einfluss von Antibackmitteln auf die Tauleistung.
- Nutzung der Pflugsysteme in Österreich und Vergleich von Räumbild und Restschnee
- Ermittlung der Abnutzung und Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Schürfleisten.
- Überprüfung der Eignung des SOBO 20 zur Restsalzmessung von festen und flüssigen Taumitteln.
- Ermittlung des zeitlichen Verlaufes der Restsalzmenge nach der Präventivstreuung.
- Vergleich der Messdaten stationärer Glättemeldeanlagen und mobiler SOBO 20 Restsalzmessgeräte.

### 2.2 Projektorganisation

In Abbildung 1 ist die Projektorganisation inkl. der beteiligten Personen dargestellt.

#### Projektorganisation

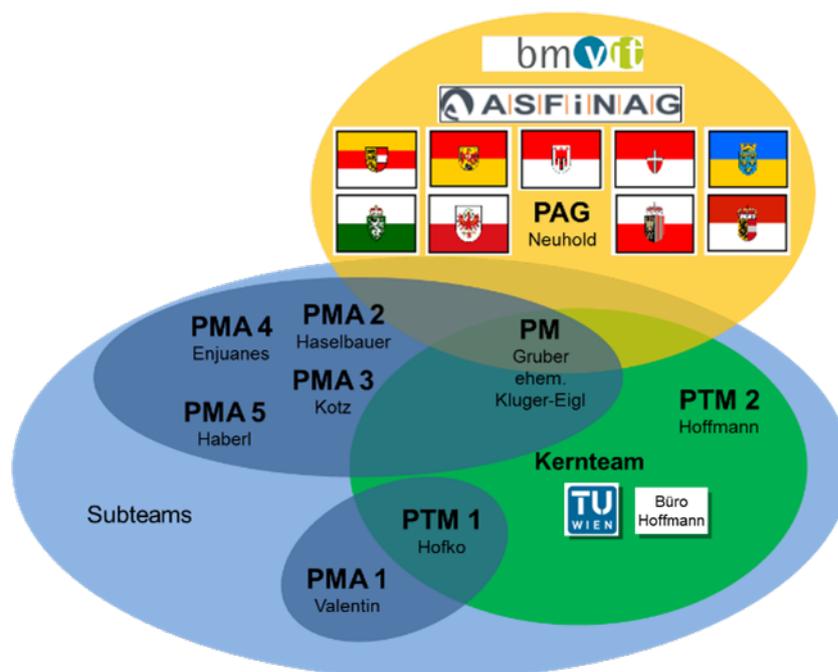


Abbildung 1: Projektorganisation und Beteiligte

## 2.3 Projektstruktur

### 2.3.1 Projektphasen

Das Forschungsprojekt „Wirkmodell Streuung, Räumung und Restsalz“ wurde in sechs Phasen gegliedert, die zeitlich und inhaltlich weitgehend unabhängig voneinander bearbeitet wurden. Die sich daraus ergebenden Erkenntnisse fließen jedoch in das ganzheitliches Wirkmodell „Winterdienst“ ein und werden in diesem Kontext interpretiert (siehe Tabelle 1).

**Tabelle 1: Phasen des Forschungsprojekts Wirkmodell Streuung, Räumung und Restsalz**

Projektphasen	
Phase 1	Projektmanagement
Phase 2	Tauleistung Feuchtsalz
Phase 3	Eisbildungsdauer
Phase 4	Rieselfähigkeit
Phase 5	Räumung
Phase 6	Restsalz

### 2.3.2 Arbeitspakete

Basierend auf den definierten Zielen und Phasen des Forschungsprojektes wurden die einzelnen Arbeitspakete, wie in Abbildung 2 dargestellt, festgelegt.

### 2.3.3 Meilensteine

Weiters wurden zu den definierten Projektzielen, Projektphasen und Arbeitspaketen folgende Meilensteine und Bearbeitungsabfolgen vereinbart (vgl. Abbildung 2):

- Projektstart
- Tau- und Gefriermodell
- Restschneemenge
- Restsalzmenge
- Projektabschluss

## 2.4 Projektzeitplan

Das ursprünglich auf zwei Jahre ausgelegte Forschungsprojekt startete offiziell am 1. April 2016 und als voraussichtliches Ende war der 31. März 2018 geplant. Aufgrund von personellen Veränderungen und ungünstigen Witterungsbedingungen im Winter 2017/2018 wurde das Forschungsprojekt in Abstimmung mit den Auftraggebern und Projektpartnern von der Technischen Universität Wien bis Juli 2019 verlängert.

Die Projektphasen „Tauleistung Feuchtsalz“ und „Eisbildungsdauer“ wurden nacheinander im 1. Forschungsjahr abgewickelt. Mit Beginn des 2. Forschungsjahres starteten die Projektphasen „Rieselfähigkeit“ und „Räumung“. Den Abschluss bilden die Feldversuche der Projektphasen „Räumung“ und „Restsalz“ im Winter 2018/19 am Ende des 3. Forschungsjahres sowie anschließender Auswertung. Der gesamte Projektlauf ist in Abbildung 3 dargestellt.

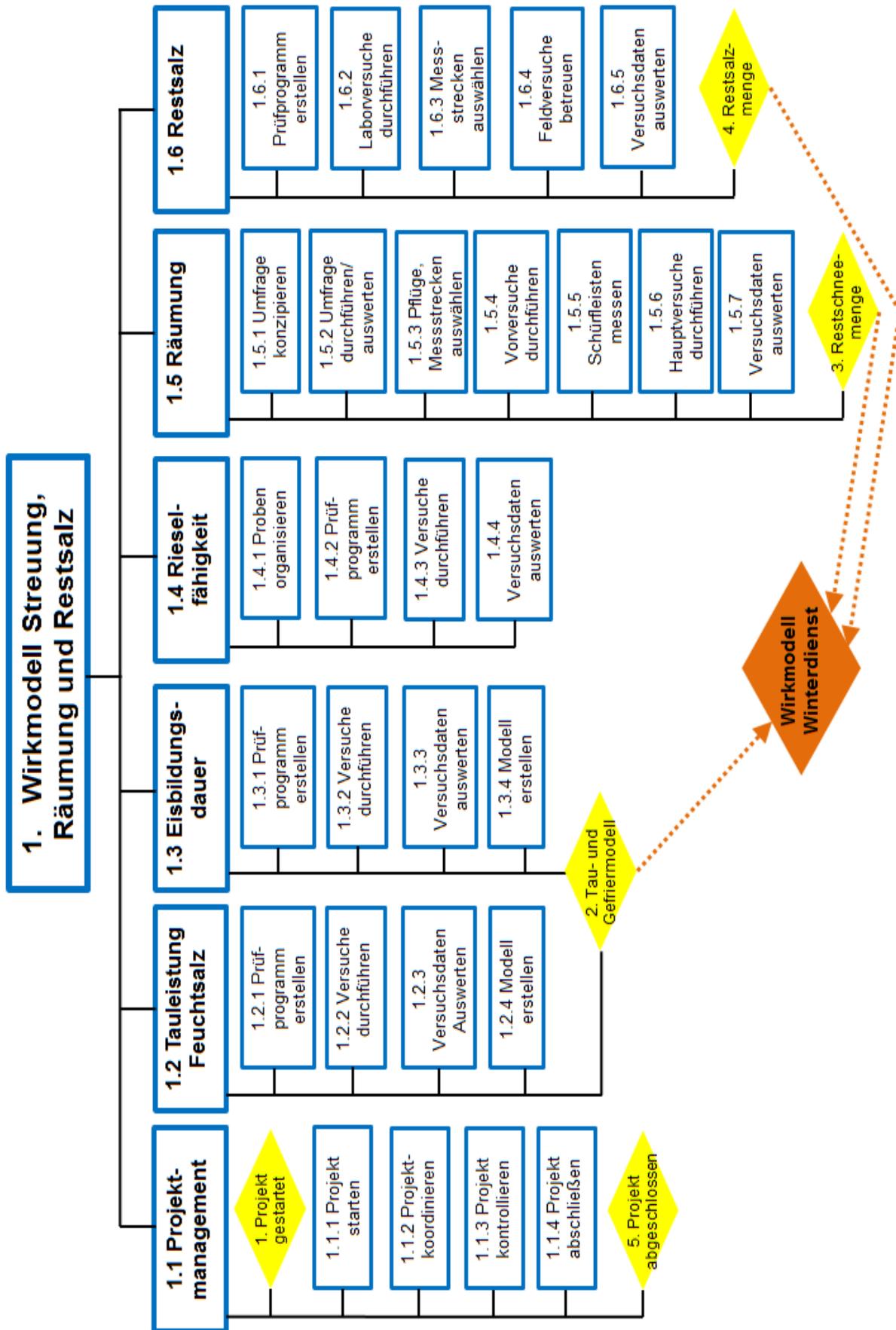


Abbildung 2: Projektstrukturplan – Phasen, Arbeitspakete und Meilensteine



## 3 Tauleistung Feuchtsalz

### 3.1 Ausgangslage

Im Forschungsprojekt „Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Winterdienst“ [2] wurde bereits die Tauleistung für feste und 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 4 ersichtlich, für flüssige Taumittel mit der Einheit Gramm aufgetautes Eis je Gramm aufgebrachter Sole in Abbildung 5.

Im Zuge des gegenständlichen Forschungsprojektes wurde die Tauleistung von typischen Feuchtsalzen ermittelt und den bereits vorliegenden Ergebnissen für feste (FS0) und flüssige (FS100) Taumittel gegenübergestellt.

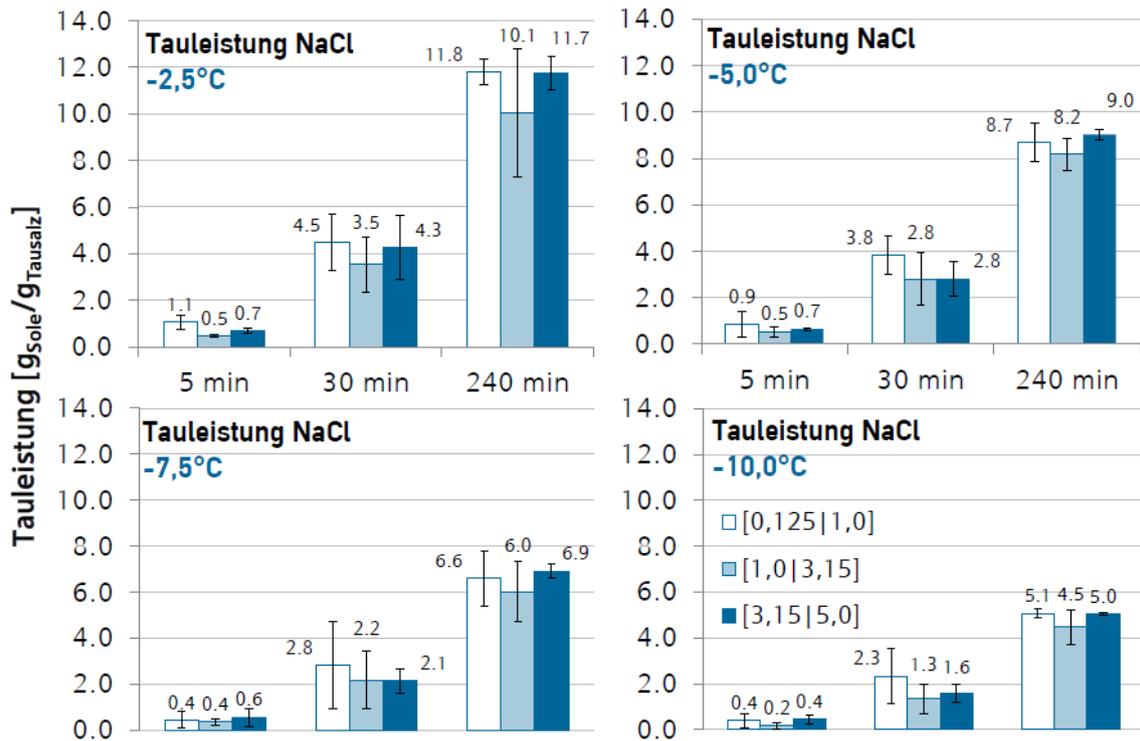


Abbildung 4: Tauleistung fester Taumittel [2]

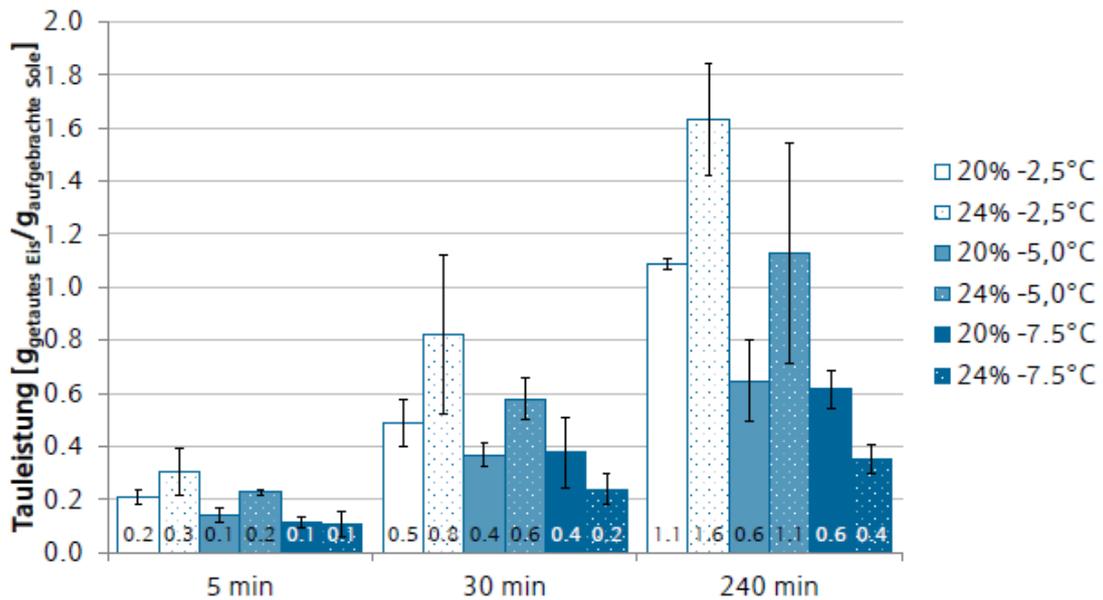


Abbildung 5: Tauleistung flüssiger Taumittel [2]

### 3.2 Inhalt und Methodik

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes 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 6) 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 Tauflüssigkeit wurde vorher abgossen) gewogen. Aus den gemessenen Massen wurde die Tauleistung gemäß den Formeln (1) und (2) bestimmt.

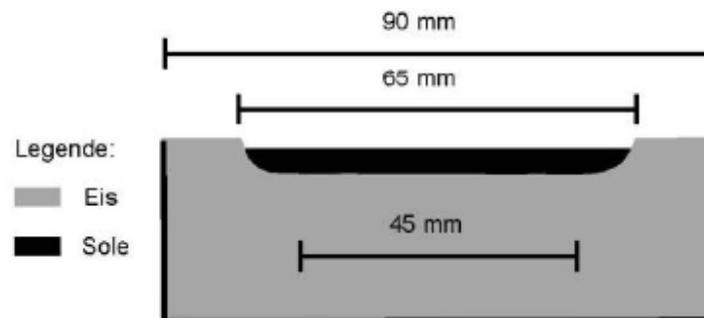


Abbildung 6: Methodik zur Bestimmung der Tauleistung flüssiger Taumittel

### 3.3 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 Einwirk-dauern (5, 30, 60 und 240 Minuten). Aus diesen 48 Kombinationen, welche mit 3-fach Bestim-mung durchgeführt wurden, ergaben sich in Summe 144 Einzelversuche. Die Tauleistung von trockenem Salz (FS0) und reiner Sole war bereits in vorhergehenden Versuchen bestimmt worden. Aufgrund der Anforderungen aus der Praxis wurden zusätzliche Ergänzungsprüfungen bei Lufttemperaturen von -1 °C, Einwirkdauern von 120 Minuten sowie Wiederholungsprüfungen zur Absicherung der Ergebnisse für ausgewählte Versuchsanordnungen durchge-führt. Im Gegensatz zur ursprünglichen Konzeption ergaben sich so insgesamt 56 verschie-dene Kombinationen und 186 Einzelprüfungen im Forschungsprojekt.

Das gesamte Prüfprogramm ist in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Salzlösungen wurden jeweils mit trockenem NaCl und einer 20%-NaCl-Sole im entsprechenden Gewichtsverhältnis 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 2: 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

## 3.4 Auswertung

### 3.4.1 Prüfergebnisse

In Tabelle 3 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, wobei die Schwankungsbreite zu berücksichtigen ist.

**Tabelle 3: Prüfergebnisse Tauleistung Feuchtsalz**

Lufttemp. [°C]		Tauleistung [g/g]														
		-1,0			-2,5			-5,0			-7,5			-10,0		
Einwirkdauer [min]	Feuchtsalz	FS30	FS50	FS70	FS30	FS50	FS70	FS30	FS50	FS70	FS30	FS50	FS70	FS30	FS50	FS70
		5	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
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 7 für die drei Einwirkdauern 5, 30 und 240 Minuten nochmals 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 sich die Tauleistung von FS30 und FS50 für alle Temperaturen nur geringfügig unterschied. 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. Wie noch später näher beschrieben sind diese Unterschiede in der Tauleistung im Wesentlichen auf die unterschiedliche Salzmenge im Streumittel bzw. die sich daraus ergebende geringere Konzentration zurückzuführen.

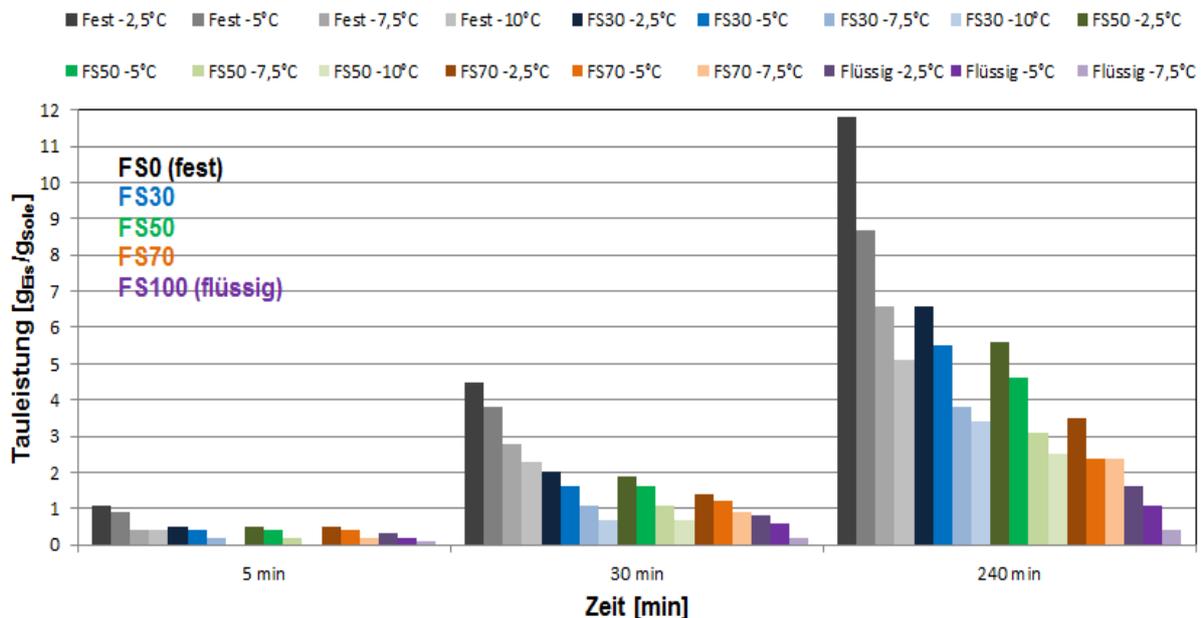


Abbildung 7: Vergleich Tauleistung Fest – Feuchtsalz – Flüssig nach 5, 30 und 240 Minuten [9]

Die vorliegenden Ergebnisse der Tauleistungen aus diesem Forschungsvorhaben sowie vorhergehenden Untersuchungen werden im Kapitel 5 herangezogen, um daraus ein allgemeingültiges Modell für die Tauleistung abzuleiten. Dieses soll zukünftig ermöglichen die Tauleistung für beliebige Salzkonzentrationen, Temperaturen und Einwirkdauern zu berechnen und ist damit ein wesentlicher Baustein eines ganzheitlichen Streumodells.

### 3.5 Zusammenfassung

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

- Die Anordnung und die Durchführung der Tauleistungsversuche sind ausführlich beschrieben, praktisch erprobt, gut wiederholbar und es liegen konsistente Ergebnisse für unterschiedliche Taumittel vor (NaCl, CaCl<sub>2</sub>, MgCl<sub>2</sub> etc.).
- Wie erwartet stieg die Tauleistung ausgehend von FS100 über FS70, FS50, FS30 und FS0 sukzessive aufgrund des höheren Salzanteils der ausgebrachten Streumenge bei gleicher Einwirkdauer und Umgebungstemperatur 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 Gefriertemperatur und Umgebungstemperatur bei hohem Soleanteil im Vergleich zur reinen Trockenstreuung.

## 4 Eisbildungsdauer

### 4.1 Ausgangslage

Im Projekt „Optimierung der Feuchtsalzstreuung“ [1] wurden bereits Untersuchungen zum Gefrierpunkt von Salzlösungen in Abhängigkeit ihrer Konzentration durchgeführt und ein Diagramm für Natriumchlorid (NaCl) und Calciumchlorid (CaCl<sub>2</sub>) abgeleitet (siehe Abbildung 8). Die Versuche zur Gefrierpunktbestimmung erfolgten mit gefüllten Flaschen (ca. 0,4 l) bei einer konstanten Temperatur von -45 °C in einem Klimaschrank.

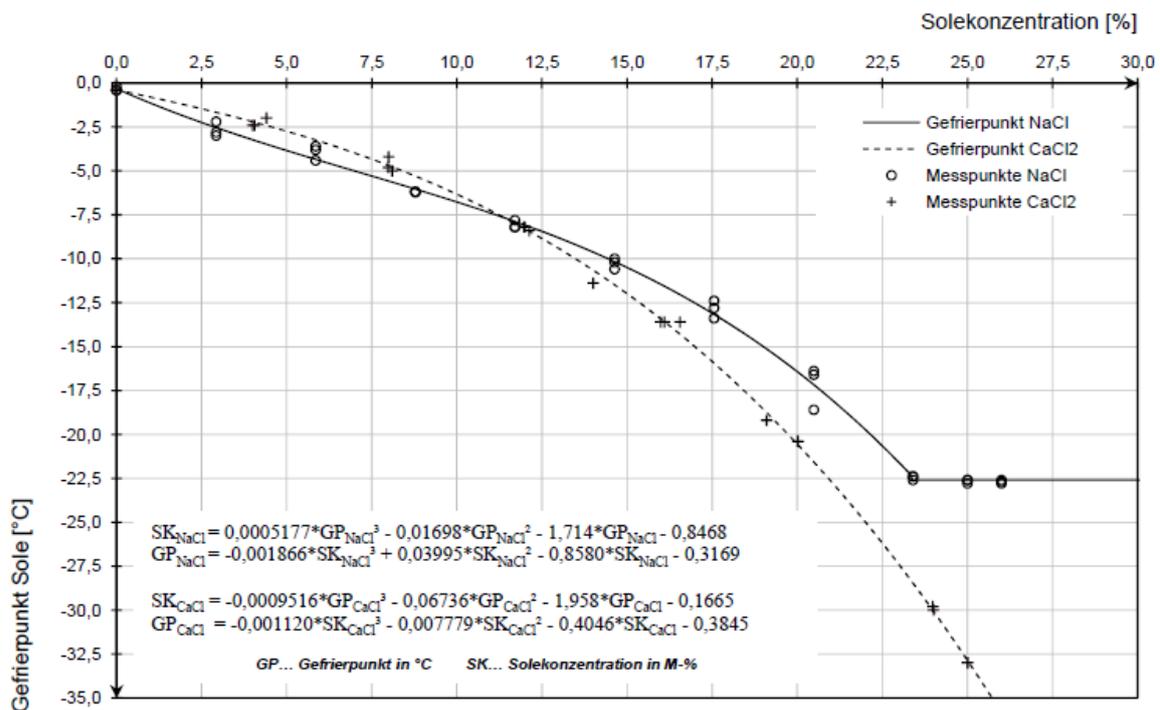


Abbildung 8: Gefrierpunktkurven für Natriumchlorid und Calciumchlorid [1]

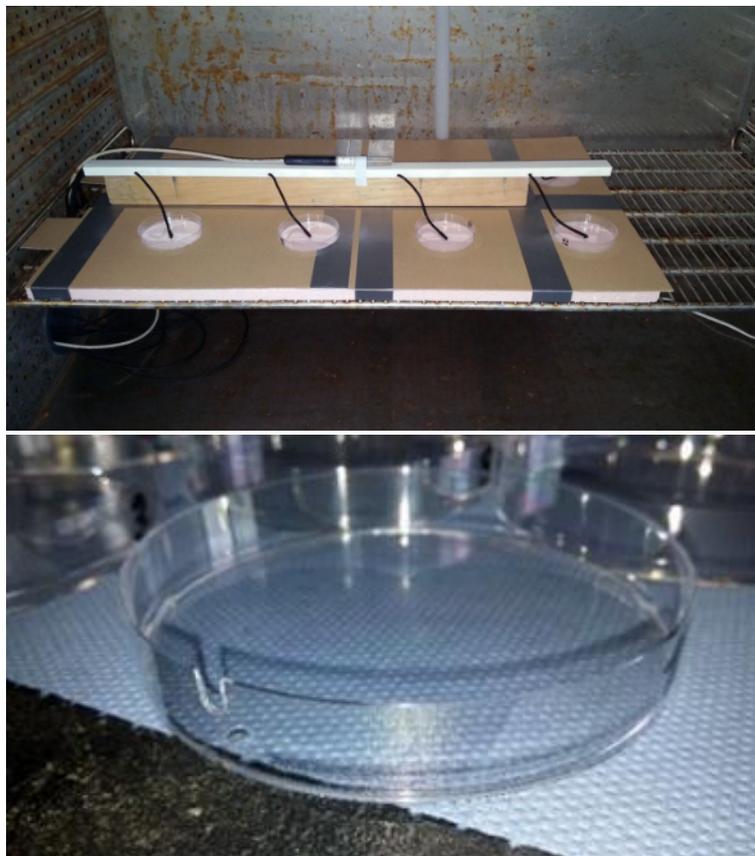
Die durchgeführten Flaschenversuche gaben zwar Aufschluss über die Gefriertemperaturen von unterschiedlichen Solekonzentrationen, aufgrund der Versuchsmethodik konnte jedoch keine Aussage über die Gefrierdauer von typischen dünnen Wasserschichten bzw. Salzlösungen bei Lufttemperaturen von 0 °C bis -10 °C gemacht werden. Diese Fragestellung ist jedoch für den Winterdienst von maßgeblicher Bedeutung, da sie die Zeit zwischen nasser und glatter Fahrbahn bzw. dem damit einhergehenden Griffigkeitsverlust definiert. Im Zuge des gegenständlichen Forschungsprojektes wurde daher der Zeitpunkt der Eisbildung für dünne Wasserfilme mit unterschiedlichen Salzlösungen untersucht.

### 4.2 Inhalt und Methodik

Das Arbeitspaket umfasste die Entwicklung und Erprobung eines Laborversuches aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen, bei dem unterschiedliche Wasserfilmdicken ohne bzw. mit definiertem Salzanteil bei üblichen winterlichen Umgebungstemperaturen gefroren wurden. Aus den Messwerten wurden die üblichen Gefrierdauern in Abhängigkeit von der Temperatur

ohne Salz bzw. die zeitliche Verzögerung des Gefriervorganges aufgrund von Restsalzkonzentrationen im Wasserfilm z.B. infolge von Präventivstreuungen abgeleitet.

Nach ersten Vorversuchen war es möglich, den Ablauf der Laborversuche im geschlossenen Klimaschrank auszuführen, wodurch externe Einflüsse auf die Versuchsergebnisse minierbar waren. Dazu wurden im geschlossenen Klimaschrank 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 wurden diese auf einer vorgefertigten Styroporplatte befestigt und fixiert (siehe Abbildung 9). Damit war es auch möglich, eine in der Praxis nicht vorhandene Luftströmung der Plexiglasschalen von unten zu vermeiden. Die Temperaturaufzeichnung erfolgte kontinuierlich mittels PT100-Temperaturfühlern über den Datenlogger ELPRO ECOLOG TN4-L. Die Versuchsdauer wurde jeweils mit 4 Stunden bei der vorgesehenen Lufttemperatur angesetzt.



**Abbildung 9: Versuchslayout Eisbildung dünner Wasser- bzw. Solefilme in Plexiglasschale**

### 4.3 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 in Summe 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 4 zusammengefasst.

**Tabelle 4: Prüfprogramm Eisbildungsdauer Wasser bzw. Solelösungen**

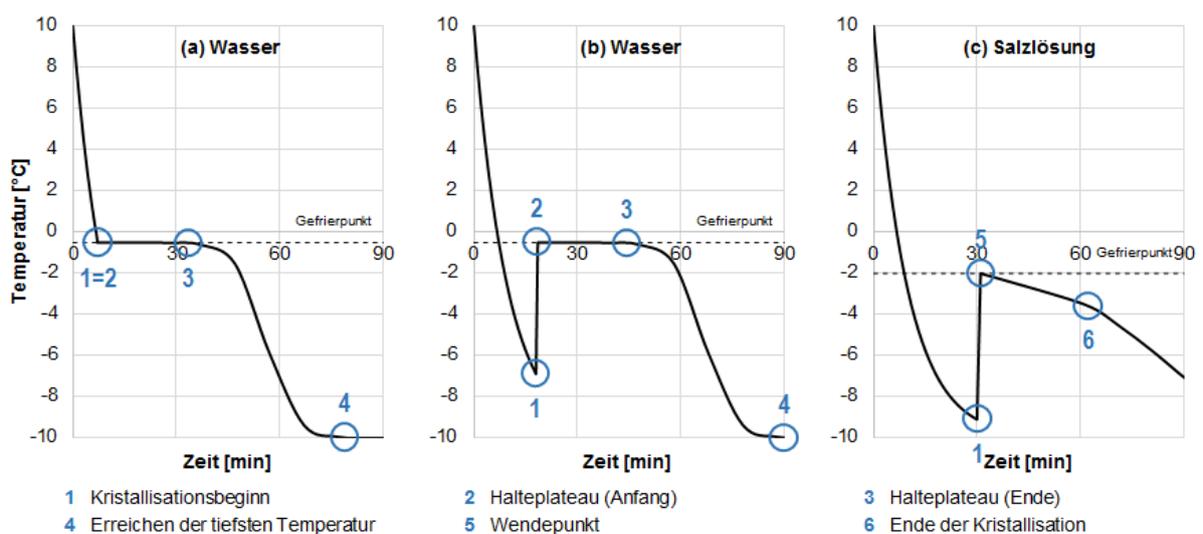
Basisprüfungen										
Szenario	Lufttemperatur [°C]				Wasserfilmdicke [mm]				Bestimmung [Stk.]	Anzahl [Stk.]
	-2,5	-5	-7,5	-10	-	2	3	4		
dest. Wasser	-2,5	-5	-7,5	-10	-	2	3	4	3	36
FS30 20g	-2,5	-5	-	-10	0,5*	2	-	4	3	27
FS30 40g	-2,5	-5	-	-10	0,5*	2	-	4	3	27
FS70 20g	-2,5	-	-7,5	-	0,5*	2	-	-	3	12
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
<b>Gesamtsumme Einzelprüfungen [Stk.]</b>										<b>142</b>

\*) aufgrund der Schwierigkeit geringe Filmdicken zu messen, mussten von der üblichen Versuchsdurchführung abweichende Maßnahmen getroffen werden (siehe [9])

## 4.4 Auswertung

### 4.4.1 Grundlagen

Für die Interpretation der aufgezeichneten zeitlichen Temperaturverläufe ist zwischen drei möglichen Fällen zu unterscheiden, die in Abbildung 10 dargestellt sind.



**Abbildung 10: Gefrierpunktermittlung und Gefrierphasen [10]**

Der Gefriervorgang durchläuft dabei folgende Phasen: [9]

**Abkühlung:** Gemäß dem Newton'schen Abkühlungsgesetz 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.

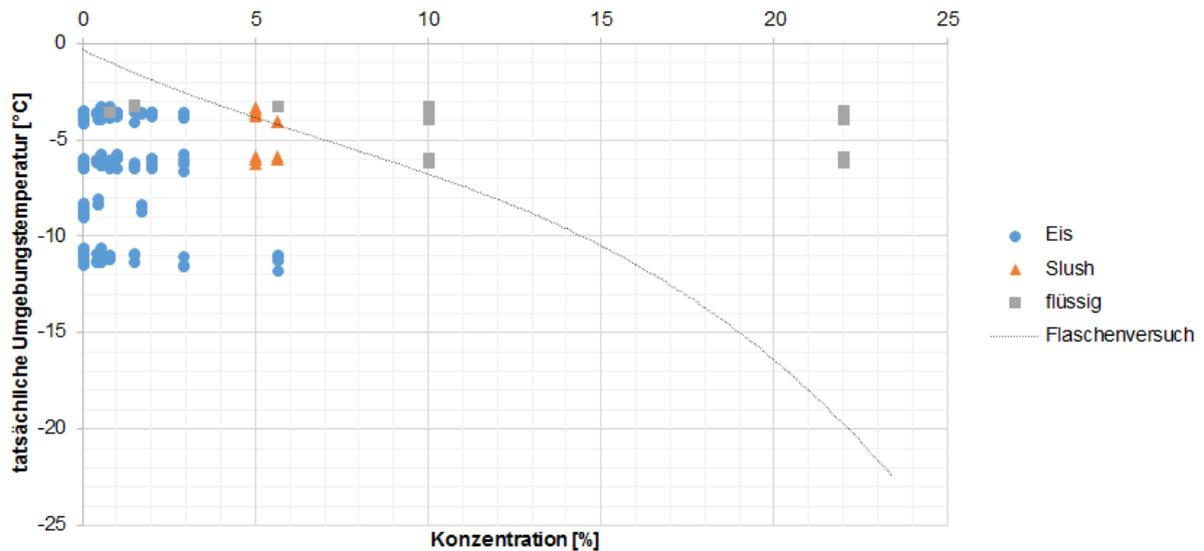
**Unterkühlung und Kristallisationsbeginn:** Der Kristallisationsbeginn kann nun sofort bei Erreichen des Gefrierpunktes erfolgen (Abbildung 10a) oder auch in den Zustand der Unterkühlung übergehen (Abbildung 10b). Dabei wird der Gefrierpunkt unterschritten, ohne dass eine Kristallisation stattfindet. Erst das Vorhandensein von Mineralien oder Verunreinigungen, in manchen Fällen auch durch Erschütterungsimpulse, ermöglicht es 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 10, Punkt 2 bis 3), da die Umgebungstemperatur der Flüssigkeit weiterhin Wärme entzieht. Dieser Haltepunkt kennzeichnet gleichzeitig auch den Gefrierpunkt von Flüssigkeiten (Abbildung 10a). 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 10b). Nach Abschluss der Kristallisation fällt die Wärmezufuhr weg und die Temperatur des Eises nähert sich der Umgebungstemperatur an.

Wässrige Lösungen (Abbildung 10c) 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, wodurch in weiterer Folge ihr Gefrierpunkt absinkt. Dieser Vorgang setzt sich so lange fort, bis die Kristallisation abgeschlossen ist und die Umgebungstemperatur höher als die Gefriertemperatur der verbleibenden wässrigen Lösung ist.

#### 4.4.2 Prüfergebnisse

In Abbildung 11 sind die resultierenden Zustände aller geprüften Salzkonzentrationen im Vergleich zur Gefrierkurve in Abbildung 8 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass sich bei Konzentrationen und Temperaturen unter der Gefrierkurve Eis bilden muss (blaue Punkte), während die Probe bei Konzentrationen und Temperaturen über der Gefrierkurve flüssig bleibt (graue Quadrate). Bei Kombinationen nahe der Gefrierkurve bildet sich allerdings ein Übergangszustand aus, ein sogenannter Slush (orange Dreiecke), wo sich einzelne Eiskristalle bilden, aber dazwischen noch konzentrierte Sole 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 12 zeigt beispielhaft die charakteristische Konsistenz der Proben (Eis, Slush, flüssig) nach dem Gefriervorgang, wobei zu beachten ist, dass sich unter den Petrischalen rosa-weiße Styroporplatten befinden.

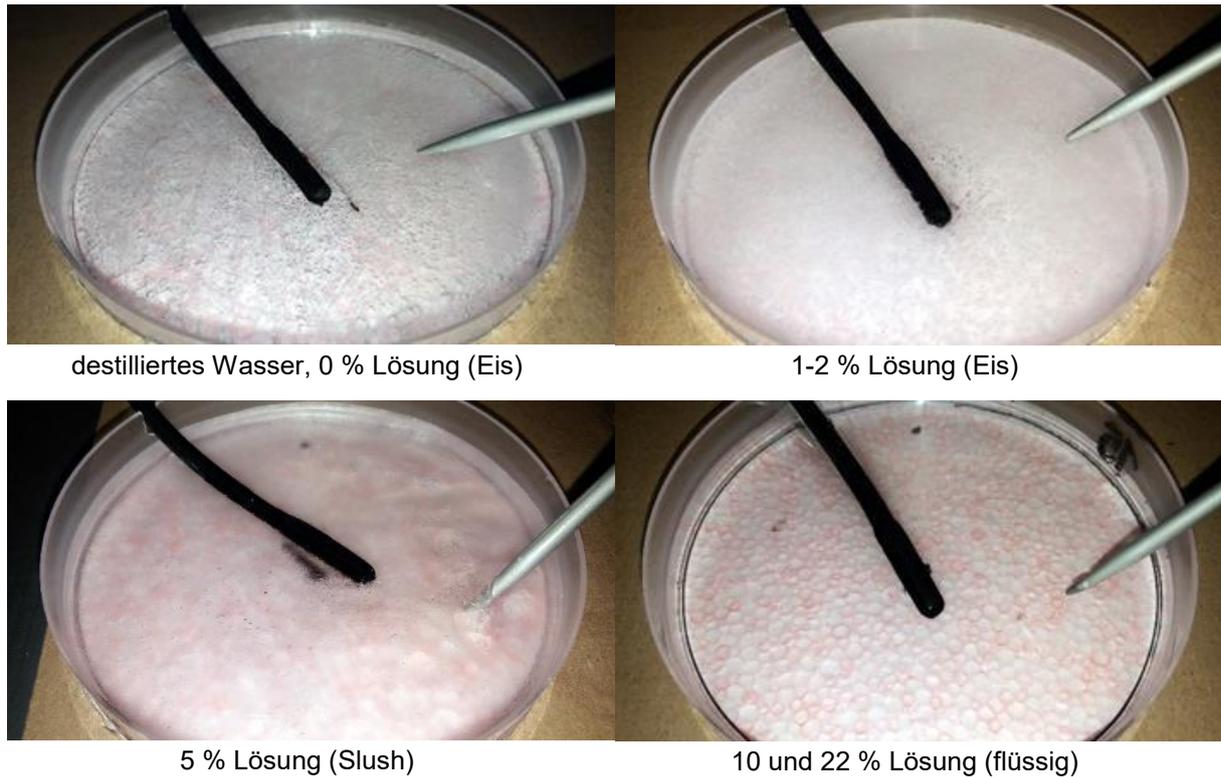


**Abbildung 11: Gefrierkurve für NaCl und Probekörperzustand nach Gefriervorgang [9]**

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 5):

**Tabelle 5: 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 12: Charakteristische Konsistenz der Proben nach dem Gefriervorgang [9]**

Für die Bestimmung des Beginns der Eisbildung wurde der Anfang des Halteplateaus bzw. der Wendepunkt (siehe Abbildung 10, Punkt 2 bzw. 5) herangezogen. Das Ende der Eisbildung exakt zu bestimmen gestaltete sich allerdings schwierig, da kein deutlicher Knick (siehe Abbildung 10, Punkt 6) beim Übergang in die Abkühlphase als fester Körper erkennbar war. Daher wurde für einen ersten Vergleich als Ende der Eisbildung das erstmalige Erreichen der tiefsten Temperatur am Ende des Versuches herangezogen (siehe Abbildung 10, Punkt 4). In Abbildung 13 bis Abbildung 18 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 11.4 zusammengefasst.

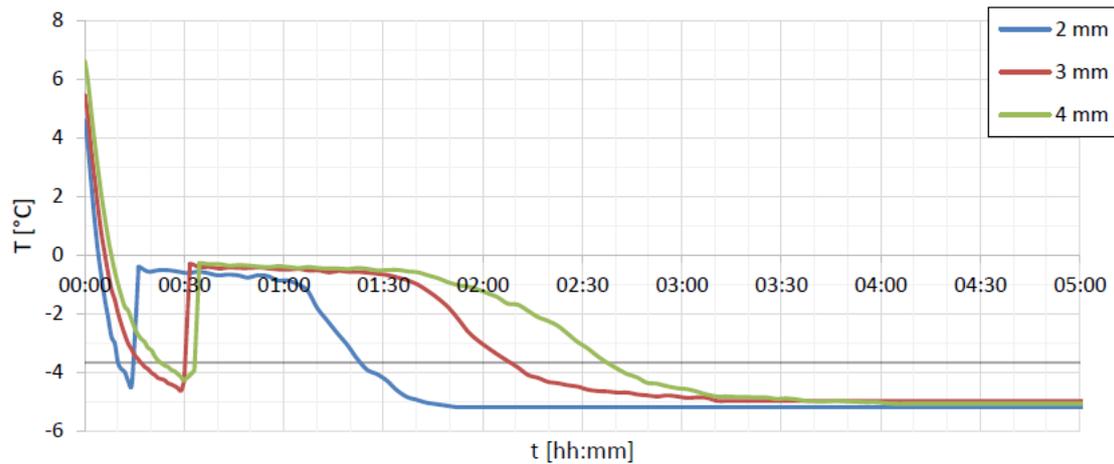


Abbildung 13: Gefrierverlauf dest. Wasser bei -3,7 °C für unterschiedliche Wasserdickungen [9]

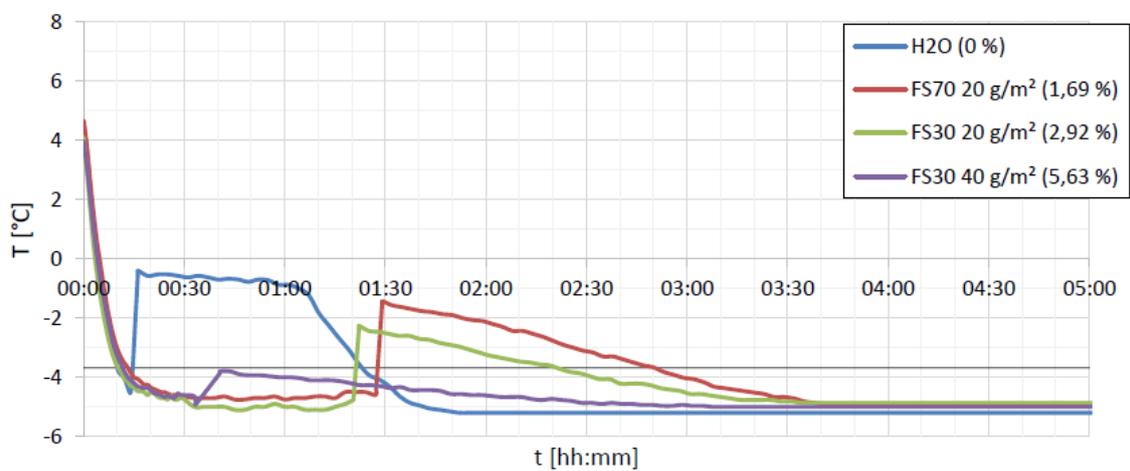


Abbildung 14: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -3,7 °C nach Restsalzkonzentration [9]

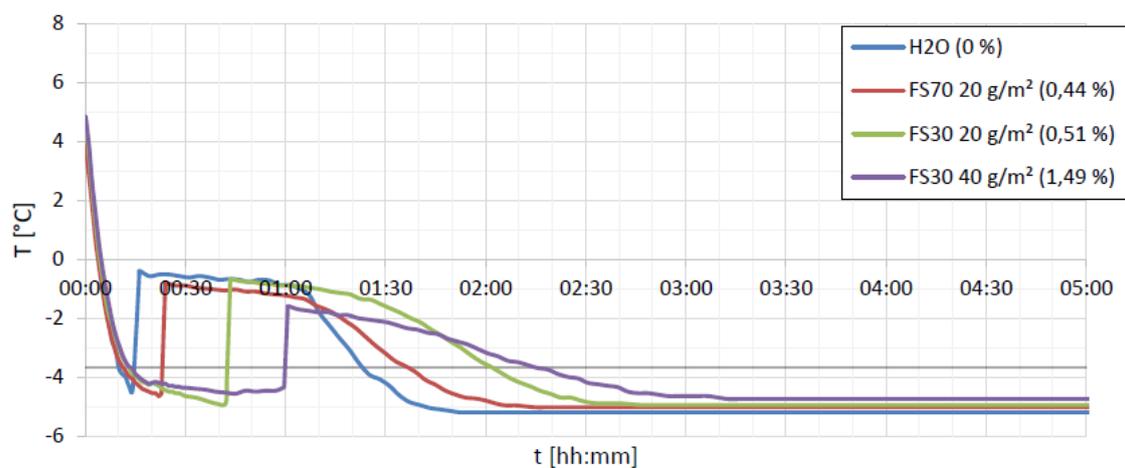


Abbildung 15: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -3,7 °C nach Restsalzkonzentration [9]

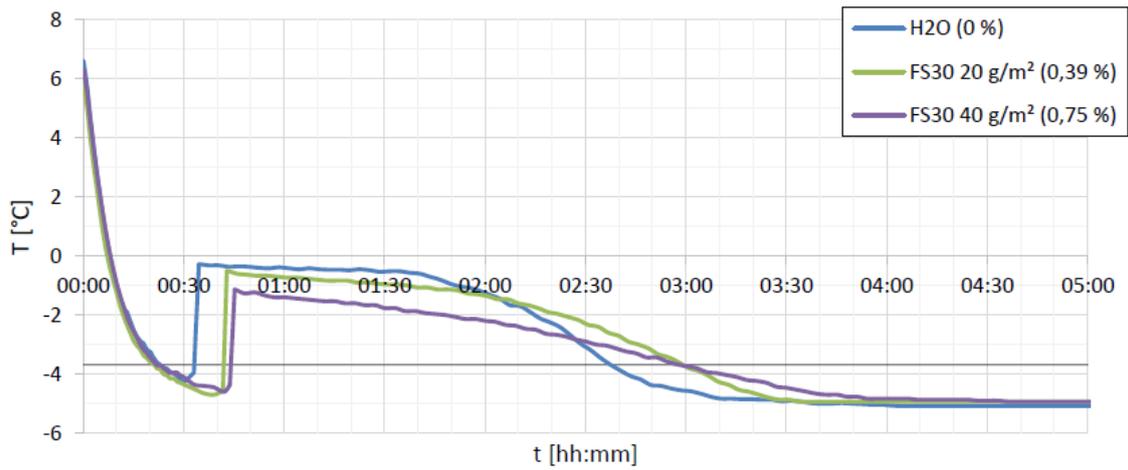


Abbildung 16: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -3,7 °C nach Restsalzkonzentration [9]

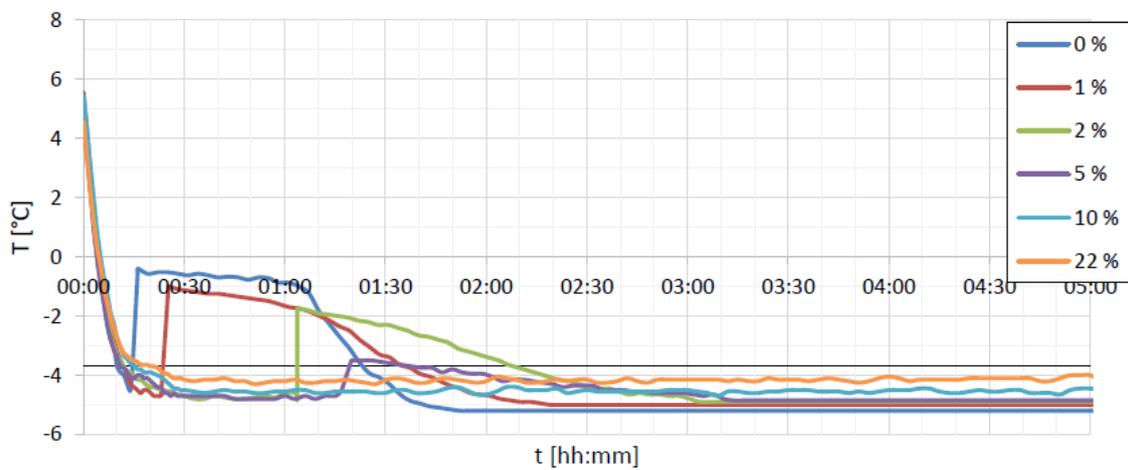


Abbildung 17: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -3,7 °C nach Restsalzkonzentration [9]

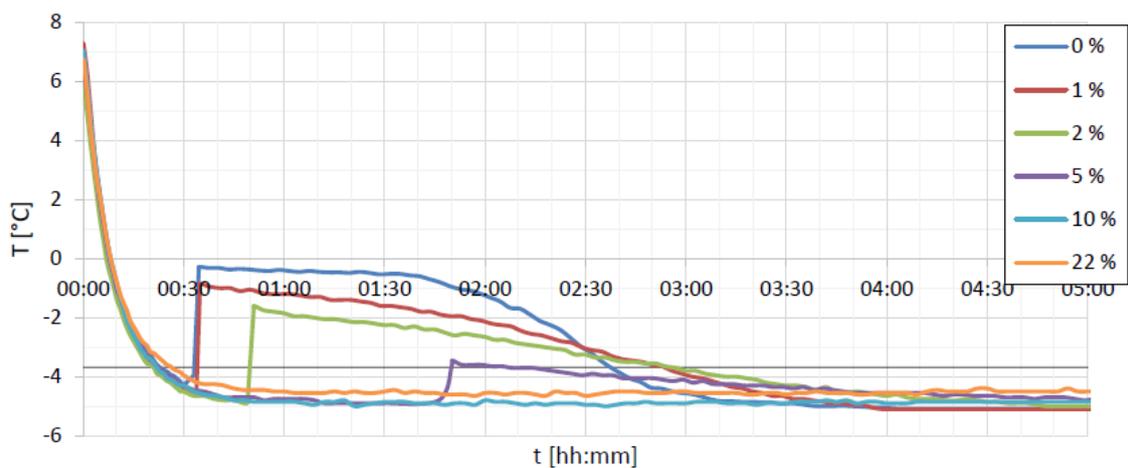


Abbildung 18: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -3,7 °C nach Restsalzkonzentration [9]

## 4.5 Zusammenfassung

Anhand der vorliegenden Versuchsergebnisse können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Versuchsanordnung ist grundsätzlich erprobt, unterliegt aber teilweise großen zeitlichen Schwankungen bei Wiederholungsprüfungen, da der Zeitpunkt der Eisbildung bei Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt bis ca.  $-6\text{ °C}$  sehr sensibel ist und stark von kleinen Verunreinigungen (Kristallisationskeimen) abhängt.
- Bei tieferen Temperaturen bis  $-11\text{ °C}$  nehmen diese Schwankungen deutlich ab, d.h. die Zeit bis zum Gefrierbeginn bzw. Gefrierende unterliegt geringeren Schwankungen und die Versuche zeigen somit eine höhere Stabilität in der Eisbildungsdauer.
- 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  $-6\text{ °C}$  können mit ca. 15 bis 60 Minuten abgeschätzt werden. Bei tieferen Temperaturen bis  $-11\text{ °C}$  sind kaum mehr Unterschiede zum Beginn der Eisbildung vorhanden und am Ende der Eisbildung betragen diese weniger als 15 Minuten
- Praktisch bedeutet dies, dass die Verzögerung des Gefriervorganges bezogen auf übliche Streuumlaufzeiten begrenzt ist, wenn größere Niederschlagsmengen und eine dementsprechend geringe Restsalzkonzentration vorhanden sind.
- Insbesondere im Fall von Reifglätte mit sehr begrenzten Niederschlags- bzw. Eismengen (ca. 50 bis  $150\text{ g/m}^2$ ) reicht dagegen die präventive Ausbringung von Feuchtsalz (ca.  $10\text{ g/m}^2$ ) meist aus, um den Gefrierpunkt unter der Fahrbahntemperatur zu halten und damit Glätte von vornherein zu vermeiden.
- Die Versuche zeigen weiters, dass für die Optimierung der Umlaufzeiten je nach Fahrbahntemperatur und Solekonzentration nur ein begrenztes Zeitfenster zur Vermeidung von Glättebildung nach Unterschreitung der Grenzkonzentration zur Verfügung steht.
- Dieses Zeitfenster ist grundsätzlich für die Modellierung nicht unwesentlich, kann aber nur bei sorgfältiger Planung und insgesamt kurzen Streuumlaufzeiten genutzt werden.
- Die Ergebnisse zeigen weiters, dass nasse Fahrbahnen oder größere Niederschlagsmengen mit höherer Filmdicke zwischen 2 bis 4 mm auch ohne Salz ca. 30 bis 90 Minuten benötigen um vollständig zu gefrieren.
- Für die Verhinderung von Glätte müsste in diesen Fällen bereits entsprechend Restsalz vorhanden sein und der nächste Streuvorgang vor dem Gefrieren erfolgen.
- Bei üblichen Streumengen und Temperaturen bis  $-1\text{ °C}$  bzw.  $-2\text{ °C}$  ist dies möglich, darunter nur begrenzt, da die erforderliche Restsalzkonzentration nicht erreichbar ist
- Die anhand der entwickelten und durchgeführten Versuche ermittelten Größenordnungen und Zusammenhänge zur Eisbildung erlauben bereits eine Abschätzung der Größenordnungen – für eine Modellierung über die Ergebnisse von Kapitel 5.2 hinaus bzw. insbesondere die Berücksichtigung des Verkehrseinflusses auf den Gefriervorgang (Verzögerung) wären jedoch weitere Überlegungen und Versuche nötig.

## 5 Tau- und Gefriermodell

### 5.1 Taumodell

#### 5.1.1 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 19) 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 sind der Gefrierpunkt und die Umgebungstemperatur gleich (Abbildung 19).

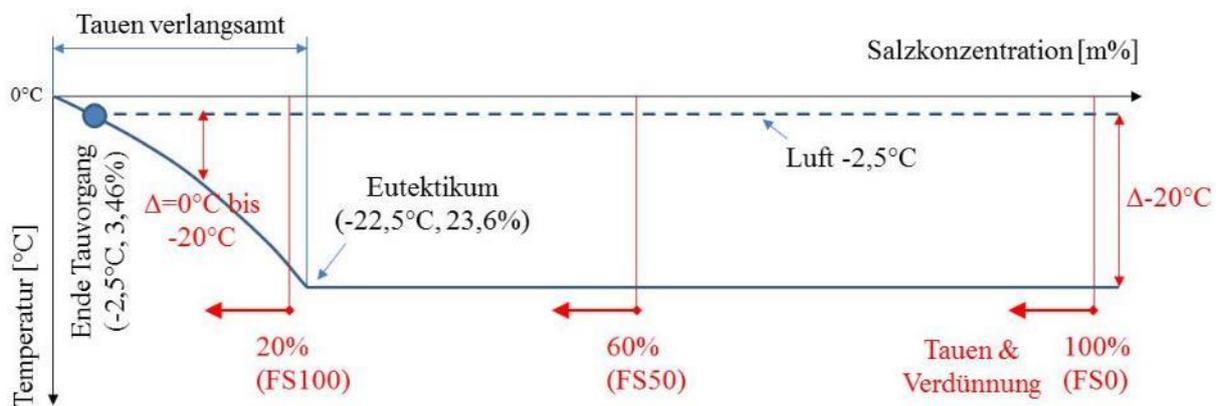


Abbildung 19: Konzentrations- und Gefrierpunktverlauf während des Tauvorganges [14]

#### 5.1.2 Versuchsauswertung und Regressionsmodelle

Trägt man die Ergebnisse der Tauleistungsversuche nach Einwirkdauer (Minuten) und getauter Menge Eis (g) je Einheit Taumittel auf, so lässt sich ein Verlauf mit ausgeprägter Anfangstauleistung erkennen, welcher jedoch mit zunehmender Zeit abflacht und damit ein Nachlassen der Tauleistung anzeigt [4, 11].

Abbildung 20 stellt exemplarisch die Ergebnisse der Tauleistungsversuche bei -2,5 °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 °C) möglich. Beispielsweise kann für eine Einwirkdauer von 60 Minuten mit 10 g Salz (FS0) eine Tauleistung von  $y_{\text{tau}}(60) = 10 \times 0,6185 \times 60^{0,5361} \approx 55$  g Eis ermittelt werden. Bei der Anwendung der Potenzfunktion ist jedoch zu beachten, dass eine zeitliche Extrapolation nur bedingt möglich ist, da die Tauleistung mit zunehmender Zeit abnimmt, bis eine Grenzkonzentration erreicht ist, die der Umgebungstemperatur entspricht.

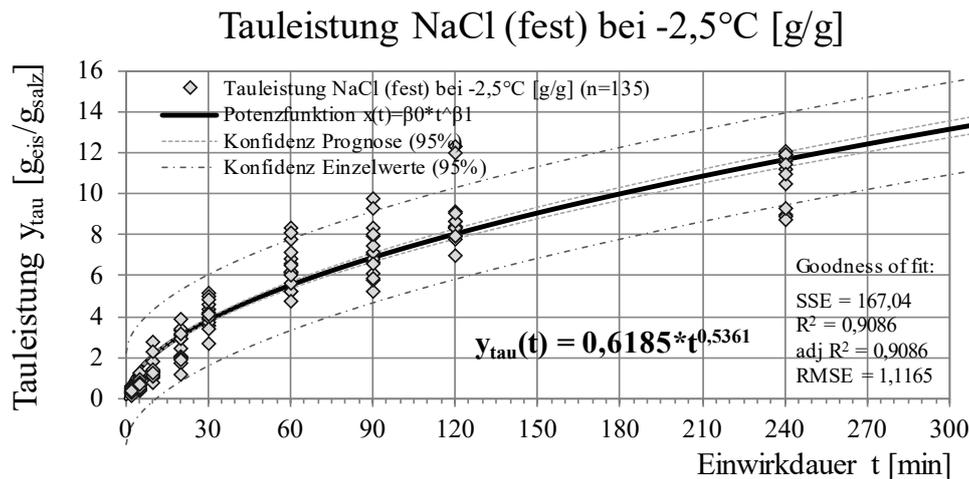


Abbildung 20: Auswertung Tauleistungsversuche NaCl (FS0) nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [11]

Unter der Randbedingung, dass nur Salz eine Tauwirkung besitzt, kann dieses Näherungsmodell für Trockensalz (FS0) auf die Streuung mit erhöhtem Soleanteil (FS30, FS50, FS70 und 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 21. 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.

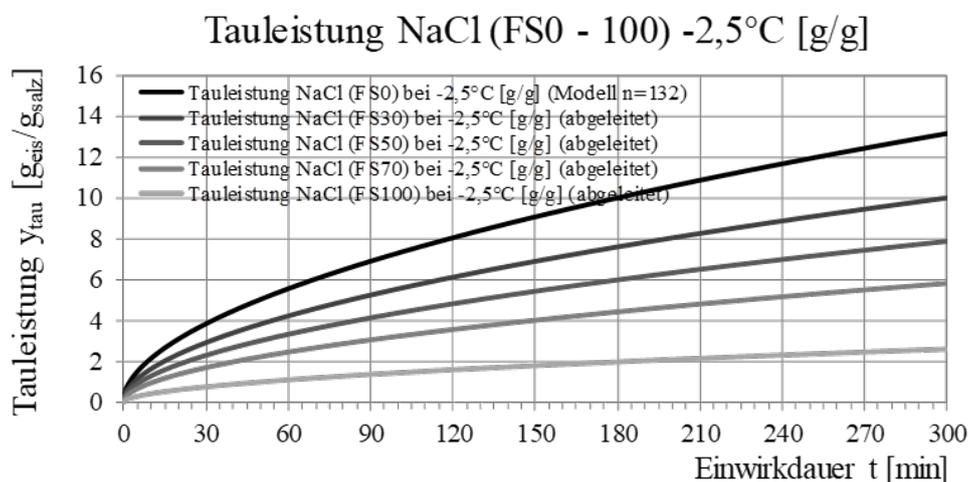
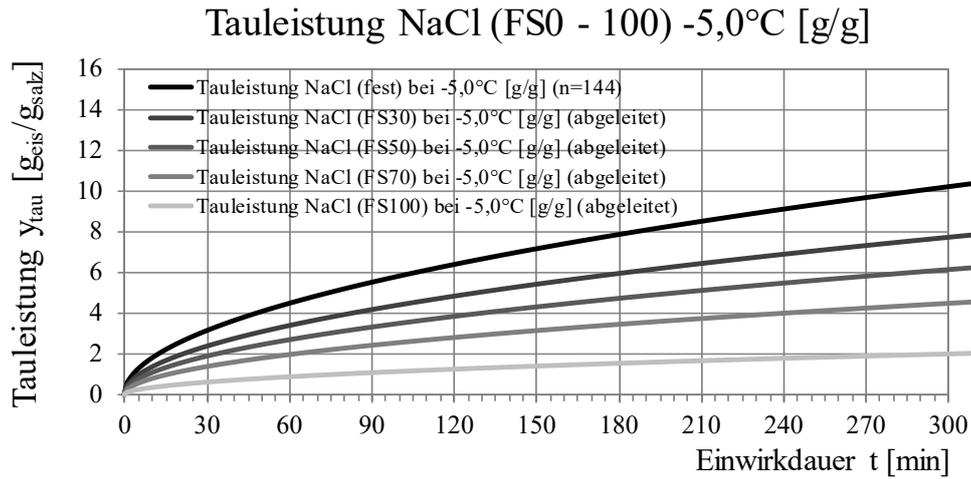
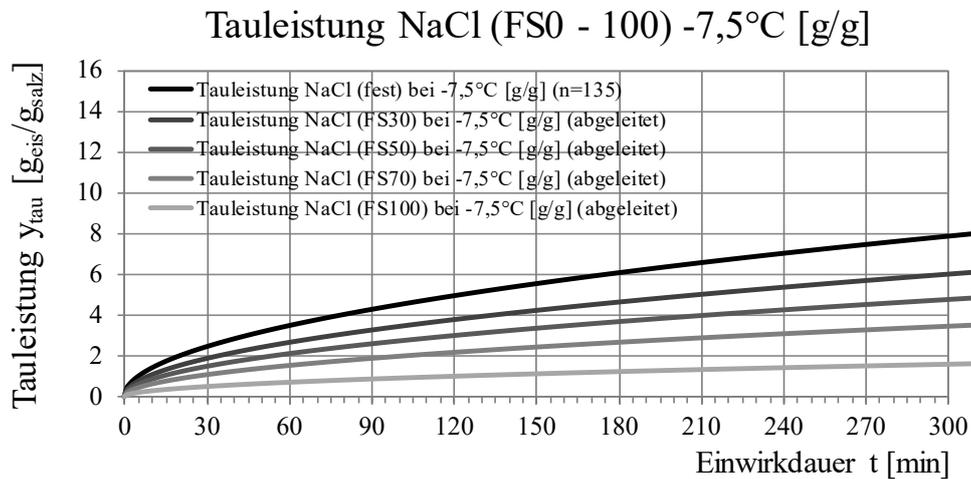


Abbildung 21: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [11]

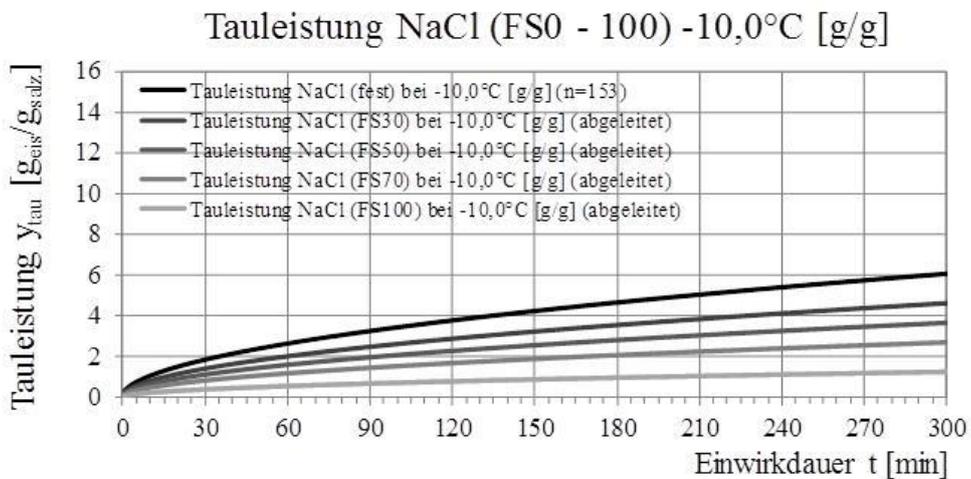
Obwohl diese Methode zu einer geringfügigen Überschätzung der in den Versuchen gemessenen Werte führt, kann auf dieser Basis eine hinreichend genaue Näherung der Tauleistung für beliebig hohe Soleanteile aus den Tauleistungsversuchen von reinem NaCl abgeleitet werden. Die Abbildung 22 bis Abbildung 24 zeigen dazu die entsprechenden Tauleistungskurven für -5,0 °C, -7,5 °C und -10 °C.



**Abbildung 22: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -5,0 °C [11]**

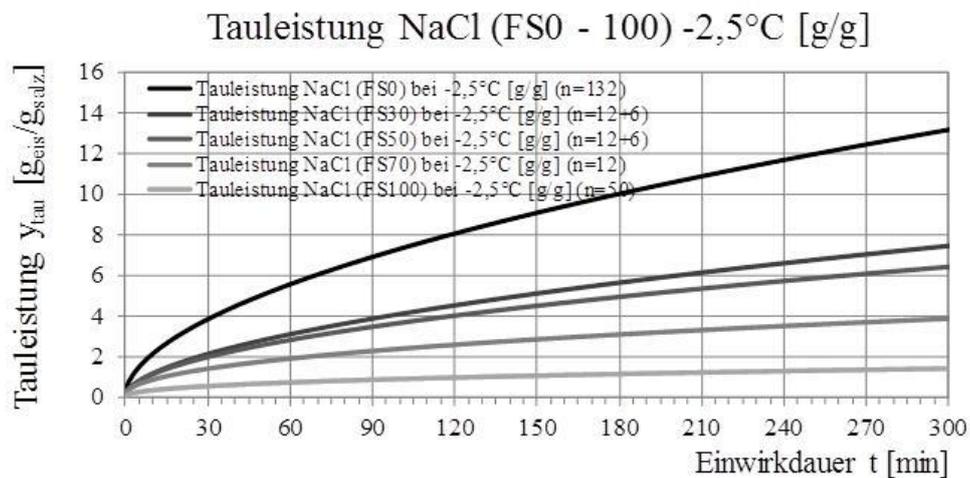


**Abbildung 23: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -7,5 °C [11]**

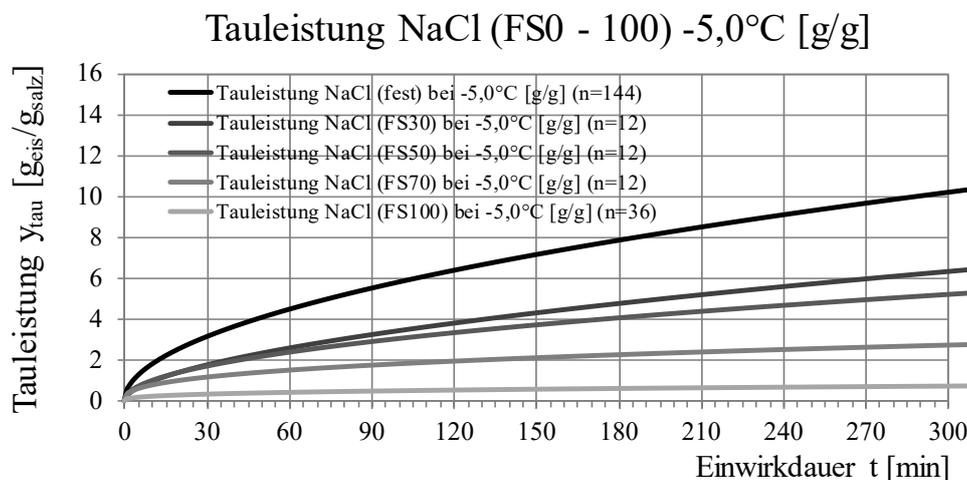


**Abbildung 24: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -10,0 °C [11]**

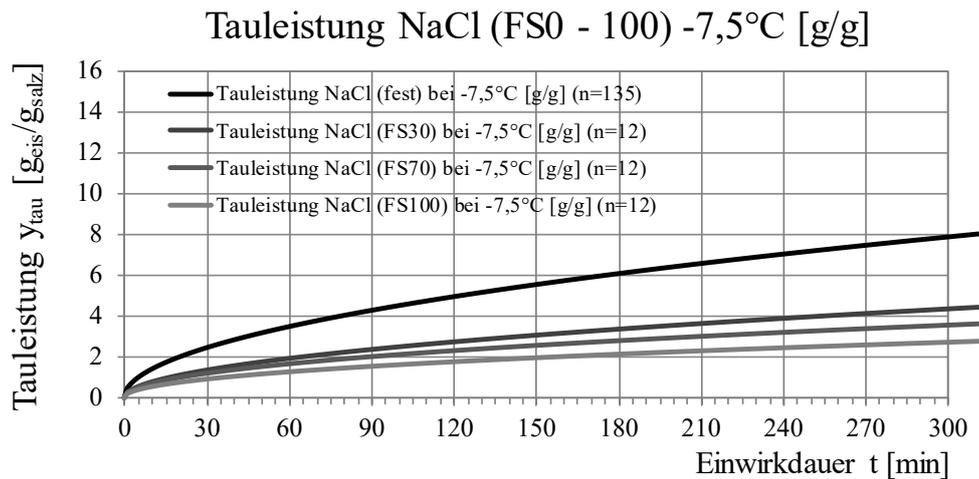
Wie bereits angeführt wurden diese Überlegungen und das damit verbundene Näherungsmodell über Tauleistungsversuche mit erhöhtem Soleanteil validiert. Abbildung 25, Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen die auf den durchgeführten Tauleistungsversuchen (FS0, FS30, FS50, FS70 und FS100) basierenden Regressionsmodelle für verschiedene Temperaturen (-2,5 °C, -5,0 °C, -7,5 °C und -10 °C). Wie bereits beschrieben zeigen die Ergebnisse auf Basis der Versuche etwas geringere Tauleistungen gegenüber dem Näherungsmodell. Abgesehen von der Schwankungsbreite bei einer begrenzten Zahl an Versuchen ist dies vermutlich auf die im zeitlichen Verlauf geringere Differenz des Gefrierpunktes zur Umgebungstemperatur bei erhöhtem Soleanteil zurückzuführen (Abbildung 19). Zusammenfassend ist damit nachgewiesen, dass der Vorteil eines erhöhten Soleanteils nicht in seiner Tauleistung, sondern in einem besseren Streubild sowie kleineren Streu- und Austragungsverlusten zu finden ist. Dies ist vor allem im Fall der Präventivstreuung wesentlich, wogegen es beim Tauen von (Rest-)Schneemengen in erster Linie auf die Menge Restschnee, die ausgebrachte Menge Salz und die Umgebungstemperatur ankommt [2,4,11]



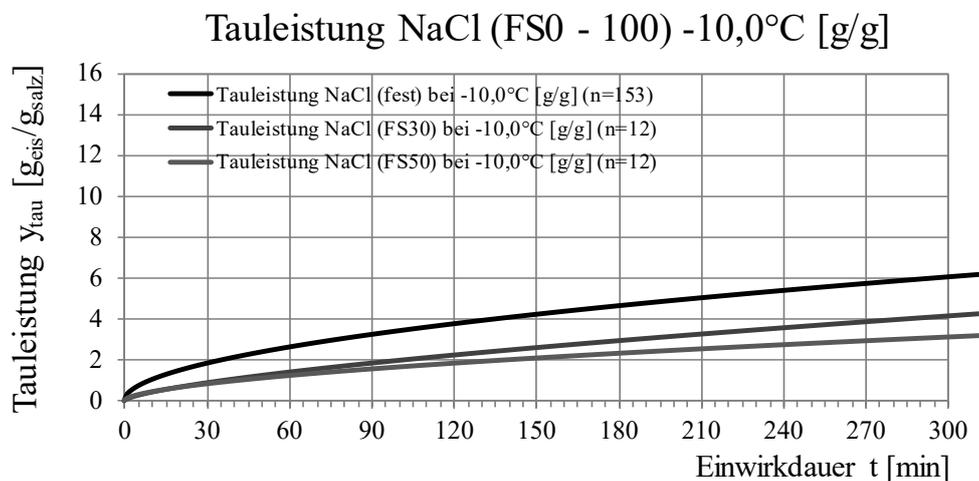
**Abbildung 25: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [11]**



**Abbildung 26: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -5,0 °C [11]**



**Abbildung 27: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -7,5 °C [11]**



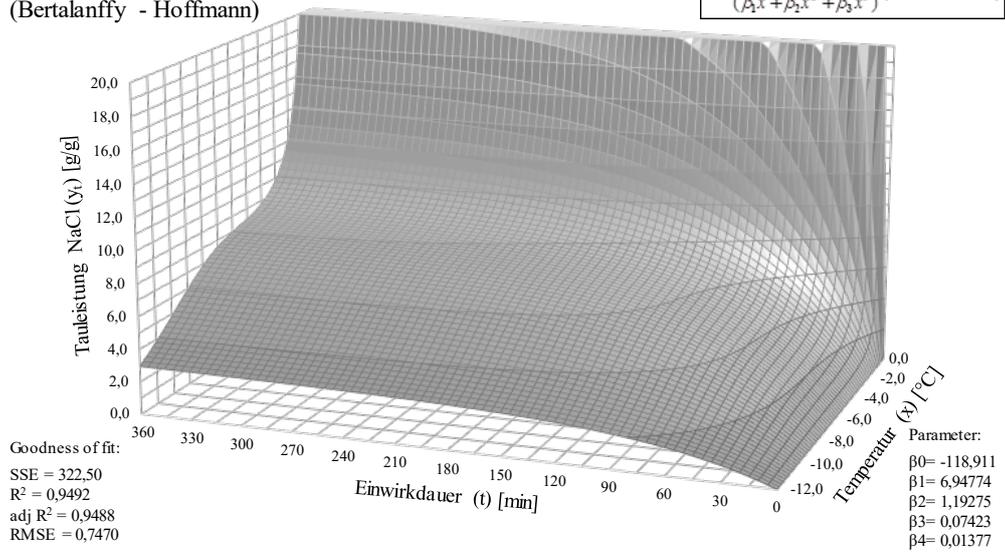
**Abbildung 28: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -10,0 °C [11]**

### 5.1.3 Ergebnisse universelles Tauleistungsmodell

Aus den Überlegungen zur Gefrierkurve sowie den Tauleistungsversuchen folgt, dass die Tauleistung nicht unendlich wachsen kann, sondern sich ein Gleichgewicht bei der Gefrierkonzentration einstellt. Eine Möglichkeit der Annäherung zur Erklärung aller Tauleistungsversuche für beliebige Einwirkdauer und Temperaturen besteht über eine Kombination der maximalen Tauleistung aus der Gefrierkurve und dem asymptotischen Anstieg nach Einwirkdauer über einen Bertalanffy-Term. Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen die Ableitung universeller Tauleistungsmodelle, die zudem gemäß den vorhergehenden Überlegungen für beliebige Soleanteile und Temperaturen sowie Einwirkdauer verwendbar sind. Gleichwohl ist zu beachten, dass diese Modelle die individuellen Gegebenheiten wie Salzverluste bei Streuung und Verkehr nicht berücksichtigen können.

Tauleistung - Global FIT  
(Bertalanffy - Hoffmann)

$$z = \frac{\beta_0}{(\beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3)} (1 - \exp(-\beta_4 y))$$



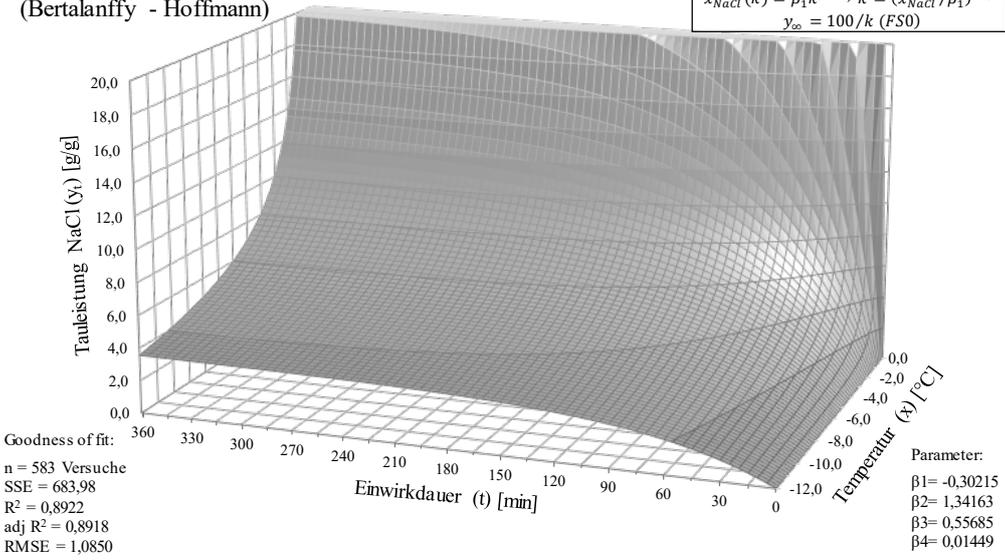
**Abbildung 29: Universelles Tauleistungsmodell auf Basis der Tauleistungsversuche für NaCl (FS0) nach Einwirkdauer und Temperatur mit globaler Parameteranpassung**

Tauleistung - Nested FIT 1  
(Bertalanffy - Hoffmann)

$$y_t = y_{\infty} \beta_3 [1 - \exp(-\beta_4 (t - t_0))]$$

$$x_{NaCl}(k) = \beta_1 k^{\beta_2} \rightarrow k = (x_{NaCl} / \beta_1)^{1/\beta_2}$$

$$y_{\infty} = 100 / k \text{ (FS0)}$$



**Abbildung 30: Tauleistungsmodell mit Potenzfunktion und Bertalanffy-Term für NaCl (FS0) nach Einwirkdauer und Temperatur mit Parameteranpassung**

## 5.2 Gefriermodell

### 5.2.1 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 den im vorigen Unterkapitel aufgestellten Taumodellen. Sobald die Grenzkonzentration erreicht bzw. unterschritten wurde, erfolgt eine Phase der Unterkühlung bis zum Beginn des Gefriervorgangs. Während des Gefrierens sinkt die Griffigkeit der Fahrbahn solange, bis die Fahrbahnoberfläche vereist und der Reibungsbeiwert auf das Niveau von Schnee/Eis abgefallen ist (siehe dazu Abbildung 31). Dieser Vorgang ist sowohl von der Niederschlagsmenge als auch von der Texturtiefe der Fahrbahn abhängig und wurde in vorhergehenden Forschungsvorhaben näher untersucht [1] [4].

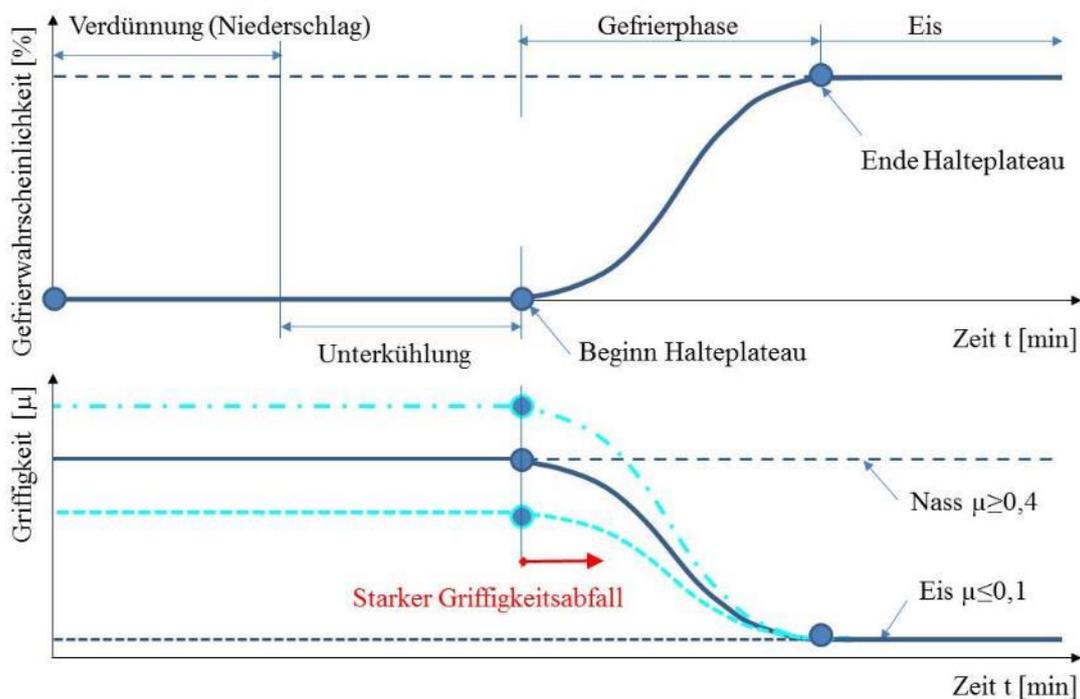


Abbildung 31: Schematische Darstellung der Phasen des Gefriervorganges zusammen mit der Entwicklung der Griffigkeit [14]

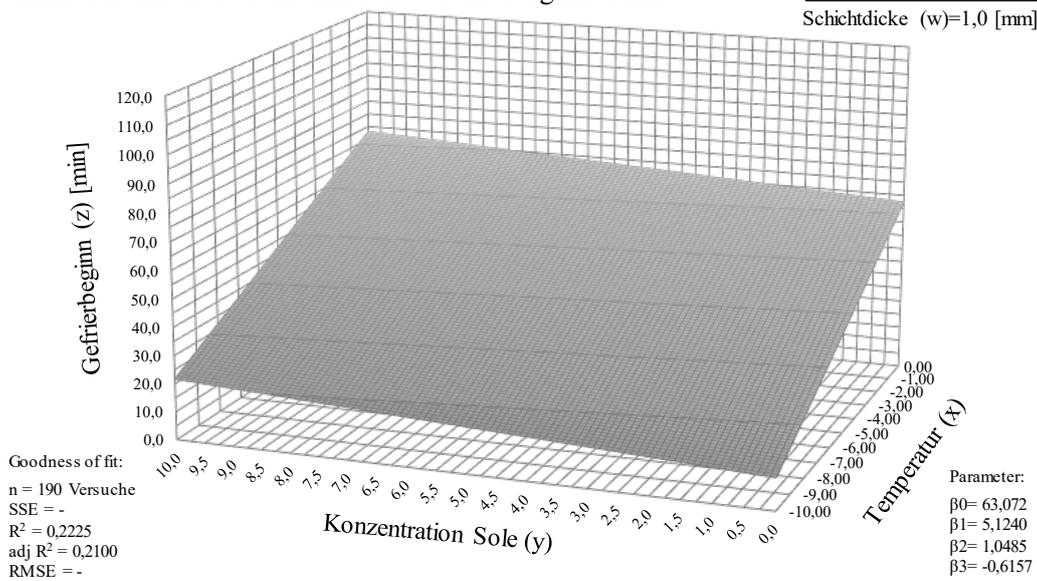
### 5.2.2 Ergebnisse Gefriermodell

Eine umfassende Abbildung des zeitlichen Verlaufs des Gefriervorganges beruht auf der Temperatur, der Solekonzentration und der Schichtdicke. Ausgehend von den in Kapitel 4.4 dargestellten und ausgewerteten Gefrierexperimenten wurde als erste Näherung ein mehrdimensionales lineares Regressionsmodell angepasst. Die Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen die Zeit bis zum Gefrierbeginn bzw. Gefrierende auf Basis der Laborversuche. Die Ergebnisse zeigen die Abnahme der Gefrierdauer mit abnehmender Solekonzentration, Schichtdicke und Temperatur. Trotz der versuchs- und modellbedingten Schwankungsbreiten kann auf dieser Basis eine erste Abschätzung erfolgen, für eine spezifischere Modellierung werden Überlegungen hinsichtlich Verkehrswirkung sowie zusätzliche Versuche nötig sein.

Einfaches lineares Gefriermodell - Gefrierbeginn 1mm

$$z_a = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 w$$

Schichtdicke (w)=1,0 [mm]

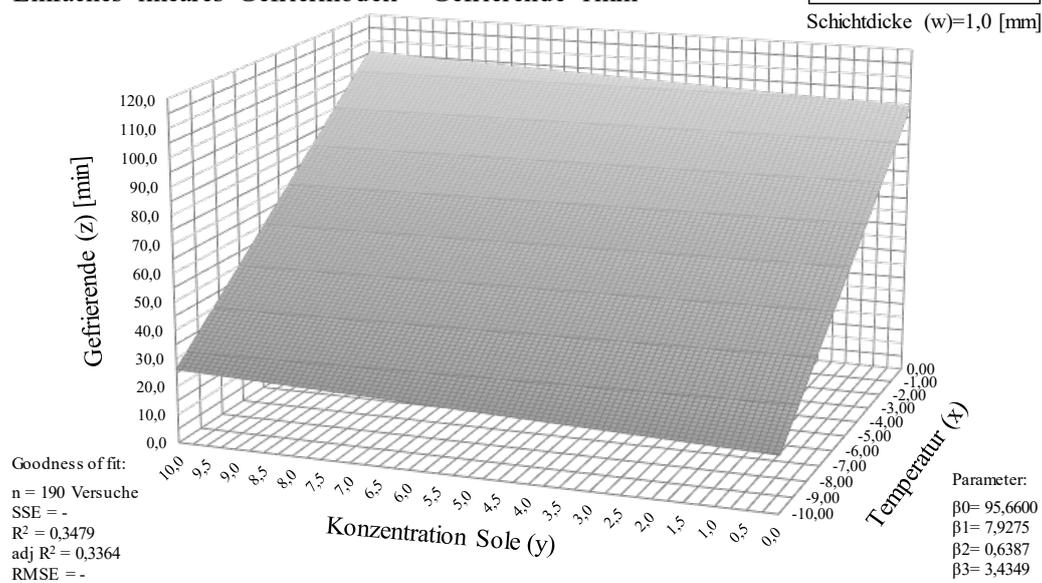


**Abbildung 32: Modellierung der Zeit bis zum Gefrierbeginn in Abhängigkeit von Temperatur, Solekonzentration und Schichtdicke mittels linearer Regression**

Einfaches lineares Gefriermodell - Gefrierende 1mm

$$z_a = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 w$$

Schichtdicke (w)=1,0 [mm]



**Abbildung 33: Modellierung der Zeit bis zum Gefrierende in Abhängigkeit von Temperatur, Solekonzentration und Schichtdicke mittels linearer Regression**

## 6 Rieselfähigkeit

### 6.1 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.

Darauf aufbauend wurde im Forschungsprojekt die Auswirkungen der Beimengung von Antibackmitteln auf die Rieselfähigkeit von Tausalzen untersucht. Zu diesem Zweck wurden Tausalze unterschiedlicher Herkunft (Steinsalz, Siedesalz) mit verschiedenen Antibackmitteln und variierenden Antibackmittelgehalten unter bestimmten Feuchtigkeitsbedingungen mittels Auslaufbox nach Sonntag geprüft. Damit sollten insbesondere die Vorgaben der RVS 12.04.16 für den Antibackmittelgehalt von Natriumchlorid überprüft werden, da die gültigen Empfehlungen von 3 mg bis 125 mg Antibackmittel pro Kilogramm Tausalz großen Interpretationsspielraum aufweisen. Zusätzlich wurde die Einhaltung der in der ÖNORN 16811-1 [13] 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.

### 6.2 Auftausalze und Prüfprogramm

#### 6.2.1 Materialauswahl

Um die in Österreich verfügbaren Salze (NaCl) 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 bzw. untersuchten Salze sind in Tabelle 6 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. Für die systematische Untersuchung der Rieselfähigkeit wurden insgesamt 12 Produkte von 4 Lieferanten aufgenommen (zusätzlich in Tabelle 6 fett markiert):

- 1 Steinsalz 0/3 mm ohne Antbackmittel
- 1 Steinsalz 0/2 mm ohne Antbackmittel
- 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 Antbackmittel
- 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 biologischem Antbackmittel (Weinstein)

**Tabelle 6: Verfügbare Auftausalze (NaCl) und Antbackmittel sowie -gehalte für Österreich**

Auftausalz	Korngröße [mm]	Antibackmittel	Antibackmittel-gehalt [mg/kg]	Lieferant	Anmerkung
Steinsalz / Rock Salt / RS	fein	Natriumferrocyanid	70-80	Lieferant anonymisiert	schwer lieferbar
	0/2	Natriumferrocyanid	70-100	Lieferant anonymisiert	möglich
	0/2	ohne	0	Lieferant anonymisiert	möglich
	0/3	Natriumferrocyanid	70-100	Lieferant anonymisiert	möglich
	0/3	ohne	0	Lieferant anonymisiert	möglich
	0/3	Natriumferrocyanid	70-80	Lieferant anonymisiert	möglich
	0/3	Natriumhexacyanoferrat	80-120	Lieferant anonymisiert	möglich
	0/3	ohne	0	Lieferant anonymisiert	möglich
	0/5	Natriumferrocyanid	70-80	Lieferant anonymisiert	Sonderprodukt
	0/5	Natriumferrocyanid	70-100	Lieferant anonymisiert	möglich
	0/5	ohne	0	Lieferant anonymisiert	möglich
Siedesalz / Vacuum Salt / VS	0/6	Natriumhexacyanoferrat	80-120	Lieferant anonymisiert	möglich
	fein	Natriumhexacyanoferrat	8	Lieferant anonymisiert	möglich
	fein	Natriumhexacyanoferrat	0	Lieferant anonymisiert	möglich, kein Auftausalz
	fein	Natriumferrocyanid	8	Lieferant anonymisiert	möglich
	fein	ohne	0	Lieferant anonymisiert	möglich
	fein	Natriumferrocyanid	20	Lieferant anonymisiert	möglich
	fein	biologisch (Weinstein)	12	Lieferant anonymisiert	möglich
	fein	Natriumhexacyanoferrat	80-100	Lieferant anonymisiert	Sonderprodukt
Meersalz	fein	ohne	0	Lieferant anonymisiert	möglich
	0/1	Natriumferrocyanid	60	Lieferant anonymisiert	schwer lieferbar
	0/1	ohne	0	Lieferant anonymisiert	möglich
	0,5/2	Natriumferrocyanid	60	Lieferant anonymisiert	möglich

Wie einleitend erwähnt wurden zusätzlich Siebanalysen zur Beurteilung der Korngrößenverteilung und Tauleistungsversuche zur Beurteilung des Einflusses der Antibackmittel auf die Tauleistung durchgeführt. In der Folge wurde der Vergleich mit den folgenden Auftausalzen jeweils ohne zugesetzte Antibackmittel und mit hohem Antibackmittelgehalt durchgeführt:

- RS1-0-[0/3] Steinsalz Korngröße 0/3 ohne Antibackmittel
- RS1-70-[0/3] Steinsalz Korngröße 0/3 mit 70 mg Natriumferrocyanid je kg Steinsalz
- VS3-0 Siedesalz fein ohne Antibackmittel
- VS8-80 Siedesalz fein mit 80 mg Natriumferrocyanid je kg Siedesalz

## 6.2.2 Sieblinienvergleich Steinsalz und Siedesalz

Die in Abbildung 34 dargestellten Sieblinien verdeutlichen, dass die Unterschiede hinsichtlich des Vorhandenseins von Antibackmittel vernachlässigbar sind, die in ÖNORM 16811-1 [13] geforderten Kornklassen (Abbildung 35) jedoch nicht eingehalten werden.

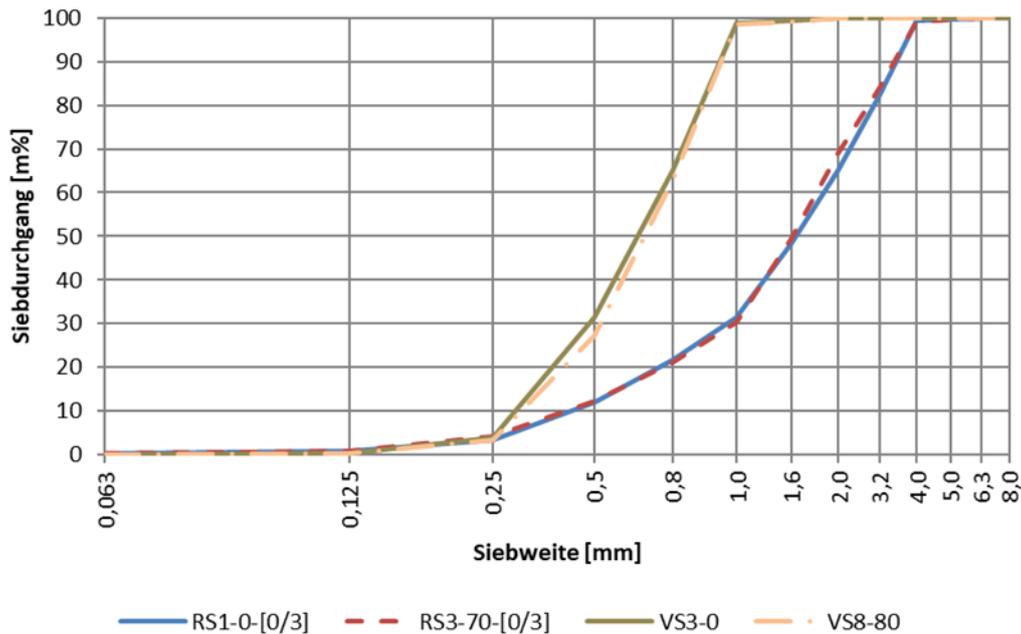


Abbildung 34: Sieblinien Stein- und Siedesalz je mit und ohne Antibackmittel

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 [13] 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 5,0 mm 100	3,15 mm 45 bis 90 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 35: Anforderungen an Sieblinie nach ÖN 16811-1 [13]

### 6.2.3 Prüfprogramm Rieselfähigkeit

Auf Basis der neun verschiedenen Produktkategorien und zwei bis vier untersuchten Feuchtigkeitsgehalte (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 7).

Die in weiterer Folge verwendete Nomenklatur ist der Tabelle 7 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 7: Prüfprogramm Rieselfähigkeit**

Salz	Korngröße [mm]	Antibackmittel	Antibackmittelgehalt [mg/kg]	Probenbezeichnung	Feuchtigkeitsgehalt [%]						Bestimmung [Stk]	Versuche [Stk]
					0	0,05	0,25	0,5	0,75	1,2		
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	biologisch	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
<b>Gesamtsumme Einzelprüfungen [Stk.]</b>											<b>158</b>	

#### 6.2.4 Prüfprogramm Tauleistung mit und ohne Antibackmittel

Die Tauleistung wurde für Tausalze mit und ohne Antibackmittel sowohl für Trockensalz (FS0) und für reine Sole (FS100) ermittelt. Als Einwirkungsdauer 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 8).

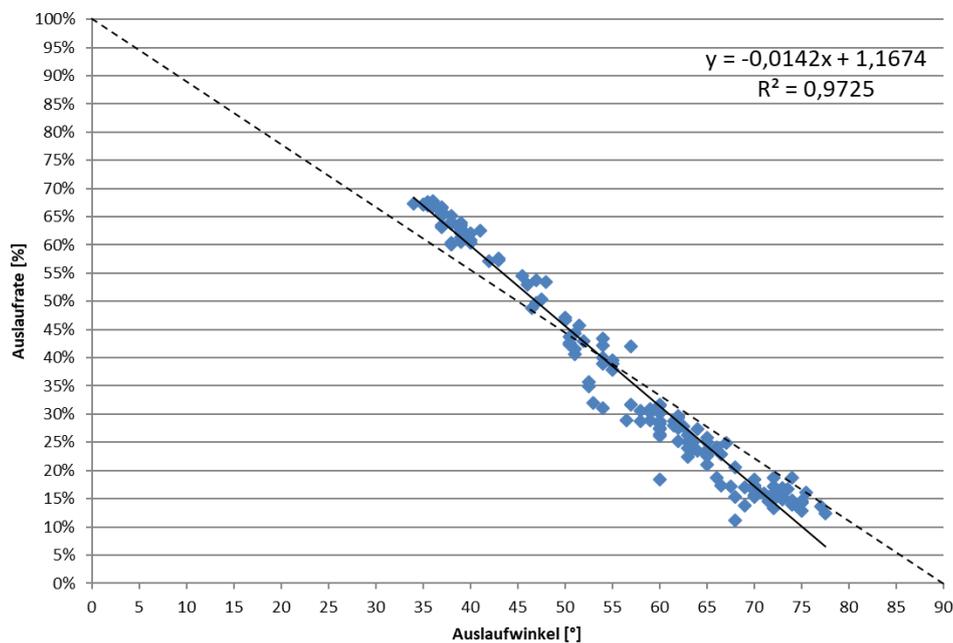
**Tabelle 8: Prüfprogramm Tauleistung mit und ohne Antibackmittel**

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
<b>Gesamtsumme Einzelprüfungen [Stk.]</b>											<b>64</b>	

### 6.3 Ergebnisse Rieselfähigkeit

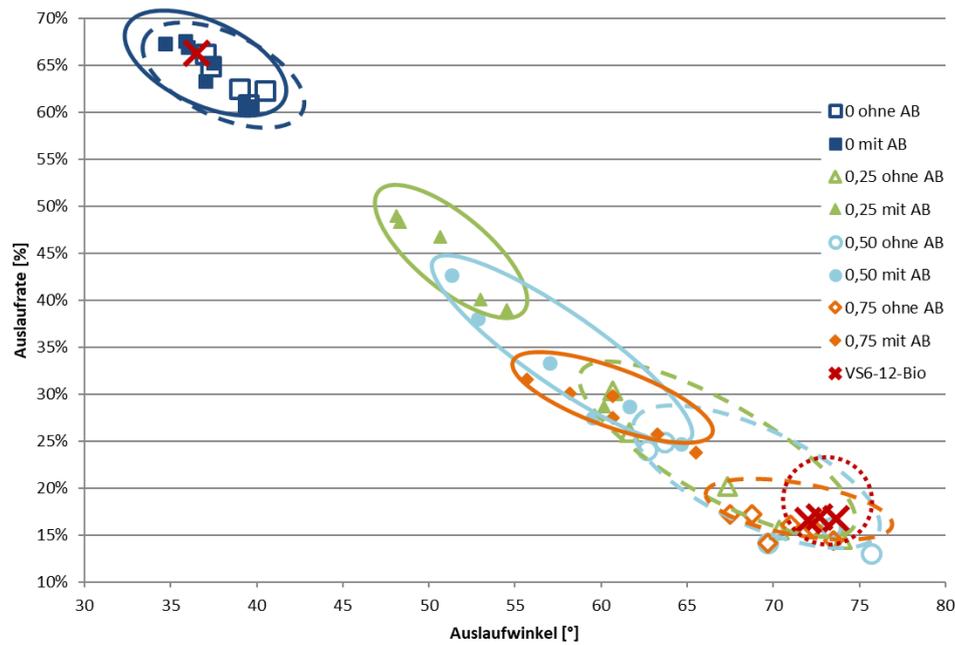
Die Versuchsmethode mit der Auslaufbox nach Sonntag hat sich für die Beurteilung der Rieselfähigkeit von Tausalzen gut bewährt, denn zwischen den Parametern Auslaufrate und Auslaufwinkel besteht eine sehr gute Korrelation. Weiters sind die Unterschiede zwischen dem Vorhandensein von Antibackmittel sowie den verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten deutlich erkennbar (siehe Abbildung 36 und Abbildung 37). Wenn man alle Messergebnisse der Rieserversuche in Form der Auslaufrate und des Auslaufwinkels gegenüberstellt, so sind die in

Abbildung 36 ersichtlichen Datenpunkte zu sehen. Berechnet man den Trend dieser Werte, so ergibt sich folgende Regressionsgerade  $y = -0,0142x + 1,1674$  (Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,97$ ).



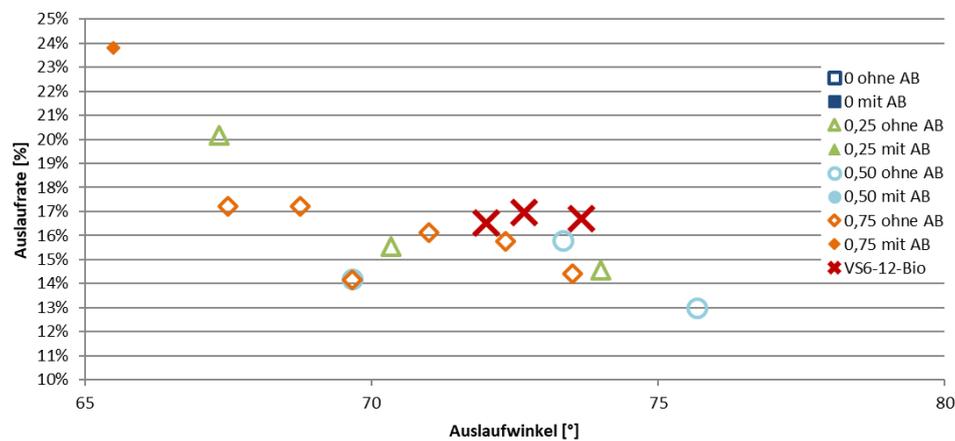
**Abbildung 36: Korrelation der Auslaufrate und des Auslaufwinkels**

Die Abbildung 37 kennzeichnet die Bereiche der Salze mit und ohne Antbackmittel in Abhängigkeit ihres Feuchtegehaltes. Dabei sind die mit durchgehender Linie dargestellten Salze mit Antbackmittel 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 von seinem Feuchtegehalt eine eigene Kategorie bildet.



**Abbildung 37: Zusammenhang der Auslaufrate und des Auslaufwinkels in Abhängigkeit des Antbackmittels und der Feuchtigkeit**

In Abbildung 38 ist der Bereich aus Abbildung 37 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 38: Verhalten des Streusalzes VS6-12-Bio**

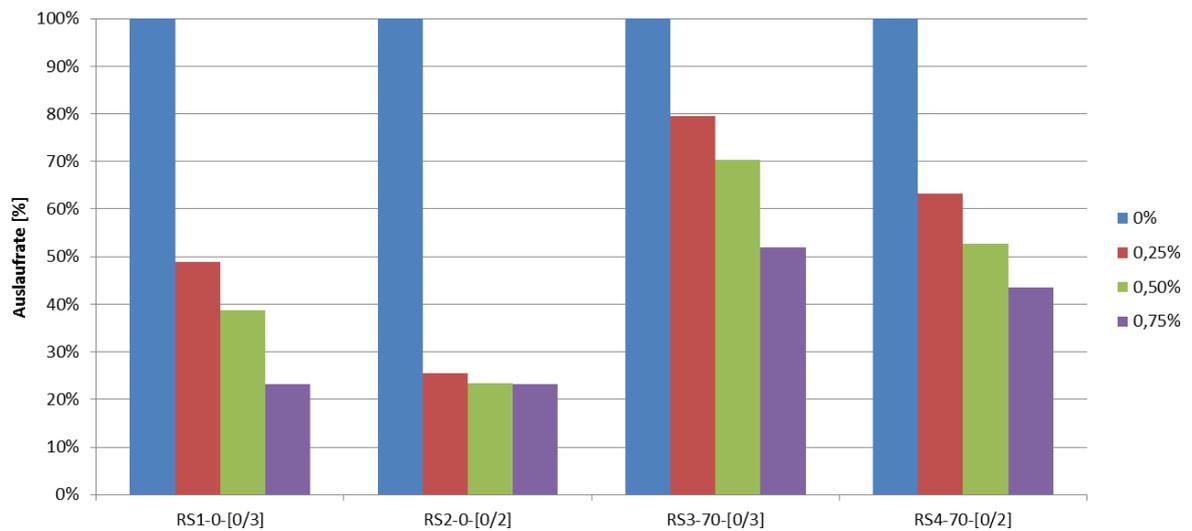
Die Rieselfähigkeit von trockenen Tausalzen ist für alle geprüften Varianten annähernd gleich und somit unabhängig vom Antbackmittelgehalt, wobei Siedesalze, vermutlich wegen der kleineren Korngröße, gegenüber Steinsalzen etwas rieselfähiger sind. Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass der Feuchtegehalt 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 bei höherem Feuchtegehalt stark abnimmt.

Vergleicht man diesen Wert mit dem in der ÖNORM EN 16811-1 [13] 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 Antbackmittel und auf 80 % des Ursprungswertes (-20 Prozentpunkte) mit Antbackmittel hervorruft. Die genauen Werte sind in Tabelle 9 aufgelistet und in Abbildung 39 grafisch ersichtlich. Dabei ist in diesen Grafiken die Auslaufrate ausnahmsweise relativ zur Auslaufrate bei 0 M-% Feuchtigkeit gesetzt. Dementsprechend wird für Ausschreibungen ein möglichst niedriger Feuchtegehalt in der Anlieferung empfohlen.

**Tabelle 9: Auslaufrate bezogen auf den prozentualen Auslauf vollkommener Trockenheit**

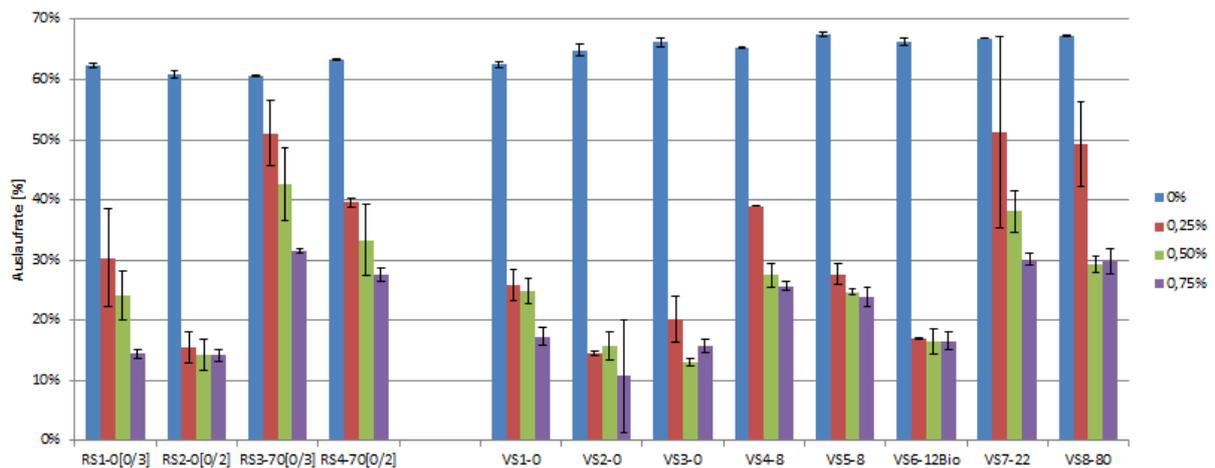
Auslaufrate	0 M%	0,25 M%	0,50 M%	0,75 M%
RS1-0 [0/3]	100%	48,80%	38,70%	23,20%
RS2-0 [0/2]	100%	25,50%	23,30%	23,30%
RS3-70 [0/3]	100%	79,60%	70,30%	52,00%
RS4-70 [0/2]	100%	63,30%	52,70%	43,50%
VS1-0	100%	41,40%	39,90%	27,60%
VS2-0	100%	22,40%	24,30%	24,90%
VS3-0	100%	30,50%	19,60%	23,80%
VS4-8	100%	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%

Die Untersuchungen bestätigen weiters wie Wirkungslosigkeit des biologischen Antbackmittels (VS6-12-Bio) in Hinblick auf die Auslaufrate. Unabhängig vom Feuchtegehalt des Salzes bleibt die Auslaufrate bei knapp einem Viertel des ursprünglichen Wertes (-75 Prozentpunkte). Unter Berücksichtigung der Unsicherheiten sind die Werte mit VS6-12-Bio gleich gut oder schlechter als Salz ohne Antbackmittelzusatz (Tabelle 9).

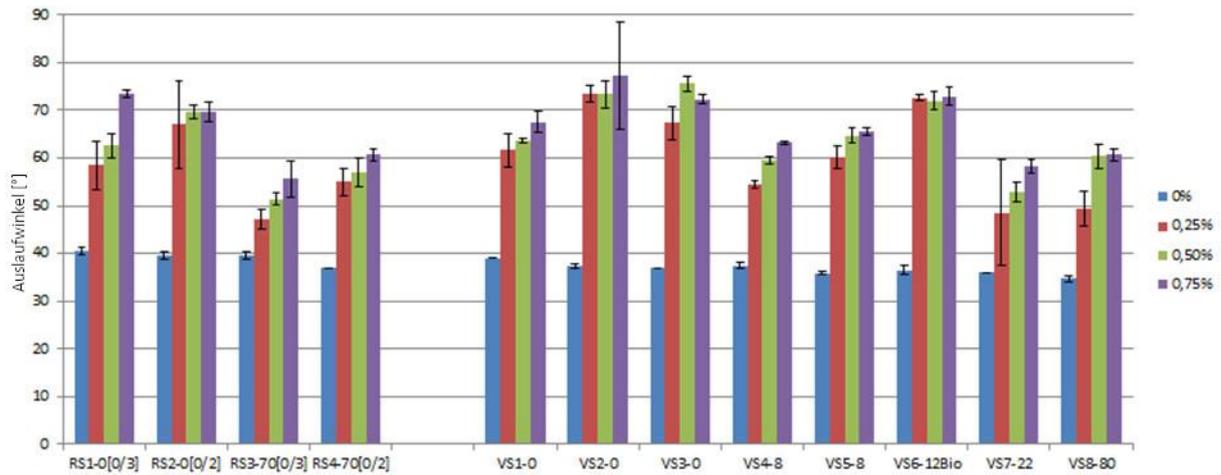


**Abbildung 39: Relative Auslaufrate von Steinsalz bezogen auf vollkommene Trockenheit**

Weiters zeigen Steinsalze mit einem Größtkorn von 2 mm 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  $\geq 22$  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 40 bezüglich der Auslaufrate und in Abbildung 41 bezüglich des Auslaufwinkels dargestellt.



**Abbildung 40: Auslaufraten in Abhängigkeit des Taumittels und der Feuchtigkeit**



**Abbildung 41: Auslaufwinkel in Abhängigkeit des Taumittels und der Feuchtigkeit**

Auf Basis der durchgeführten Prüfungen können die optimalen Antibackmittelgehalte vorerst nur abgeschätzt werden, da keine Tausalze mit anderen Antibackmittelgehalten zur Verfügung standen. Anhand der Abbildung 42 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 ermitteln. Bei Siedesalz liegt dieser Wert bei ca. 20 mg/kg (Abbildung 43), wobei eine deutliche Erhöhung des Antibackmittelgehaltes auf  $\geq 80$  mg/kg keine Verbesserung der Rieselfähigkeit im Vergleich zu 22 mg/kg bringt. Zusätzlich ist in Abbildung 43 das Siedesalz mit der biologischen Antibackmittelalternative hervorgehoben.

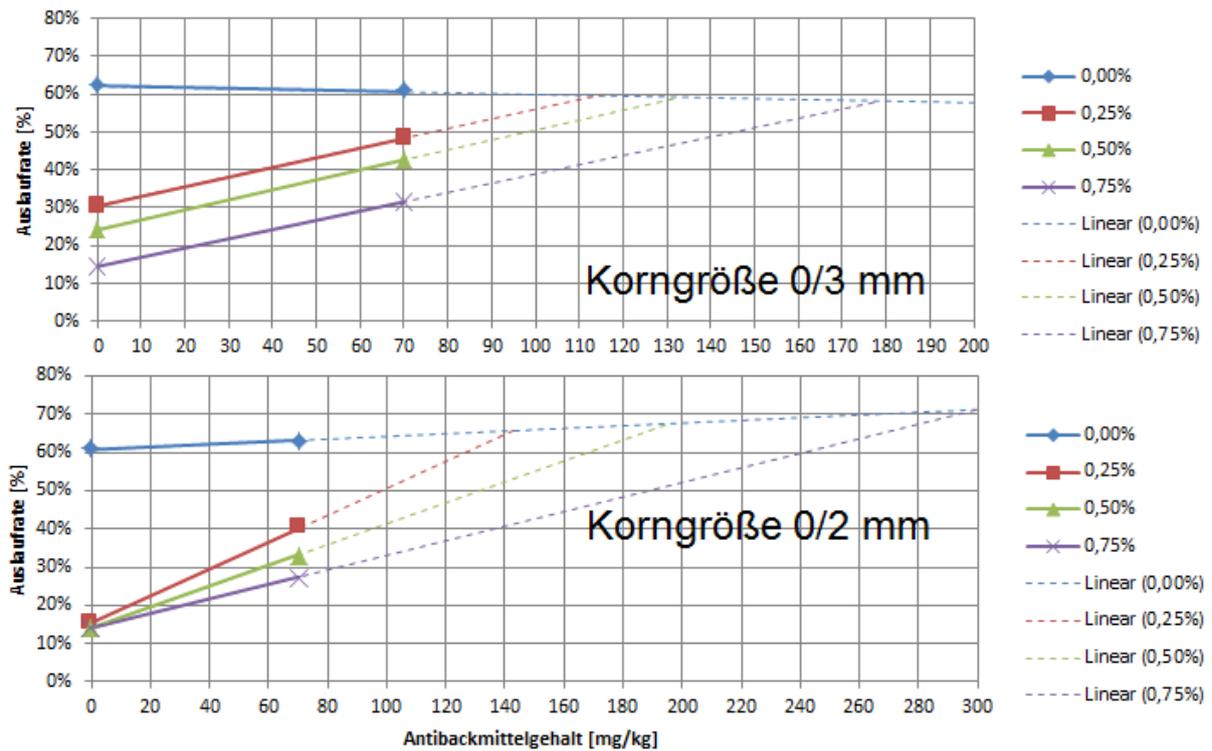


Abbildung 42: Optimum des Antibackmittelgehaltes für Steinsalze [12]

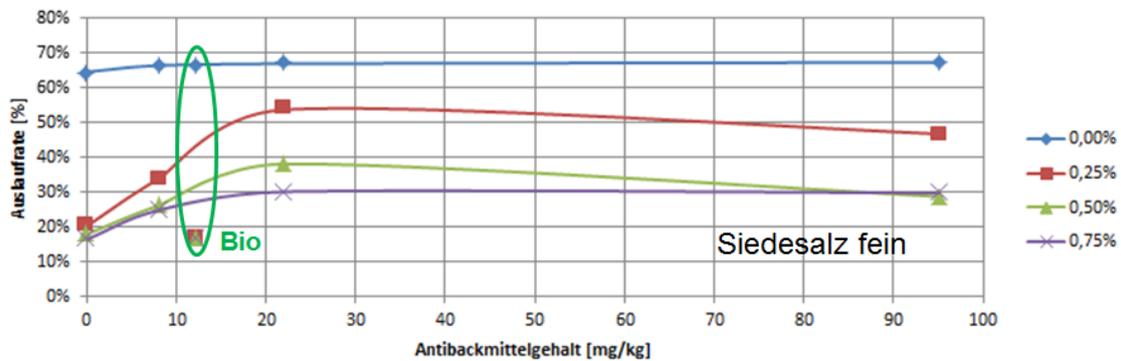


Abbildung 43: Optimum des Antibackmittelgehaltes für Siedesalze [12]

## 6.4 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 44 und Abbildung 45).

In den Versuchen wurde Trockensalz im Ausmaß von ca. 10 g bzw. reine Sole (20%-NaCl-Lösung) mit ca. 12 g auf eine definierte Eisplatte aufgebracht und das dadurch getaute Eis nach 60 bzw. 240 Minuten Einwirkzeit abgossen. Der Quotient aus der Menge des aufgebrauchten Salzes bzw. der aufgebrauchten Sole und der Menge des getauten Eises entspricht der Tauleistung (in Abhängigkeit von 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 Antbackmittelgehalt unabhängig ist. Als reines Trockensalz (FS0) würden die Ergebnisse auf eine bessere Leistung des Salzes mit Antbackmittel hindeuten, wobei aufgrund der bereits genannten Verunreinigung der Unterschied nicht eklatant sein dürfte. Siehe dazu Abbildung 44.

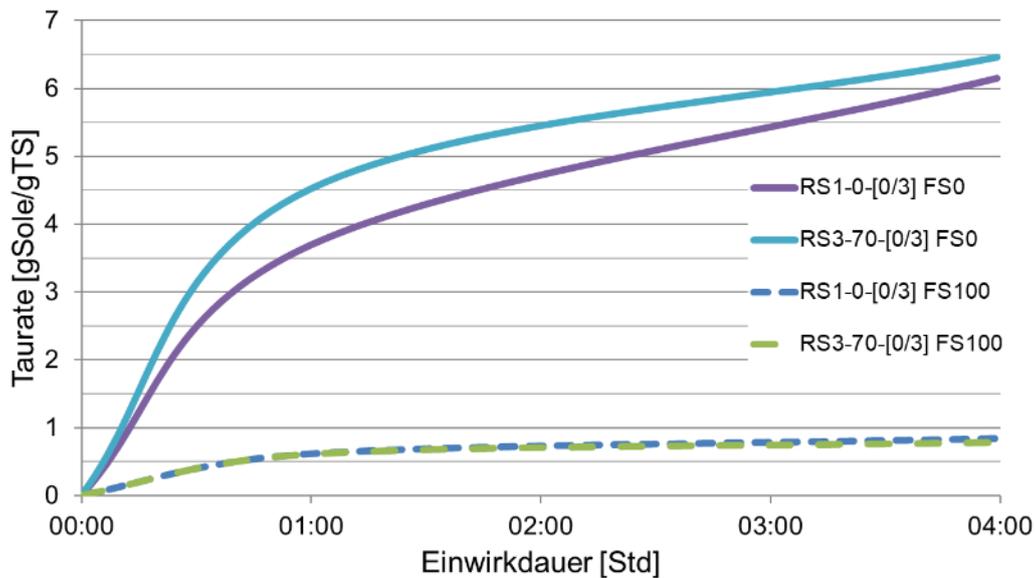


Abbildung 44: Tauleistung Steinsalz FS0 und FS100 mit und ohne Antbackmittel

Auch die Tauleistung von Siedesalz (Abbildung 45) weist bezüglich des Vorhandenseins von Antbackmittel keinen relevanten Unterschied auf. Dies gilt sowohl für Trockensalz FS0 als auch für reine 20%-NaCl-Sole FS100.

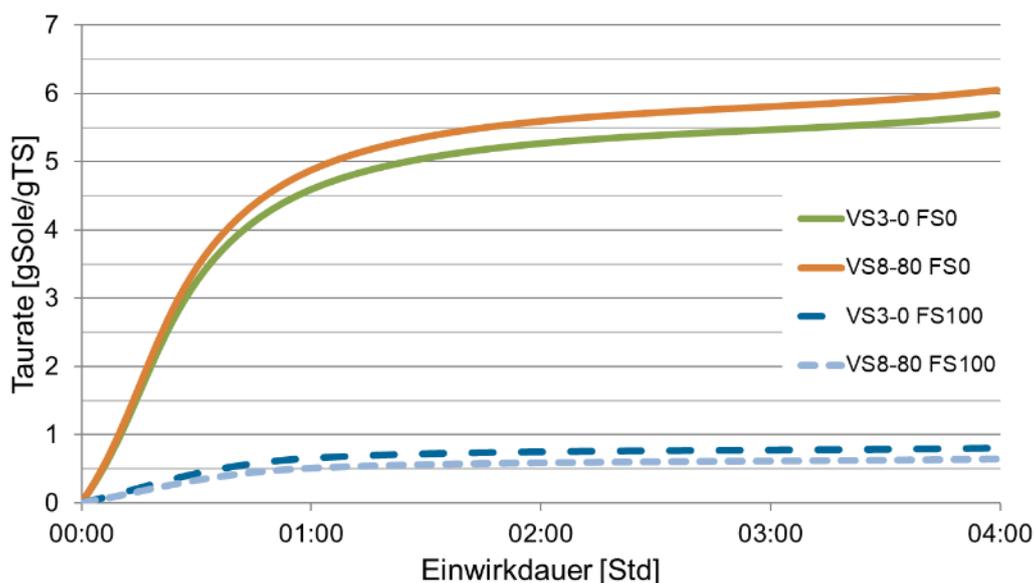
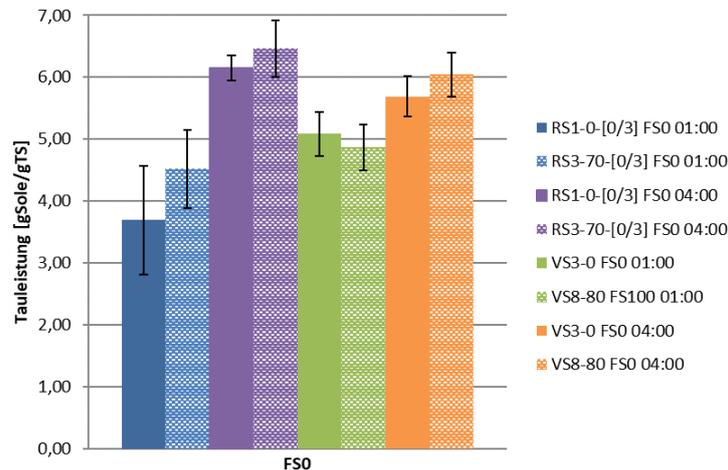


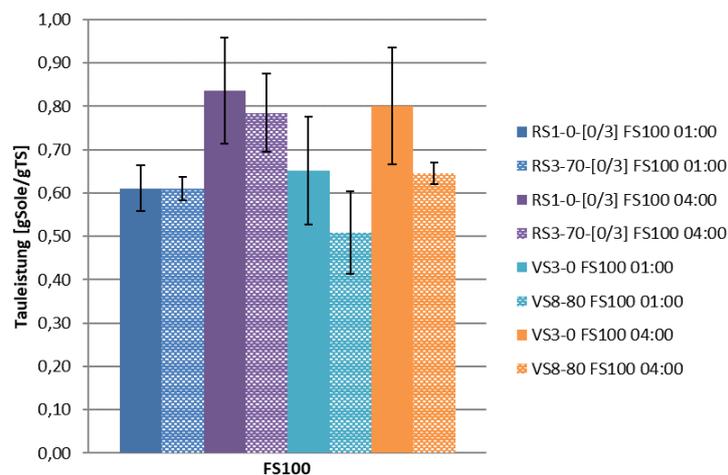
Abbildung 45: Tauleistung Siedesalz FS0 und FS100 mit/ohne Antbackmittel

Aus Abbildung 46 lassen sich zwei zentrale Erkenntnisse für Trockensalz FS0 ableiten. Erstens hat das Vorhandensein von Antibackmittel keinen Einfluss auf die Tauleistung 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 repräsentieren.



**Abbildung 46: Tauleistung FS0 mit und ohne Antibackmittel für 60 und 240 Minuten**

Abbildung 47 zeigt dasselbe Verhalten der Salze als 20%-NaCl-Sole (FS100) bezüglich des Antibackmittelgehalts. Unterschiedliches Verhalten lässt sich jedoch bei der Tauleistung hinsichtlich der Einwirkungszeit feststellen. Diese ist in gelöster Form annähernd konstant innerhalb der Schwankungsbreite.



**Abbildung 47: Tauleistung FS100 mit/ohne Antibackmittel für 60 und 240 Minuten**

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

- Im Vergleich zum reinen Trockensalz ist die Tauleistung annähernd halb so hoch
- Stein- und Siedesalz verhalten sich in Lösung ungefähr gleich

Aus dem Vergleich der Tauleistungen in Abbildung 48 für Steinsalz und Abbildung 49 für Siedesalz jeweils für Trockensalz und reine Sole können diese Zusammenhänge nachvollzogen werden.

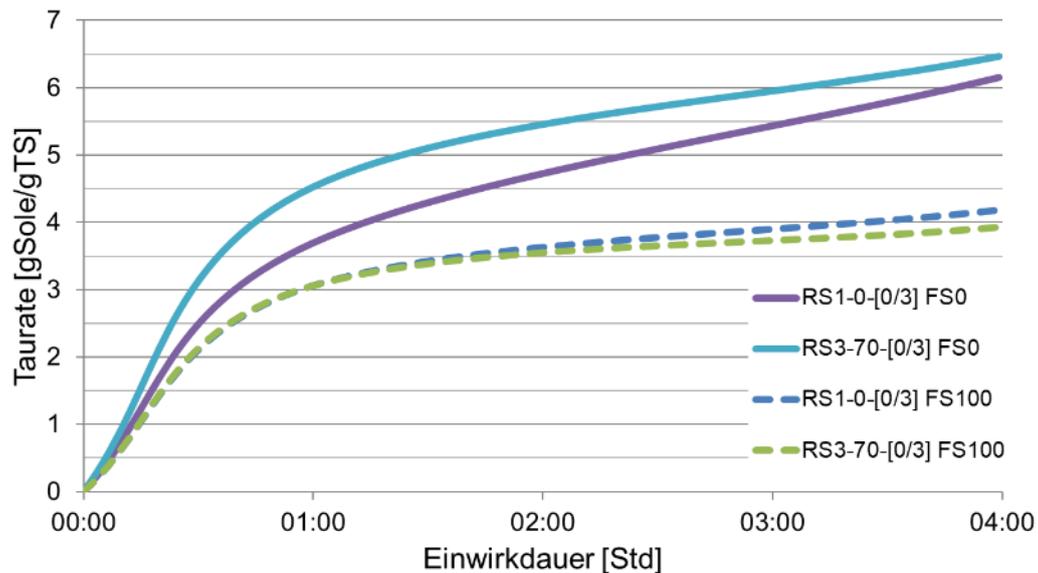


Abbildung 48: Tauleistung Steinsalz auf tatsächlichen Salzgehalt rückgerechnet

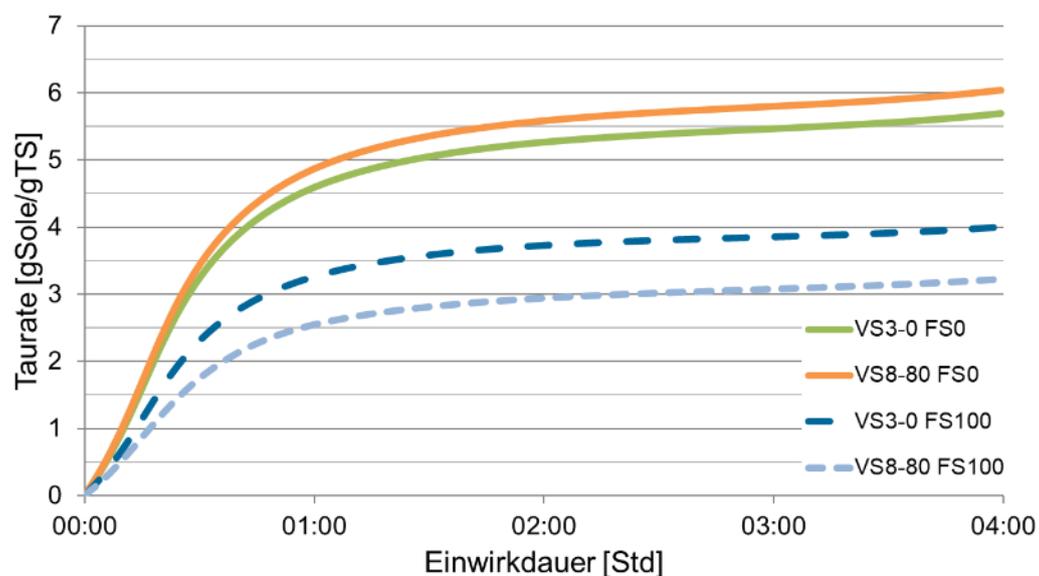


Abbildung 49: Tauleistung Siedesalz auf tatsächlichen Salzgehalt rückgerechnet

## 6.5 Zusammenfassung

Die Versuchsmethode mit der Auslaufbox nach Sonntag hat sich gut bewährt, die Prüfergebnisse, ausgedrückt durch die Auslaufrate und den Auslaufwinkel, zeigen deutliche Unterschiede in Bezug auf den Einfluss von Antibackmittel- und Feuchtegehalt. Dabei hat sich für eine **ausreichende Rieselfähigkeit ein unterer Grenzwert von 20 mg Antibackmittel pro kg Siedesalz als geeignet** erwiesen. Eine **Erhöhung des Antibackmittelgehaltes auf 80 mg/kg hat jedoch kaum eine Verbesserung** bewirkt. Siedesalz mit der **biologischen Alternative** zu Natriumferrocyanid weist selbst bei geringen Feuchtigkeitsgehalten dieselben bzw. schlechtere Ergebnisse im Vergleich zu 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.

## 7 Räumqualität

### 7.1 Inhalt und Methodik

Das Arbeitspaket Räumqualität beinhaltet eine Umfrage zu österreichischen Pflugsystemen 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. Zusätzlich wurde mit den Projektpartnern vereinbart, die jeweiligen Aufzeichnungen zu den Bestellvorgängen von Räumleisten auszuwerten, um den mittleren Verbrauch bzw. die Kosten in Abhängigkeit von der Lebensdauer abschätzen zu können.

### 7.2 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 gestaltet und war im Zeitraum von Juli 2017 bis Jänner 2018 offen für die Beantwortung. Zusätzlich wurden die jeweiligen Verantwortlichen in den Straßen- bzw. Autobahnmeistereien entsprechend angeschrieben bzw. durch die Projektpartner auf die Umfrage aufmerksam gemacht. Wesentliche Kennzahlen bzw. Parameter der Umfrage waren:

- Meisterei (Bundesland, Postleitzahl, Ort, Adresse, Kontaktperson, Telefonnummer)
- Betreute Netzlänge [km]
- Betreute Fläche [m<sup>2</sup>]
- Anzahl Räumrouten [Stk.]
- Anzahl Räumfahrzeuge [Stk.]
- Pflughersteller und 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 Einsatzdaten (Einsatzzeit, Räumlänge) möglich [ja/nein]

### 7.2.1 Teilnehmer

Insgesamt haben 132 Meistereien an der Umfrage teilgenommen, davon 94 aus den Bundesländern und 38 der ASFINAG. Für die Auswertung standen somit die Daten von 1.748 Pflügen zur Verfügung, welche hauptsächlich aus Niederösterreich, Wien, Oberösterreich und der Steiermark stammen. In nachstehender Abbildung 50 ist die Anzahl der teilnehmenden Straßen- und Autobahnmeistereien sowie die Anzahl der Pflüge je Bundesland dargestellt.

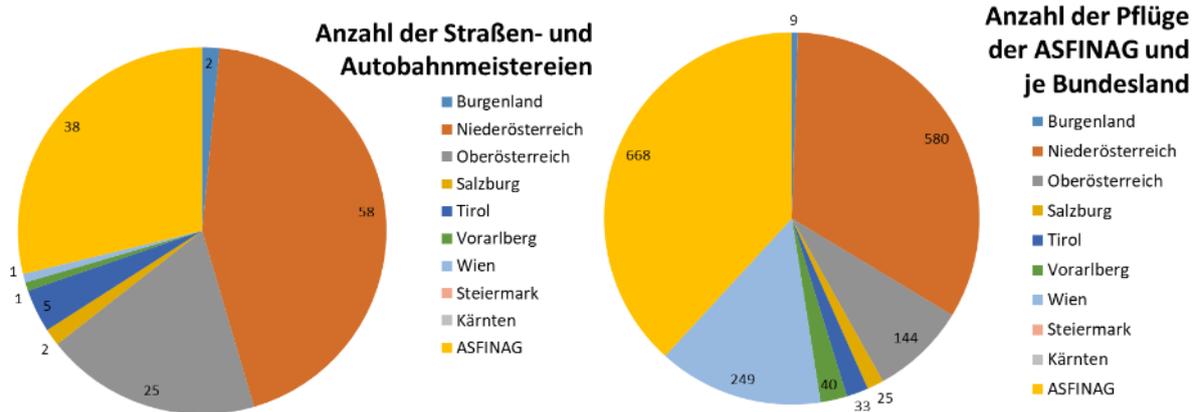


Abbildung 50: Meistereien und Pflüge je Bundesland

### 7.2.2 Pflug- und Räumleistenhersteller

Wie aus Abbildung 51 ersichtlich, stammt die überwiegende Anzahl der im Projekt von den Straßenerhaltern gemeldeten Pflüge in Österreich von den Herstellern Kahlbacher, Springer, Hydrac und Flötzinger. Die Räumleisten werden dagegen meist von den Herstellern Küper, Voest, Größbauer und Mutter bezogen.

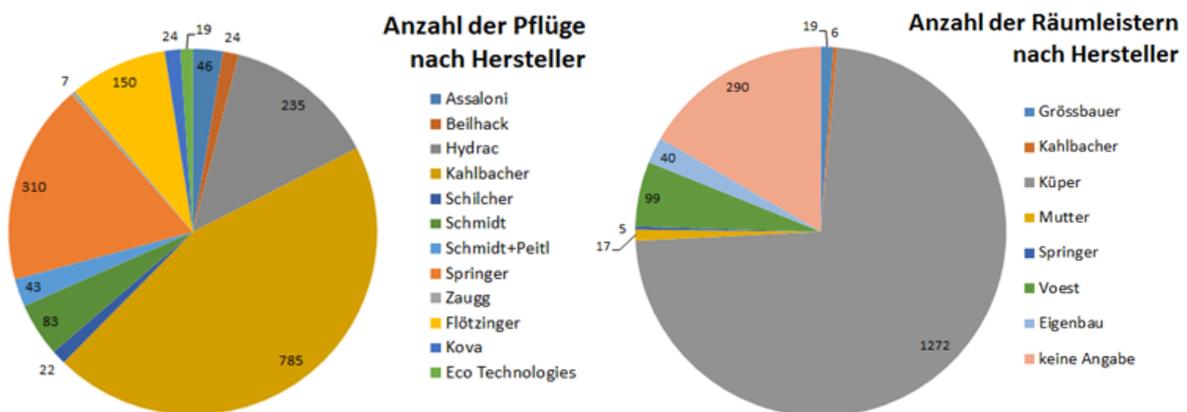


Abbildung 51: Pflug- und Räumleistenhersteller

Die Anteile der Pfluglieferanten je Bundesland bzw. der ASFINAG sind in der nachstehenden Abbildung 52 nochmals spezifisch ausgewertet.

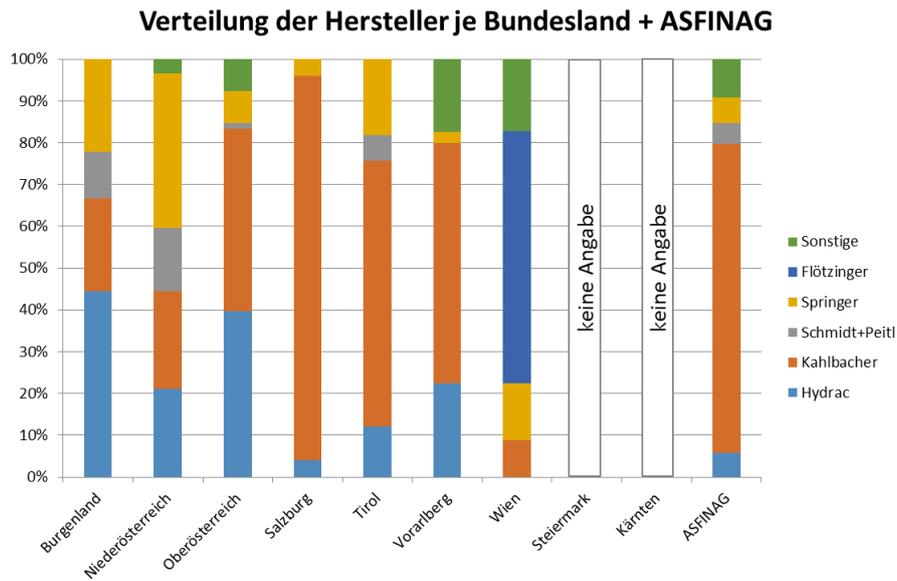


Abbildung 52: prozentuelle Aufteilung der Pflugerhersteller je Bundesland

### 7.2.3 Sonstige Erkenntnisse

Ergänzend wurden die Zusatzausrüstungen der jeweiligen Pflüge abgefragt, wobei Stützräder, Nachräumeleisten, Pflugentlastung und Gleitkufen am häufigsten angegeben wurden. Wie beispielsweise im ersten Balken der Abbildung 53 ersichtlich, gaben die Befragten an, dass annähernd 11 % der Pflüge mit einer Pflugentlastung ausgestattet sind. Weiters wurde für 6 % angegeben, dass keine Pflugentlastung vorhanden sei und zum überwiegenden Anteil von 83 % wurden keine Angaben gemacht.

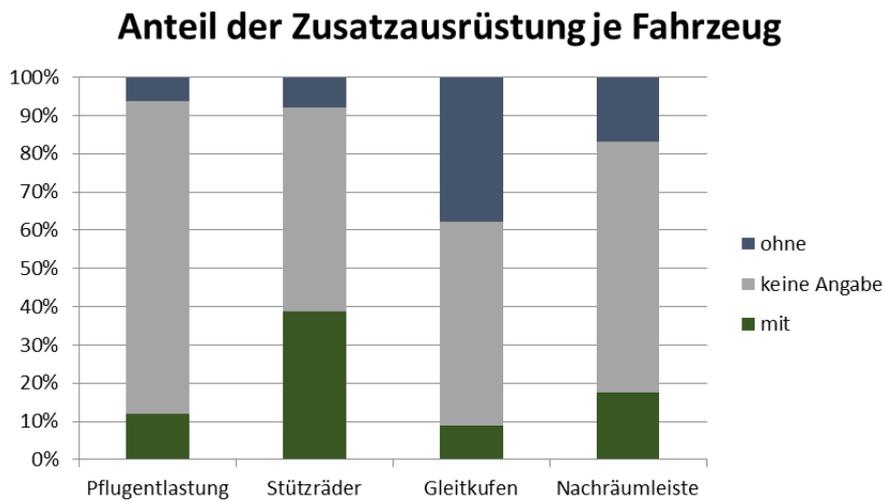
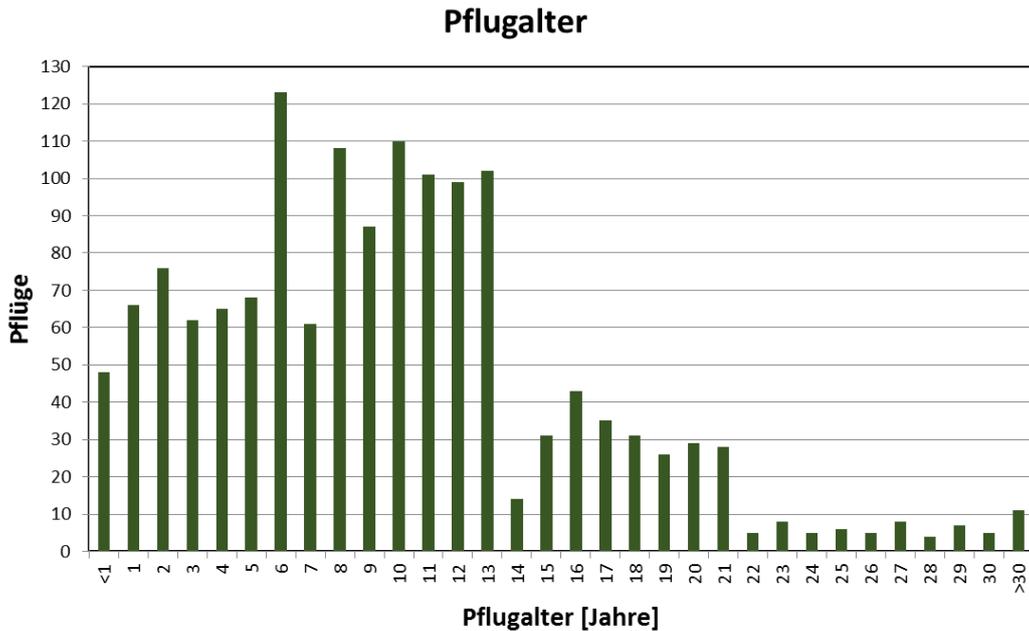


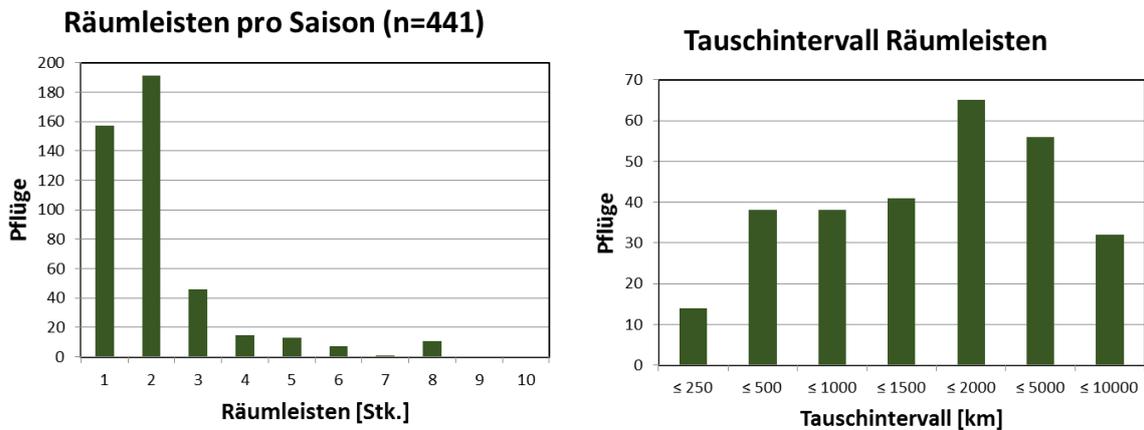
Abbildung 53: prozentueller Anteil an bestimmter Zusatzausrüstung

Die in Abbildung 54 dargestellte Altersverteilung der Pflüge zeigt eine für Altersverteilungen typisch rechtsschiefe bzw. linkssteile Verteilung. Weiters lässt sich aus den Daten ein Medianwert von neun Jahren für das Pflugalter ableiten. Zudem sind insgesamt 92 % der Pflüge nicht älter als 20 Jahre.



**Abbildung 54: Aufteilung des Pflugalters**

Sowohl die Anzahl der Räumleisten pro Saison als auch deren Tauschintervall ausgedrückt in Kilometern wurden von den Straßenmeistereien nicht erfasst und daher von den Befragten nur als Schätzung angegeben, was eine Ursache der breiten Streuung sein dürfte. Weiters ist die Abnutzung der Räumleisten von sehr vielen Faktoren wie etwa Straßenzustand, Witterung, Geschwindigkeit, Anpressdruck abhängig, weshalb ein direkter Vergleich der Kilometerleistung von Räumleisten ohne statistische Bereinigung dieser Faktoren nicht zielführend ist. In der nachstehenden Abbildung 55 zeigt sich dieser Umstand insbesondere in der Darstellung des Tauschintervalls. Die Anzahl der Räumleisten pro Saison liegt üblicherweise zwischen ein bis drei Räumleisten(-sätze), wobei ein Räumleistensatz je nach Länge und Anzahl an Pflugscharen aus einer oder mehreren Segmenten besteht.



**Abbildung 55: Räumleistenverbrauch und Tauschintervall**

## 7.2.4 Auswahl Pflug- und Räumleisten für Feldversuche

Auf Basis der Online-Umfrage wurden die am häufigsten vertretenen Pflugtypen und Räumleisten ausgewählt und die Ergebnisse anschließend in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgelistet. davon sind einzelne Modelle bzw. Zusatzausrüstungen auf Abbildung 56 und Abbildung 57 ersichtlich.

**Tabelle 10: Auswahl Pflüge für Feldversuche [technische Details lt. Herstellerdatenblätter]**

Hersteller	Typ	Räumbreite [mm]	Anmerkungen
Kahlbacher	STS 340	3150-3380	mit /ohne Pflügentlastung
Kahlbacher	STS 300	2750-2945	mit/ohne Nachräumleiste
Springer	SHE 3404	3000-3450	Stützräder, mit/ohne Nachräumleiste
Hydrac	SL-IV-360	3060-3600	Stützräder
Flötzinger	DKV-A	1600-2700	Großstadtmodell
Springer	SHL 3204-2	2770-3200	Nachräumklavier

**Tabelle 11: Auswahl Räumleisten für Feldversuche**

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

Bei Schneepflügen kann in Keilpflüge und Schneepflüge mit gerader Schar unterschieden werden (Abbildung 56). Keilpflüge bestehen aus zwei schräg gestellten Schneeschildern, die den Schnee beidseitig an den Straßenrand befördern. Aufgrund der begrenzten Steuerbarkeit des Schneeauswurfes wird dieser Pflugtyp in der Regel nur mehr an untergeordneten bzw. einspurigen Straßen im kommunalen Bereich verwendet. Schneepflüge mit gerader Schar sind schwenkbar und werden in Schrägstellung geführt, um den Schnee auf die jeweils rechte Spur bzw. den rechten Fahrbahnrand auszuwerfen. Am hochrangigen Netz werden sie vielfach in Kombination mit einem Seitenpflug am Winterdienstfahrzeug geführt, um die Räumbreite zu erhöhen. Dazu gibt es eine Reihe von Sonderbauweisen wie den Teleskoppflug, bei dem die Pflugscharen seitlich ausfahrbar sind. Kann aufgrund zu großer Schneehöhe oder zu schwerem Schnee keine ausreichende Räumleistung erzielt werden, kommen Schneefräsen für eine

erste Räumung zum Einsatz. Diese werden auch eingesetzt, wenn der am Pannen- bzw. Seitenstreifen oder Bankett liegende Schnee zu entfernen ist (z.B. über eine Lärmschutzwand).



**Abbildung 56: v.l.n.r. Flötzing DKV-A und Springer SHL 3204 mit Nachräumklavier**

Bei den Räumleisten unterscheidet man hauptsächlich zwischen Stahlleisten und Kombinationsleisten (Abbildung 57). 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 auch wirtschaftliche Aspekte eine wesentliche Rolle. So wird eine reine Stahlleiste aufgrund geringerer Härte zwar in der Regel schneller abgenutzt sein, dafür ist aber der Anschaffungspreis geringer. Kombinationsleisten versprechen dagegen eine längere Lebensdauer, eine geringere Lärmentwicklung und Schonung der Straßenoberfläche. In einer ganzheitlichen Betrachtung ist zudem der Einsatzbereich und der Zeitaufwand zum Wechseln der Räumleisten sowie die sich daraus ergebenden Personalkosten zu bedenken.



**Abbildung 57: v.l.n.r. Kombinationsräumleiste und Nachräumleiste**

## 7.3 Prüfprogramm Restschneemenge

In diesem Arbeitspaket sollte ein Verfahren und Prüfprogramm entwickelt werden, das die Ermittlung und den Vergleich des auf der Fahrbahn verbleibenden Restmaterials auf einer Testfläche 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 an ausgewählten Modellen zu erfassen. Hauptaugenmerk dieses Arbeitspaketes lag jedoch auf der Entwicklung eines geeigneten Prüfverfahren für Schnee und für Schneeersatzmaterial, um witterungsunabhängige und wiederholbare Laborversuche zu ermöglichen.

### 7.3.1 Beschreibung Haupt- und Vorversuch

Zur Ermittlung der Räumleistung bzw. der Restschneemenge nach der Räumung ist eine für den Verkehr abgesperrte Fläche vorzuhalten, um risikolos einen Straßenzustand entstehen zu lassen, der für die Untersuchung der Schneeräumleistung geeignet ist. Auf der mit Schnee bedeckten Versuchsfläche werden, je nach Anzahl der Pflüge, mehrere Teilbereiche mit je 3,5 x 5,0 m Abmessung definiert und gekennzeichnet, welche von den ausgewählten Pflugsystemen bei Überfahrt mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 30 km/h und gleicher Schildstellung geräumt werden sollen (siehe Abbildung 58). Der erste Durchlauf wird ohne Einsatz, der zweite mit Einsatz von Zusatzausrüstung wie Pflugentlastung oder Nachräumleiste etc. durchgeführt, um deren Wirkung unter vergleichbaren Bedingungen zu untersuchen.

Um eine erste optische Aussage über die Räumqualität tätigen zu können, wird der Oberflächenzustand sowohl vor, als auch nach der Schneeräumung auf der definierten Versuchsfläche mittels Fotos dokumentiert. Für eine genauere Beurteilung ist der nach der Räumung auf einer Fläche von 3,0 x 1,0 m (in der 3,5 x 5,0 m Testfläche) verbleibende Restschnee einzukehren bzw. falls notwendig zu schmelzen und mittels Nasssauger aufzunehmen und zu wiegen. Gemäß der ersten Versuchskonzeption sollte mit dieser Vorgehensweise ein Vergleich der Effizienz der Pflugsysteme und ihrer Zusatzausrüstung möglich sein. Um die Durchführung dieser Versuche möglichst einfach und flexibel zu gestalten, war geplant, diese mit ausgewählten Straßenmeistereien vor Ort durchzuführen. Nach entsprechender Vorabstimmung mit den Auftraggebern wurden ausgewählte Meistereien vor dem Winter 2018/19 kontaktiert und um ihre Mitarbeit ersucht.

Zusätzlich wurden Vorversuche außerhalb der Räumseason mit Schneeersatzmaterial durchgeführt, da die Verfügbarkeit von Schneepflügen und Winterdienstmitarbeitern gerade bei Schneefall erfahrungsbasiert stark eingeschränkt ist. In diesen Vorversuchen wurde dieselbe Vorgehensweise beibehalten, für die Räumqualität der Pflüge wurde jedoch anstatt Schnee Sand bzw. Trockenschüttmaterial verwendet. Ziel dabei war es, mögliche Schwachstellen in der Versuchsdurchführung bereits vorab zu identifizieren und die Hauptversuche effizienter und weniger zeitintensiv zu gestalten. Da der Winterdienst ohnehin eine Engpassleistung des Straßenbetriebes darstellt, sollte dadurch weiters die Mannschaft der Meistereien so wenig wie möglich bei den Hauptversuchen beansprucht werden.

Eine Kernfrage der Vorversuche war die Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Hinblick auf die Eignung des Schneersatzmaterials. Weiters ging es darum, den Arbeits- und Materialaufwand für diese Vorversuche auszuloten, um diese in die Versuchsplanung miteinbeziehen zu können. Geht man von der geplanten Versuchsfläche von 3,5 x 5,0 m aus und schüttet z.B. Sand der Korngruppe 0/1 (Dichte ca. 1400 kg/m<sup>3</sup>) als Ersatzmaterial auf eine Höhe von ungefähr 1 cm, so benötigt man für einen einzelnen Versuch knapp 250 kg Material. Aufgrund dieser Aufwandsschätzungen wurde für die Vorversuche mit Ersatzmaterial eine leicht reduzierte Anordnung und Versuchsfläche umgesetzt, bei dem nur die Räumqualität von zwei Pflügen untersucht wurde.

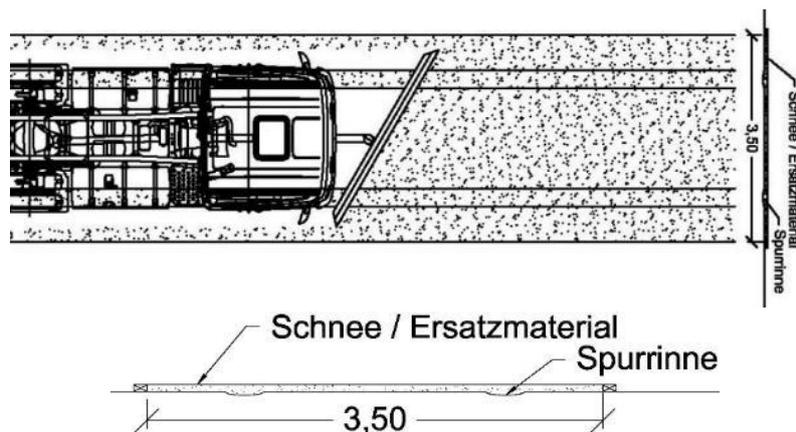


Abbildung 58: Methodik zur Beurteilung der Räumqualität

### 7.3.2 Erprobung der Methodik für den Hauptversuch mit Schnee

Um die Eignung verschiedener Ansätze zur Restschneeaufnahme zu prüfen, wurden ebenfalls eine Reihe von Vorversuchen durchgeführt. In weiterer Folge wurden insbesondere die folgenden zwei Methoden zur Schneeaufnahme eingehender getestet.

#### Methode 1: Händische Aufnahme & Nassstaubsauger

Für die Erprobung der ersten Methode wurde eine abgesperrte Teilfläche eines Parkplatzes mit Asphaltoberfläche vorgehalten. Zur Simulation der Räumung durch den Pflug bei ausreichender Schneebedeckung erfolgte eine händische Räumung (Abbildung 59a und b). Zur Räumung der in der Textur der Asphaltoberfläche bzw. darüber verbliebenen Restschneemengen war ein Nassstaubsauger mit anschließender Wägung der Restschneemengen vorgesehen. In der konkreten 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 59c und d). Daher wurde für die weiteren Vorversuche erwogen, die Restschneemasse mittels Gasbrenngerät oder ähnlicher Hitzequelle zu tauen und anschließend mit dem Nasssauger aufzunehmen.



a) nicht geräumtes Feld

b) Feld nach händischer Vorräumung

c) Feld nach Räumung mit Nasssauger

d) verstopftes Saugrohr

**Abbildung 59: Vorversuch Schneeaufnahme: a) nicht geräumte; b) nach händischer Vorräumung; c) nach Räumung mit Nasssauger; d) verstopftes Saugrohr**

Zusätzlich wurde die rein manuelle Aufnahme der Restschneemasse mittels Schaufel, Besen und Eiskratzer getestet. Wie in Abbildung 60c 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. Dies ist insofern wesentlich, als es aufgrund der zu erwartenden Versuchsunsicherheit eine Reihe von Versuchswiederholungen benötigt, um statistisch signifikante Unterschiede zwischen der Räumleistung der einzelnen Pflüge zu ermitteln.



a) nicht geräumtes Feld

b) Feld nach händischer Vorräumung



c) Feld nach händischem Einkehren

d) Ermittelte Restschneemenge

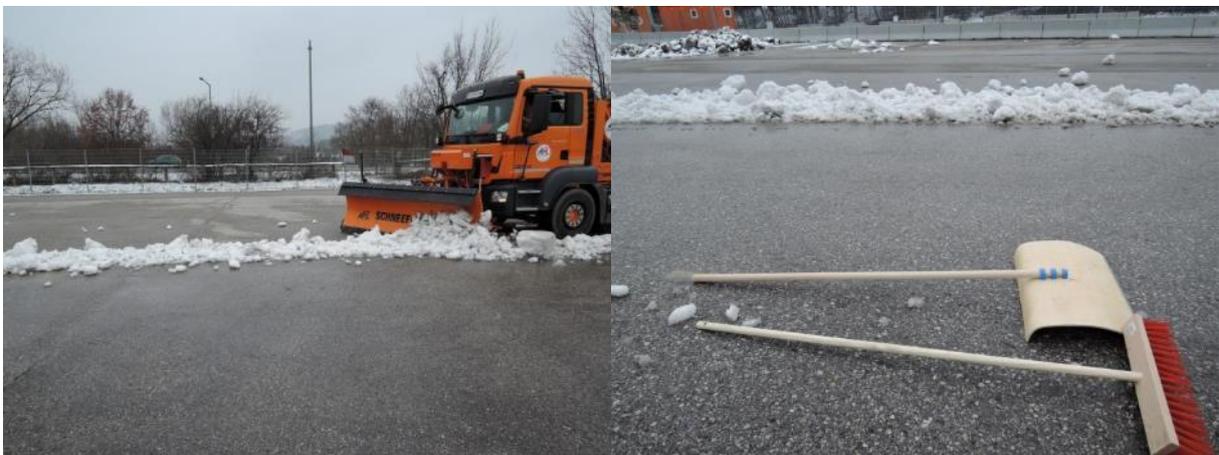
**Abbildung 60: Vorversuch Schneeaufnahme: a) nicht geräumt; b) nach händischer Vorräumung; c) nach händischem Einkehren; d) Restschnee**

Ein weiterer Vorversuch unter mäßig geeigneten Bedingungen am Mistplatz Wien-Auhof der MA48 erfolgte bei +1 °C Boden- und Lufttemperatur mit dem Schneepflug Flötzinger DK-V mit Stahlräumleiste (siehe Abbildung 61). Nach der Räumfahrt blieb ein deutlich sichtbarer Schneematsch zurück, das Einkehren war größtenteils möglich, es verblieb lediglich Wasser bzw. geschmolzener Schnee auf der Fahrbahn. Zur Bestimmung der Restschneemenge bei festgefahrenem und in die Textur der Oberfläche gedrückttem Schnee ist jedenfalls ein vorheriges Schmelzen und Aufnahme z.B. mittels Nasssauger notwendig.



**Abbildung 61: Vorversuch Schneeaufnahme am Mistplatz Wien-Auhof - Flötzinger DK-V**

Der zweite Räumversuch wurde mit einem Springer SHL 3204 mit Kombileiste und Nachräumklavier durchgeführt (Abbildung 62). Nach der Räumfahrt war nur Wasser in der Oberflächenstruktur, jedoch kein Schneematsch festzustellen. Somit war in diesem Fall ein reines Einsaugen ohne vorheriges Erhitzen möglich. Einschränkend ist jedoch anzumerken, dass bei Minusgraden jedenfalls ein Tauen vor einer Aufnahme nötig wäre. Des Weiteren konnte in dem Vorversuch beobachtet werden, wie der vom Räumschild nicht abtransportierte Schnee größtenteils von der Nachräumleiste entfernt wurde.



**Abbildung 62: Vorversuch Schneeaufnahme am Mistplatz Wien-Auhof – Springer SHL 3204**

## **Methode 2: Mechanische Aufnahme**

Zudem wurde die Eignung zur Restschneeaufnahme durch ein Pflastermörtelreinigungsgerät, dem sogenannten Schwammfix der Firma Pergo-Tools, geprüft. Dieses Gerät wurde ursprünglich zur schonenden Reinigung von Pflasteroberflächen nach dem erstmaligen Verfugen entwickelt. Dabei wird ein durchgehender Schwamm über die Oberfläche geschoben, der überflüssige Fugenmörtel aufgesaugt und anschließend automatisch in einen Auffangbehälter ausgepresst. Diese Systematik wurde zur Restschneeaufnahme adaptiert und im Winter 2017/18

erstmalig getestet. Das Gerät war wider Erwartungen nicht in der Lage den Schnee aufzunehmen, stattdessen wurde der Schnee weiter in die Textur der Oberfläche gedrückt und kaum Schnee aufgenommen (siehe Abbildung 63). Daher wurde diese Methodik zur Ermittlung der Restschneemengen wieder verworfen.



**Abbildung 63: Vorversuch Schneeaufnahme mit Schwammfix von Pergo-Tools**

### 7.3.3 Vorversuche mit Schneersatzmaterial

Wie einleitend beschrieben, wurden auch Versuche mit Ersatzmaterial durchgeführt, um witterungsunabhängige Vergleiche zu ermöglichen. Nach der Recherche wurden vier unterschiedlichen Materialien für die Vorversuche ausgewählt:

- Löschschaum ( $85 \text{ kg/m}^3$ )
- Wärmedämmschüttung (ca.  $85 \text{ kg/m}^3$ )
- Trockenschüttung (ca.  $550 \text{ kg/m}^3$ )
- Sand (ca.  $1500 \text{ kg/m}^3$ )

Die Dichte von frisch gefallenem Schnee hängt u.a. von der Temperatur und anschließenden Verfrachtung ab und liegt im Vergleich dazu bei ca.  $100 \text{ kg/m}^3$ . Wird der Schnee festgefahren oder der Restschnee bei der Räumung festgepresst ist mit Dichten von  $200 - 300 \text{ kg/m}^3$  und mehr zu rechnen. Im Folgenden sollen der Ablauf und die Ergebnisse der Versuche mit den verschiedenen Schneersatzmaterialien genauer beschrieben werden.

#### **Methode Löschschaum**

Die einfache Möglichkeit der Herstellung von Löschschaum und seine Eigenschaften im Hinblick auf seine Konsistenz, welche ein leichtes Aufbringen und eine selbstständige Verteilung gestatten, ließ auf gute Eignung als Ersatzmaterial schließen. Eine genaue Dosierung des Schaumbildners und somit eine Einstellung der Konsistenz erwies sich jedoch als schwierig, wodurch das Problem entstand, dass der Löschschaum nach erfolgter Räumung wieder zurückfluss (siehe Abbildung 64). Da dies die anschließende Auswertung verfälschen würde, wurde der Einsatz von Löschschaum als Schneersatzmaterial von den weiteren Versuchen ausgeschlossen.



**Abbildung 64: Löschaum als Schneersatzmaterial**

### **Methode Wärmedämmschüttung**

Aufgrund der leichten Handhabung und des geringen Gewichts wurde Wärmedämmschüttung als Schneersatzmaterial für die Vorversuche ausgewählt. Ein Ausbringen auf eine definierte Fläche ist leicht möglich, die einzelnen Kügelchen können jedoch leicht durch den Wind verblasen werden, weshalb Windstille für die Versuche erforderlich ist. Eine Befeuchtung der Wärmedämmschüttung vor der Aufbringung auf die Testfläche bewirkt eine leicht zusammenhängende Struktur der einzelnen Perlit-Kügelchen (Abbildung 65). Als schwierig gestaltet sich in der Folge jedoch die Aufnahme des nach der Räumung verbleibenden Materials, da dieses am Boden gut haftet und in weiterer Folge beim Einsaugen auch den Nasssauger verklebt bzw. verstopft. Zusätzlich erwies sich eine wiederholbare Befeuchtung mit einfachen Mitteln als kaum möglich. Aus diesem Grund sowie der Veränderung des Materials infolge Abriebes bei der Räumung ist dieses Material ebenfalls nicht zur Verwendung zu empfehlen.



**Abbildung 65: befeuchtete Wärmedämmschüttung als Schneersatzmaterial**

### **Methode Trockenschüttung**

Um sowohl das zu geringe Gewicht als auch die Schwierigkeit der Befeuchtung von Wärmedämmschüttung zu umgehen, kann als alternatives Ersatzmaterial Trockenschüttung verwendet werden. Dadurch ist ein Einsaugen auch mit einem reinen Trockensauger möglich und das Gesamtgewicht für eine größere Versuchsreihe hält sich aufgrund des spezifischen Gewichts

von ca.  $550 \text{ kg/m}^3$  (gegenüber Sand mit ca.  $1.500 \text{ kg/m}^3$ ) in Grenzen. Durch die poröse Struktur des vulkanischen Gesteins werden die Kügelchen bei Überfahrt zertrümmert, wodurch die Körnung verändert und das Einsaugen erschwert wird. Dementsprechend leidet die Wiederholbarkeit der Versuche, sofern nicht für jeden Versuch neues Schüttmaterial verwendet wird. Abbildung 66 dokumentiert die mit diesem Material durchgeführten Versuchsergebnisse nach der Räumung.



**Abbildung 66: Trockenschüttung nach Räumfahrt**

### **Methode Sand**

Die Vergleichbarkeit mit Schnee ist bei Sand aufgrund der hohen Dichte und besonders im Hinblick auf die übertragbaren Zugkräfte nur sehr eingeschränkt gegeben. Sowohl die Einfachheit der Durchführung als auch die Wiederholbarkeit sind dagegen als vorteilhaft zu bewerten. Erste Versuche mit 25 kg Feinsand – das entspricht ungefähr 1 cm Schütthöhe auf einer Fläche von 2,0 x 1,0 m – haben gezeigt, dass diese Mengen für kleinere Pflugbreiten bereits knapp bemessen sind. Daher wird für größere Schilder eine Materialmenge von mindestens 50 kg von diesem Ersatzmaterial empfohlen. Bei den bereits erwähnten Vorversuchen unter Mitwirkung der MA48 in Wien-Auhof wurde der in Abbildung 67 dargestellte Schneepflug Springer SHD-Z 2706-3 K3 eingesetzt. Dabei wurden mit 10° Schrägstellung des Pfluges in Schwimmstellung sowohl mit als auch ohne Nachräumklavier 25 kg Sand auf einer Strecke mit leichtem Quergefälle geräumt. Weiters ist zu beachten, dass die Versuchsstrecke auf dem befestigten Platz keine Spurrinnen aufwies.



**Abbildung 67: Bereitgestellter Schneepflug der MA48**

Wie in Abbildung 68 zu sehen, wurden nach der Räumfahrt drei Bereiche mit einer Fläche von 2,0 x 1,0 Meter markiert und der sich darauf befindliche Sand eingesaugt.



**Abbildung 68: Feinsand nach Räumfahrt**

Ein rein optischer Vergleich der beiden Räumfahrten ließ keinen ersichtlichen Unterschied erkennen. Das Gewicht des auf der jeweiligen Fläche eingesaugten Sandes kann aus Tabelle 12 entnommen werden. Bei diesem Versuch gilt es zu beachten, dass keine herkömmliche, über die Pflugbreite durchgehende Nachräumleiste, sondern das sogenannte Nachräumklavier der Firma Springer eingesetzt wurde (siehe Abbildung 67). Daher war aus den Ergebnissen zu ersehen, dass der geräumte Sand nicht gut erfasst wurde und zwischen den einzelnen Lamellen des Nachräumklaviers hindurchgegangen ist. Im Falle einer Schneeräumung dürfte

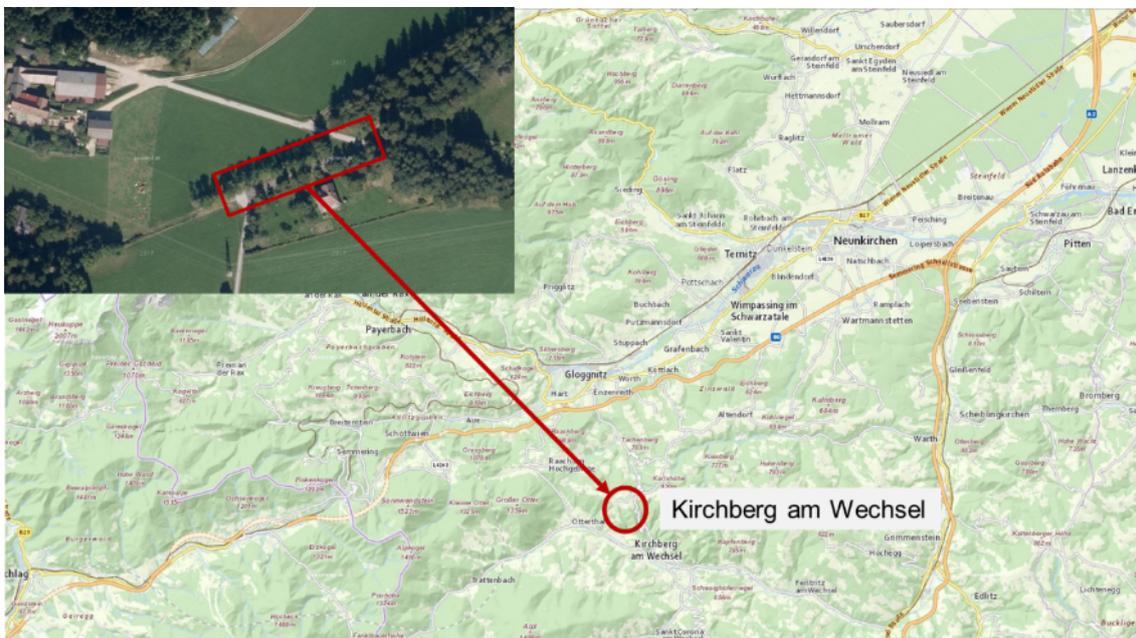
dieser Unterschied in der Durchgängigkeit der Nachräumeiste aufgrund des geringeren Gewichtes und dem Zusammenhalt der Restschneemenge eine untergeordnete Rolle spielen. Aus Aufnahmen mit Nachräumklavier nach der Räumung ist auch bei Restschnee eine gerillte Form mit Grat zwischen den Scharen des Nachräumklaviers erwartbar. Die auf den jeweiligen Flächen eingesaugten Massen in Tabelle 12 zeigen, dass sich im Mittel eine Verbesserung durch das Nachräumklavier von 3,7% der geräumten Menge erzielen lässt. Nach dem bisherigen Erkenntnisstand unterschätzen die Vorversuche die Wirkung der Nachräumeisten bei Schnee jedoch, was in der weiteren Interpretation zu berücksichtigen ist.

**Tabelle 12: Ergebnisse des Sandvorversuches**

gesaugte Menge	ohne Nachräumeiste [g]	mit Nachräumeiste [g]	Differenz [g]	Differenz [%]
1. Messung	2958	2832	126	4,3%
2. Messung	3181	3068	113	3,6%
3. Messung	3317	3204	113	3,4%
<b>Mittelwert</b>	<b>3152</b>	<b>3035</b>	<b>117</b>	<b>3,7%</b>

### 7.3.4 Hauptversuche mit Ersatzmaterial

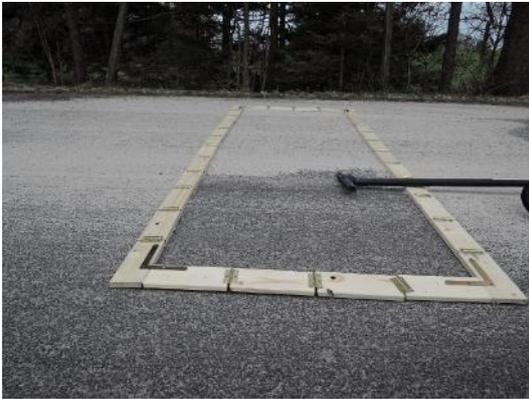
In Zusammenarbeit mit der Straßenmeisterei Gloggnitz wurde der Sandvorversuch erweitert und mit einer klassischen Nachräumeiste und einer größeren Menge Sand (50 kg) auf einer Gemeindestraße in Kirchberg am Wechsel (siehe Abbildung 69) durchgeführt.



**Abbildung 69: Versuchsort Kirchberg am Wechsel**

Für den Versuch wurde ein einfach herzustellender Prüfrahmen entwickelt, welcher aus 25 cm langen Elementen besteht, die gelenkig miteinander verbunden sind, um etwaige Unebenheiten und Spurrinnen abzudecken. An der Unterseite des Rahmens wurde ein Dichtungsband angebracht, um ein Herausrieseln von Sand bzw. Herausfließen von geschmolzenem Schnee

zu verhindern. Zudem erlaubt der Rahmen eine einfache Abgrenzung der Versuchsfläche für die Aufnahme der verbleibenden Rest(schnee)mengen nach der Räumung. Der verwendete Prototyp des Rahmens ist in Abbildung 70 dargestellt, seine Innenfläche beträgt 3,0 x 1,0 m.



**Abbildung 70: Rahmen zur Ermittlung der Restmengen bzw. der Räumleistung**

Der bereitgestellte Pflug vom Typ Springer SHE 3404 NPL besaß eine durchgehende Nachräumleiste (Abbildung 71).



**Abbildung 71: Bereitgestellter Schneepflug der Straßenmeisterei Gloggnitz**

Nach durchgeführter Räumfahrt wurde der Rahmen je dreimal aufgelegt und die umschlossene Fläche abgesaugt. Die so ermittelten Restsandmengen wurden zusätzlich im Labor gesiebt, um etwaige Fremdkörner oder Verschmutzungen zu entfernen. Der Mittelwert der gesiebten Sandmenge kann aus der zweiten Spalte der Tabelle 13 entnommen werden. Im Schnitt ergaben die Hauptversuche eine um 15 % höhere Restsandmenge ohne Nachräumleiste im Vergleich zu den Ergebnissen mit Nachräumleiste. Aus Sicht der bisherigen Erfahrungen mit Nachräumleisten in der praktischen Schneeräumung erscheint dies als realistische Größenordnung.

Die Bedeutung einer möglichst geringen Restschneemenge ergibt sich unmittelbar aus dem Umstand, dass geräumter Schnee nicht getaut werden muss und bei gutem Räumergebnis entsprechend der Salzverbrauch reduziert werden kann. In einem typischen Winter ist daher

der Einsatz von Nachräumleisten (NRL) o.ä. Vorrichtungen zu empfehlen, da sich ein besseres Räumergebnis positiv auf Salzverbrauch, Kosten, Sicherheit und Umwelt auswirkt.

**Tabelle 13: Ergebnisse der Räumleistungsversuche mit Sand**

Räumung	eingesaugt [g]	geseibt [g]	Differenz [%]
ohne NRL	5628	5510	115%
mit NRL	4879	4788	100%
<b>Differenz</b>	<b>749</b>	<b>722</b>	<b>15%</b>

### 7.3.5 Neue Versuchskonzeption Restschneemengen

Ausgehend von den Überlegungen zur Räumleistung, den Vor- und Hauptversuchen mit Schnee- und Schneersatzmaterialien hat sich gezeigt, dass es eine Reihe von Einflussfaktoren gibt, welche die Räumleistung erheblich beeinflussen können. Ein erster wesentlicher Faktor ist der Straßenzustand, wobei insbesondere die Querebenheit (Spurrinnen) und die Straßentextur der Asphalt- bzw. Betonoberfläche und die Restschneemenge einen Einfluss haben. Der Zustand der Schneedecke (frisch gefallen oder festgefahren) sowie die Umgebungstemperatur knapp über oder unter dem Gefrierpunkt sind wesentlich für die Konsistenz und damit die Räumleistung. Die Wiederholbarkeit der Versuche auf Basis natürlicher Schneefälle unter sich ändernden Rahmenbedingungen wird daher nur begrenzt erreichbar sein. Praktisch ergibt sich daraus eine hohe Anzahl an Wiederholungen, um den Einfluss dieser Faktoren statistisch zu minimieren. Weiters sind ausgedehnte Versuche während bzw. unmittelbar nach Schneefallereignissen aufgrund der begrenzten personellen Kapazitäten in den Meistereien nicht einfach durchführbar. Die ausgewählten und geprüften Schneersatzmaterialien können dagegen zu einem beliebigen Zeitpunkt durchgeführt werden und weisen eine gewisse Eignung auf. Die Ergebnisse bestätigen zwar die grundsätzlich erwarteten Zusammenhänge, sind aber nur begrenzt übertragbar und könnten im Zweifelsfall z.B. bei Auswahlentscheidungen hinterfragt werden. Als besondere Herausforderung sowohl bei den Ersatzmaterialien, aber insbesondere bei Schnee hat sich die wiederholbare, möglichst genaue Aufnahme der Rest(schnee)mengen erwiesen. Gerade für eine statistisch signifikante Untersuchung der Unterschiede zwischen Pflugtypen, Anstellwinkeln, Anpressdruck sowie Nachräumleisten etc. ist eine hohe Wiederholbarkeit und Genauigkeit bei vertretbarem Aufwand entscheidend für belastbare Aussagen. Nachfolgend wird daher ein Versuchsaufbau präsentiert, von dem zu erwarten ist, dass die angestrebten Ziele bei entsprechender Optimierung erreichbar sind.

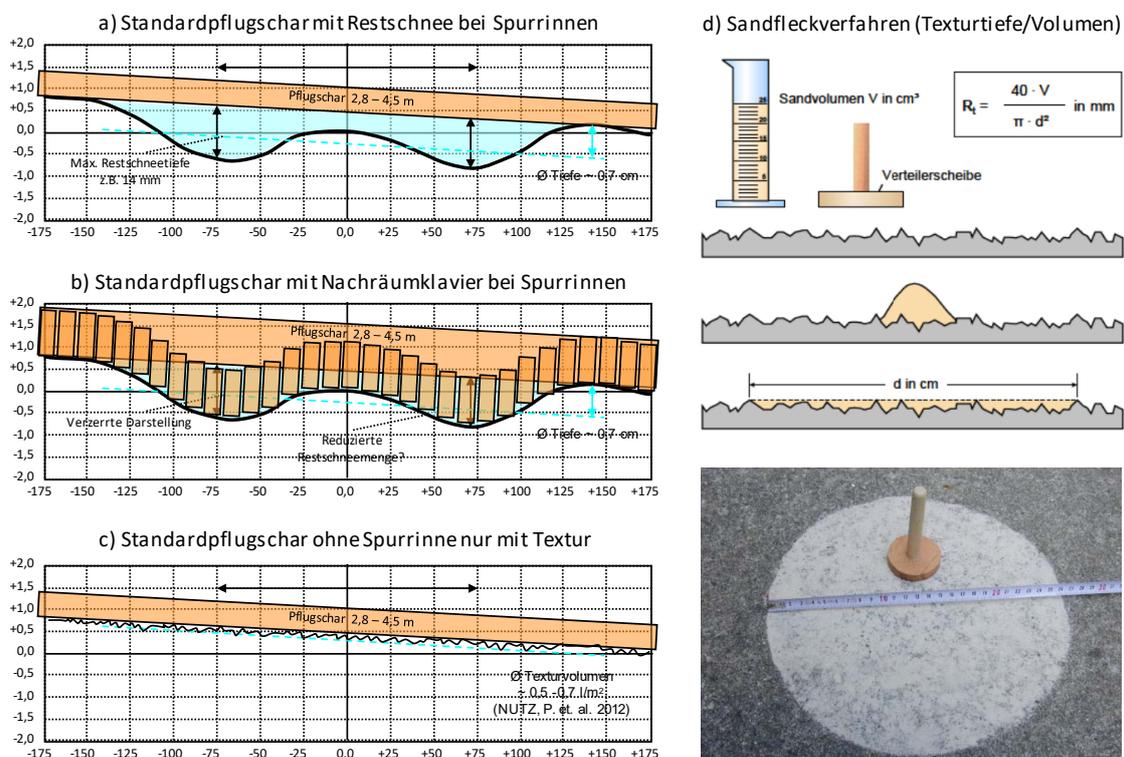
**1.) Auswahl der Versuchsstrecke:**

Die Versuchsstrecke sollte ein- oder zweispurig sein, für die Dauer der Versuche 1 bis 3 Tage gesperrt werden können und einen möglichst einheitlichen Deckenbelag mit mehr oder weniger ausgeprägten Spurrinnen sowie Asphalttextur ausweisen. Um stabile Versuchsbedingungen zu gewährleisten, wird es weiters sinnvoll sein, eine Straße in größerer Höhenlage mit häufigen Minusgraden in der Nähe eines Skigebietes zu wählen. Weiters sollte ein Wasseranschluss sowie eventuell Stromanschluss in der Nähe des Versuchsabschnitts von mindestens 100 bis 200 m Länge verfügbar sein, um eine künstliche Beschneieung zu ermöglichen.

**2.) Voruntersuchung der Versuchsstrecke:**

Zur Ermittlung der Ausgangsbedingungen an der Versuchsstrecke ist die Spurrinntentiefe mindestens alle 10 – 25 m mittels 4 m Latte aufzunehmen und in einem Übersichtsplan zu dokumentieren (z.B. nach DIN EN 13036-3:2003-06). Wie in Abbildung 72 dargestellt, hat die Querebenheit bzw. haben Spurrinnen einen wesentlichen Einfluss auf die Restschneemenge, der auf Basis der Messungen berücksichtigt werden kann.

Im selben Abstand (alle 10 – 25 m) sind jeweils in der Fahrbahnmitte und in der Spurrinne die Fahrbahntextur mittels geeigneter Verfahren z.B. gemäß DIN EN ISO 13473-1:2004-07 (z.B. mit Sandfleckverfahren) zu erfassen. Beim Sandfleckverfahren können die Oberflächentextur bzw. das Texturvolumen ermittelt werden, wodurch ein Tauen des Restschnees für die Erfassung nach einem manuellen Abziehen der Oberfläche mittels Spachtel entfallen kann [17]. Die Restschneemenge ist dann für alle Versuche gleich bzw. kann über Texturvolumen und Schneedichte rückgerechnet werden.



**Abbildung 72: Voruntersuchung von Querebenheit und Oberflächentextur**

### 3.) Beschneieung der Versuchsstrecke:

Die beste Näherung an Naturschnee ist eine Beschneieung mittels Kunstschnee. Kunstschnee unterscheidet sich in seiner Struktur (30 - 350 Mikrometer, Kugelform) wesentlich von Neuschnee (50 - 100 Mikrometer, hexagonale Formen) und weist einen höheren Wassergehalt sowie Dichte auf (300 - 500 kg/m<sup>3</sup>, siehe Abbildung 73). Dafür kann er aber beliebig oft in vergleichbarer Konsistenz hergestellt und für Wiederholversuche aufgebracht werden. Zudem kann ein kurzer Versuchsabschnitt in vergleichsweise kurzer Zeit nachbeschneit werden, so dass bei gestaffelter Abfolge an einem Teilabschnitt gemessen wird und parallel dazu ein weiterer Versuchsabschnitt beschneit werden kann. Zur Gewährleistung gleichbleibender Bedingungen sollten die Versuche an klaren Tagen durchgeführt werden, an denen die Temperatur zwischen -3 °C und -8 °C liegt und jedenfalls im gesamten Messzeitraum unter dem Gefrierpunkt bleibt. Gleichzeitig kann mit Kunstschnee die Problematik der Verkehrssicherheit und begrenzten Verfügbarkeit der Mannschaften der Straßenmeistereien umgangen werden.



Abbildung 73: Schneekanone für Beschneieung der Versuchsstrecke und Kristallform von Naturschnee bzw. Kunstschnee

### 4.) Räumung der Versuchsstrecke:

Für die Räumdurchgänge ist es wesentlich, die einzelnen Einflüsse unter möglichst gleichen Bedingungen zu untersuchen. So wird es Sinn machen, die Räumversuche mit möglichst demselben Räumfahrzeug, aber anderem Räumschild bzw. gleichen Räumschild mit/ohne Pflugentlastung, Pflugstellen ohne/mit Nachräumleisten bzw. Nachräumklavier durchzuführen. Für ausreichend stabile Ergebnisse ist eine entsprechende Anzahl an Versuchen bzw. Messungen je Konfiguration erforderlich (mindestens 3 bis 5 Messungen je Versuch).

### 5.) Räumleistung und Restschneemessung:

Zur Bestimmung der Restschneemengen ist es sinnvoll, den zu untersuchenden Bereich durch eine Anzahl von 3 bis 5 flexibler Messrahmen mit Dichtung an der Unterseite abzugrenzen (siehe Abbildung 74). Dadurch wird gewährleistet, dass die Fläche zur Aufnahme des Restschnees konstant bleibt und es im Fall eines Auftauens des Restschnees zu keinen größeren Abweichungen kommt. Für die Aufnahme des Restschnees innerhalb des Rahmens stehen mehrere Verfahren zur Verfügung, die sich in ihrer Genauigkeit und Anwendbarkeit sowie Aufwand unterscheiden:

- a) **Abziehen mit Spachtel & Rückrechnung:** Am einfachsten ist ein Abziehen der Restschneemengen im Messrahmen mit einer breiten Spachtel und getrennten Wägung dieser Restschneemengen. Die verbleibende Restschneemenge kann dann aus dem Texturvolumen und Schneedichte rückgerechnet werden.
- b) **Abziehen mit Spachtel & Tausalzkonzentration:** Zur Begrenzung der Versuchsdauer und Vermeidung von Auslaufverlusten wird auch hier der Restschnee mittels breiter Spachtel abgezogen und in einem Messbehälter Gewicht und Dichte bestimmt. Der verbleibende Restschnee wird durch Aufbringen einer definierten Salzmenge getaut, die so abzuschätzen ist, dass nach dem Tauvorgang eine Konzentration von 20% nicht überschritten wird. Anschließend wird die entstandene Salzlösung stichprobenartig mittels Pipette aufgenommen (5-10 Stellen) und aus Konzentration (Bestimmung über Widerstandsmessung) und aufgebracht Salzmenge die Restschneemenge rückgerechnet.
- c) **Abziehen mit Spachtel & Tauen & Aufnehmen:** Wie zuvor wird die Restschneemenge im Messrahmen mittels Spachtel aufgenommen. Der in der Textur verbleibende Schnee kann dann mittels einer definierten Menge Salz getaut und mit einem Nassstaubsauger aufgesaugt bzw. mit einem Schwamm aufgenommen werden. Eine Erhitzung zur Einleitung des Tauvorgangs ist ebenfalls möglich, es sollte aber darauf geachtet werden, dass es zu keiner Verdunstung kommt.
- d) **Laserscanning vor und nach Räumung:** Durch den Laserscan (z.B. terrestrisch oder mit Messbalken) vor der Beschneigung und nach der Räumung entfällt die Notwendigkeit einer Erfassung von Spurrinntiefe und Textur. Das Restschneevolumen ergibt sich aus der Differenz der beiden Scans im definierten Auswertebereich. Die Restschneemenge kann aus der stichprobenartig erhobenen Dichte rückgerechnet werden. Entscheidend für die Genauigkeit dieses rein messtechnischen Verfahrens ist die Auflösung bzw. Punktdichte.

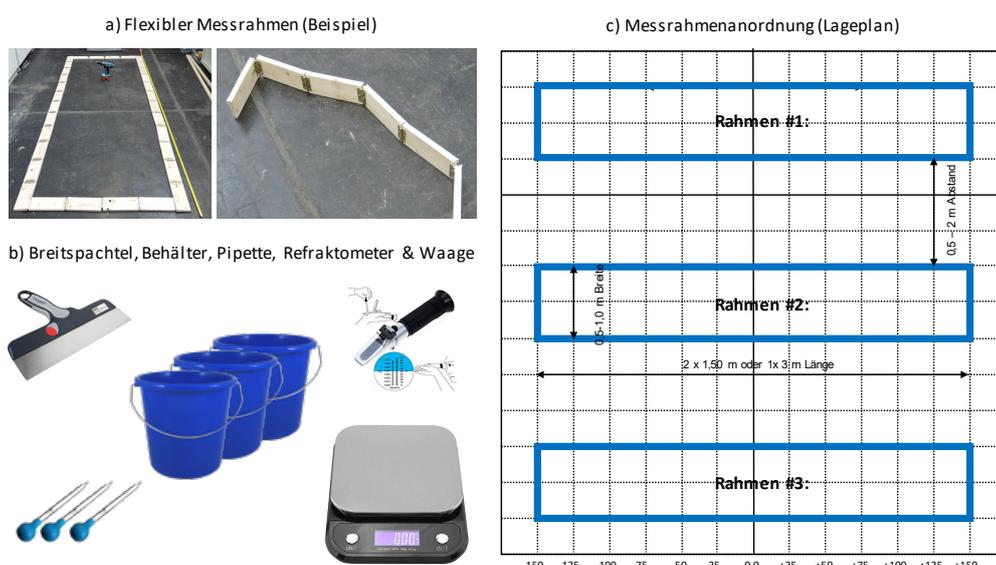


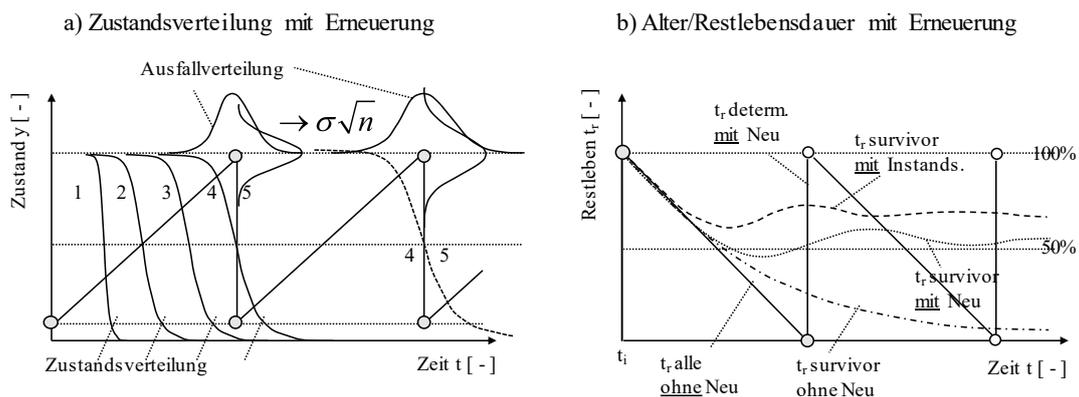
Abbildung 74: Ausrüstung zur Ermittlung der Restschneemengen

## 7.4 Prüfprogramm Räumleistenverschleiß

### 7.4.1 Lebensdauer Pflüge und Räumleisten (Befragung)

Anlagegüter wie Pflüge und Räumleisten nützen sich durch den Gebrauch ab und werden bei Ausfall ersetzt. Art und Ausmaß der Abnutzung sowie Lebensdauer gleichartiger Anlagen sind unterschiedlich bzw. unterliegen einer Verteilung. Im Fall von Pflügen ist dies durch Unterschiede in Wetter, Winterdienststrategie, Laufleistung etc. bedingt. Die Restlebensdauer entspricht grundsätzlich der Lebensdauer abzüglich des Alters. Befragungen zu Alter der Pflüge berücksichtigen nur den (überlebenden) Bestand ( $\rightarrow$  zensiert) [18].

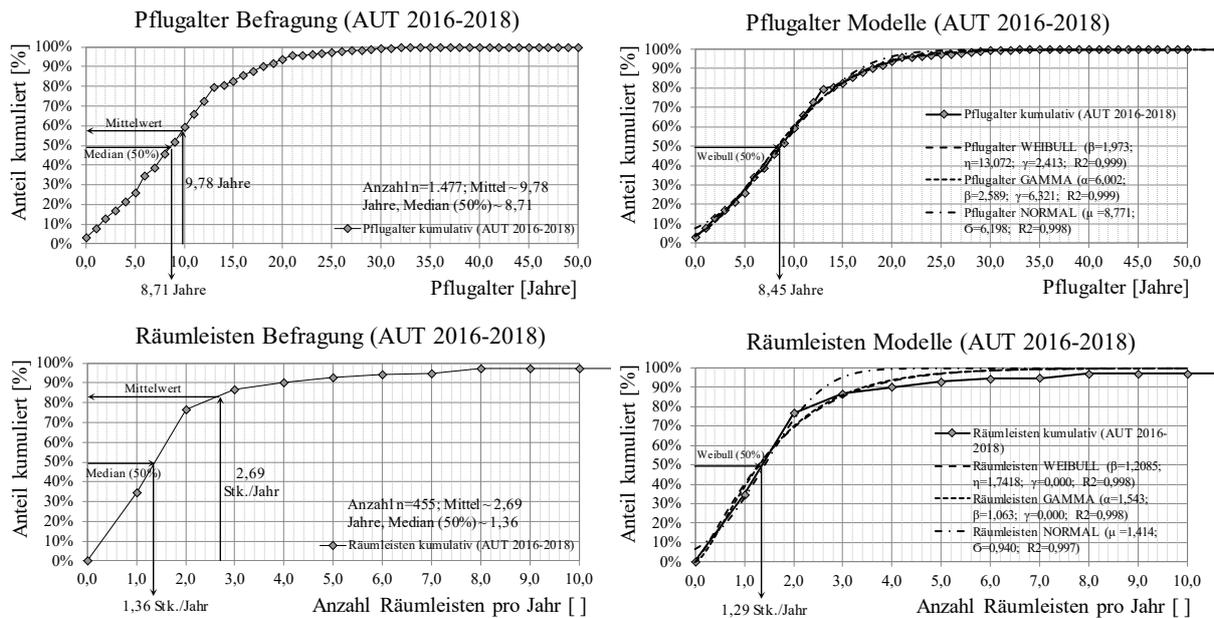
Da kurzlebige Pflüge und Räumleisten laufend ausgetauscht werden, verbleiben die langlebigen im Bestand, weshalb die Ergebnisse von Bestandsauswertungen das mittlere Alter überschätzen. Mittels statistischer Analysen lässt sich jedoch zeigen, dass das durchschnittliche Alter und die mittlere Restlebensdauer des Bestandes bei wiederholter Erneuerung 50% der tatsächlichen Lebensdauer zustreben (Abbildung 75). Für einen direkten Vergleich von Pflügtypen, Räumleisten etc. sind die Ergebnisse um die wesentlichen Einflussfaktoren zu bereinigen (z.B. Ausreißer, Laufleistung etc.), da nicht von vorneherein davon ausgegangen werden kann, dass diese im Schnitt gleich eingesetzt werden.



**Abbildung 75: Zusammenhang von Lebens- und Restlebensdauer**

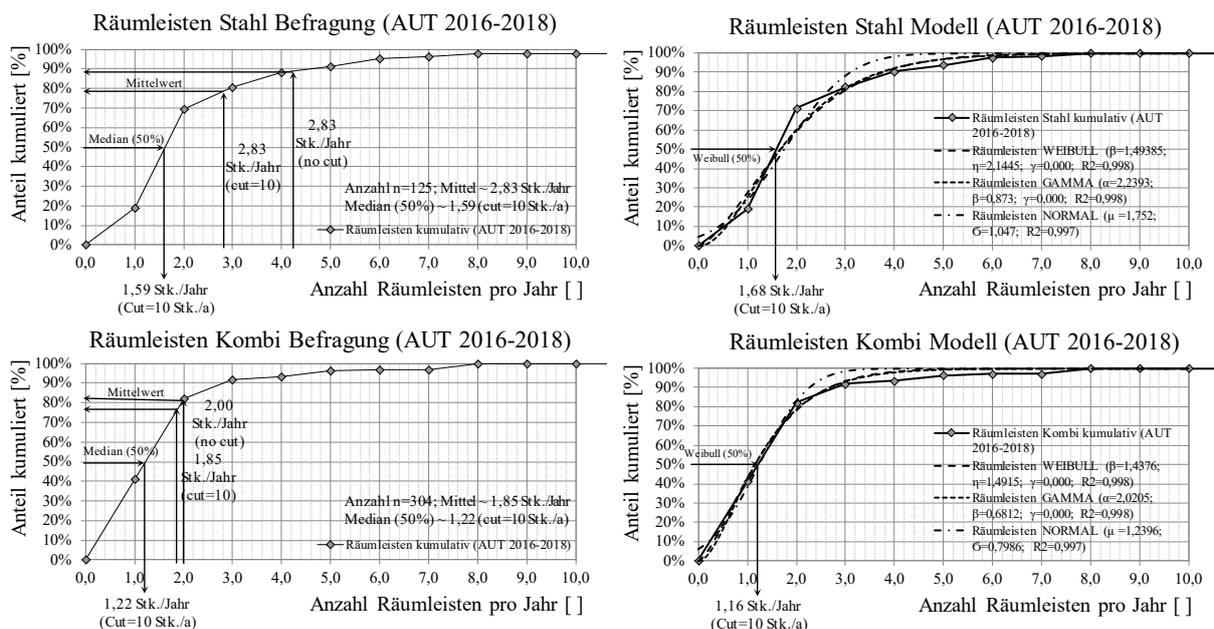
Die Auswertung des kumulativen Pflugalters aus der Befragung zeigt die bereits erwähnte rechtsschiefe bzw. linkssteile Verteilung mit einem Medianwert von 8,71 Jahren bzw. einem Mittelwert von 9,78 Jahren (Abbildung 76). Diese empirische Verteilung kann über eine Weibullverteilung, Gammaverteilung oder Normalverteilung angenähert werden. Unter Berücksichtigung der typischen Schiefe und Zensur wird die tatsächliche Lebensdauer der Pflüge im Schnitt zwischen  $2 \times$  Medianalter = 17,4 Jahren und  $2 \times \bar{\Delta}$  Alter = 19,6 Jahren liegen.

Die Auswertung des Räumleistenverbrauches ergibt einen Medianwert von 1,36 Stk/Jahr bzw. einen Mittelwert von 2,69 Stk/Jahr (Medianwert Modelle 1,29 Stk/Jahr). Die extrem rechtsschiefe bzw. linkssteile Verteilung ergibt sich durch Verzerrung des Mittelwertes aufgrund eines kleinen Teils der Antworten, weshalb in der Folge der Medianwert verwendet wird. Der Kehrwert des Verbrauches entspricht dann der Lebensdauer der Räumleisten bzw. genauer dem Anteil eines Winters mit ca. 0,72 – 0,77 Jahren bzw. Winter/Stk.



**Abbildung 76: Auswertung kumulatives Pflugalter und Räumleistenverbrauch**

In einem nächsten Schritt erfolgt eine Auswertung des Räumleistenverbrauches pro Jahr bzw. Wintersaison für die Kategorien Stahlräumleisten und Kombiräumleisten. Die Medianwerte (Abbildung 77) für Stahlräumleisten liegen mit 1,59 Stk./Jahr (Modell 1,68 Stk./Jahr) wie erwartet etwas höher im Vergleich zu Kombiräumleisten mit 1,22 Stk./Jahr (Modell 1,16 Stk./Jahr). Bei vergleichbarem Einsatz würde dies bedeuten, dass die Lebensdauer bzw. genauer der Anteil eines Winters bei 0,61 Winter/Stk (Stahl) bzw. 0,86 Winter/Stk (Kombi) liegt. Nachdem Kombileisten grundsätzlich teurer sind und als standfester vermarktet werden, ist anzunehmen, dass diese vor allem bei höherer Beanspruchung eingesetzt werden. Dementsprechend ist zu erwarten, dass ihre tatsächliche Lebensdauer bzw. Standzeit bei gleicher Beanspruchung höher sind.



**Abbildung 77: Räumleistenverbrauch nach Typ und Zeit (Stahl/Kombileisten)**

Ebenfalls Teil der Befragung war der Tauschintervall von Stahl- und Kombiräumleisten in Abhängigkeit von der Kilometerleistung im Einsatz. Nachdem eine exakte Wiedergabe ohne systematische Aufzeichnungen nicht möglich ist, wurde die Kilometerleistung in Kategorien abgefragt. Dementsprechend weist die kumulative Darstellung des Tauschintervalls insbesondere bei den Stahlräumleisten einen treppenartigen Verlauf auf (siehe Abbildung 78). Der Medianwert aus der Befragung liegt für Stahlräumleisten bei 1.475 km/Stk und ist bei Kombileisten mit 1.560 km/Stk. um 5,7% höher. Was bei Betrachtung der Kurven auffällt, ist der flache Verlauf bei Kombileisten weshalb der Mittelwert mit 2.890 km/Stk. (mit Cutoff) bzw. 3.220 km/Stk. (ohne Cutoff) fast doppelt so groß ist wie jener der Stahlräumleisten mit 1.630 km/Stk. Zusammenfassend ist jedenfalls aufgrund der Befragungsergebnisse davon auszugehen, dass Kombileisten zum Teil erheblich standfester sind als Stahlräumleisten. Ob die Mehrkosten aber tatsächlich gerechtfertigt sind, soll in der Folge durch entsprechende Versuche geklärt werden. Darüber hinaus werden Fragen zum Thema Lebensdauer und Abnutzung in Zukunft über die Einsatzdatenerfassung mittels GPS wesentlich besser beantwortbar sein.

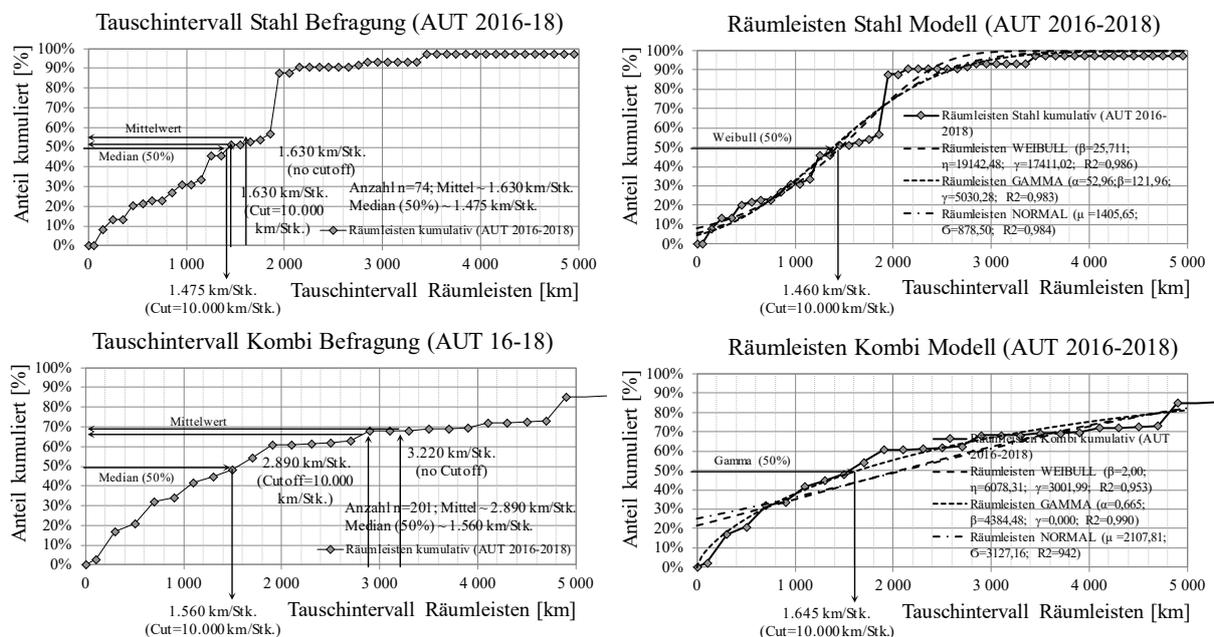


Abbildung 78: Räumleistenverbrauch nach Typ und Laufleistung (Stahl/Kombileisten)

### 7.4.2 Beschreibung Hauptversuch

Zur Beurteilung der Abnutzung von Räumleisten wurden die am häufigsten eingesetzten Räumleisten (basierend auf der Umfrage) durch einen für diesen Zweck entwickelten Prototyp einer Verschleißsimulation unterzogen. Ziel dabei war es, die Abnutzung in mm von typischen Räumleisten in Abhängigkeit von den gefahrenen Kilometern einerseits und den Kosten andererseits in mm/€ zu ermitteln.

Beim Verschleißversuch sind bis zu 14 Räumleistensegmente parallel in einen Träger eingespannt und werden individuell belastet, um die Flächenpressung für alle Segmente gleich zu halten. Zur Simulation einer Räumfahrt wird der Träger anschließend auf ein Fahrzeug montiert, bei winterlichen Bedingungen einige Kilometer über Asphalt bzw. die Schneedecke gezogen und anschließend der Abrieb der einzelnen Leisten gemessen (siehe Abbildung 79).

Der Einfluss auf den Abrieb durch Spurrinnen und Unebenheiten auf der Teststrecke wird durch Positionswechsel der Räumleistensegmente untereinander minimiert. Zudem wurde der gesamte Versuchsablauf durch das Institut für Verkehrswissenschaften durchgängig begleitet und dokumentiert.



Abbildung 79: Feldversuch Verschleiß der Räumleistensegmente

### 7.4.3 Hauptversuch

In Summe wurden 28 unterschiedliche Räumleisten aus den Materialien Stahl, Stahl-Korund-Gummi und Gummi in zwei Chargen zu je 14 Leisten geprüft (siehe Abbildung 80). Nach einer Fahrt auf der Prüfstrecke (13,1 km Länge) wurde die Höhe der Leiste und somit der kilometerbezogene Verschleiß gemessen und die Position der Leisten von außen nach innen um einen Platz verschoben. Die Gesamtkilometerleistung je Räumleiste lag bei 90 Kilometern mit durchschnittlich 30 % Schneefahrbahnanteil. Die Ergebnisse der Versuche wurden nach Stahl- und Kombileisten kategorisiert. Eine statistisch signifikante Auswertung der Abnutzung nach Leistentyp und Hersteller hätte ein wesentlich umfassenderes Prüfprogramm insbesondere in Bezug auf die Kombileisten erfordert, weshalb die Ergebnisse kumulativ wiedergegeben werden.



Abbildung 80: Erste Charge des Verschleißversuchs

### 7.4.4 Ergebnisse Stahlleisten

Die Abnutzung der Stahlleisten wurde alle 13,1 km auf der Gesamtstrecke von etwas über 90 km jeweils siebenmal erfasst und ist nachstehend in Abbildung 81 aufgetragen. Mittels Regressionsrechnung lässt sich ein Zustandsmodell (Potenzfunktion) anpassen und daraus die Laufleistung bis zu einer Abnutzungsgrenze prognostizieren [18]. Da die Versuchswerte der unterschiedlichen Stahlräumeleisten eine gewisse Schwankungsbreite aufweisen, ergibt sich an der Ausfallsgrenze  $y_a = 50$  mm eine mittlere Laufleistung von 162,3 km bei einer entsprechend breiten Ausfallsverteilung (Abbildung 82). Da die Messwerte einer Stahlräumeleiste auffallend schlecht waren, wurde diese in der Folge ausgeschieden und die Auswertung wiederholt. Das Zustandsmodell für die verbleibenden Stahlräumeleisten ist nun wesentlich robuster (Abbildung 83 adj.  $R^2$  von 0,5022 auf 0,8862). Dementsprechend ist die Ausfallsverteilung schmaler und die mittlere Laufleistung steigt auf 192,6 km (Abbildung 84). Im Vergleich zu den Befragungsergebnissen zum Tauschintervall bzw. der typischen Räumstrecken eines Winters mit 15 bis 25 Schneefallereignissen ist die Laufleistung im Versuch vergleichsweise kurz. Dies mag zum Teil auf die Versuchsanordnung bzw. Vorspannung zurückzuführen sein, liegt aber vor allem an dem geringen Schneefahrbahnanteil von rund 30% der Versuchsstrecke. Praktisch bedeutet dies, dass eine Räumung bei geringem Anteil bzw. ohne Restschnee am Asphalt zu einer extremen Abnutzung von Stahlräumeleisten führt und daher zu vermeiden ist.

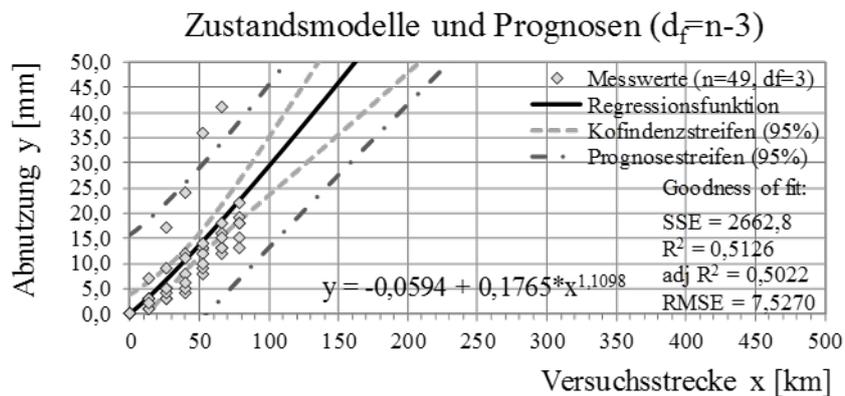


Abbildung 81: Abnutzung und Zustandsprognose alle Stahlleisten

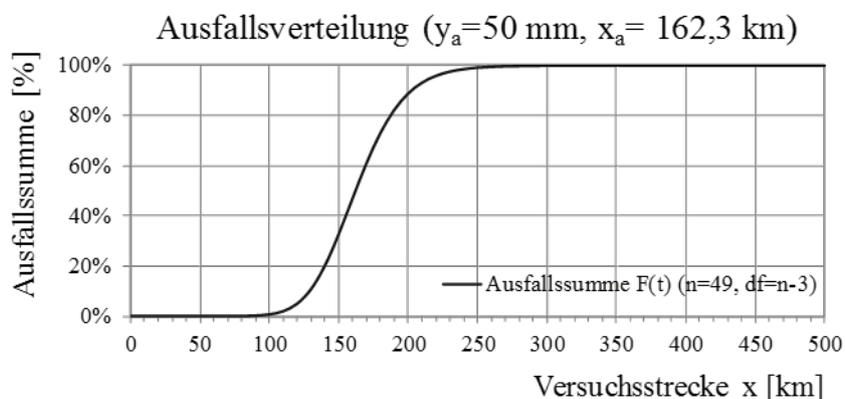


Abbildung 82: Laufleistung und Ausfallsverteilung alle Stahlleisten (Ausfall = 50 mm)

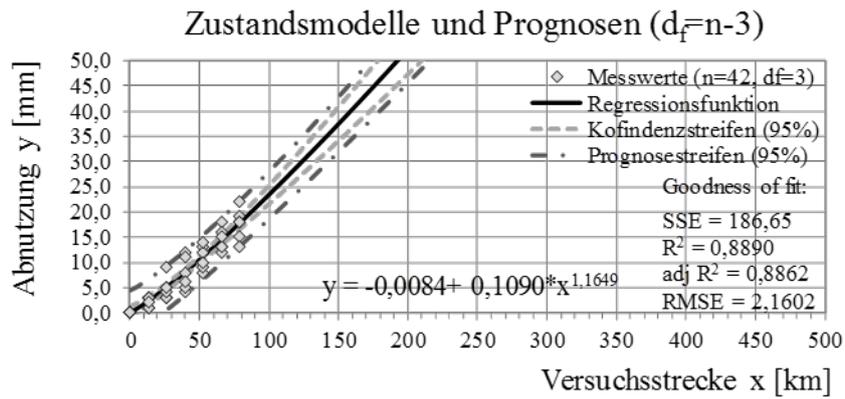


Abbildung 83: Abnutzung und Zustandsprognose Stahlleisten (ohne Ausreißer)

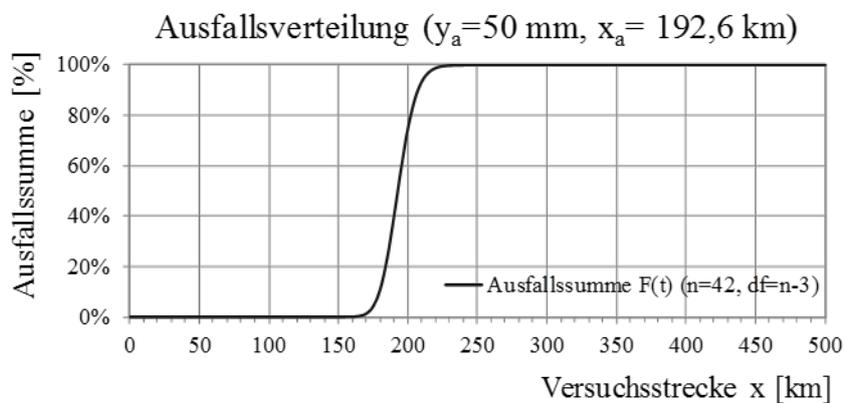


Abbildung 84: Laufleistung und Ausfallsverteilung ohne Ausreißer (Ausfall = 50 mm)

### 7.4.5 Ergebnisse Kombileisten

Die Abnutzung der Kombileisten wurde in der gleichen Versuchsanordnung zur selben Zeit auf derselben Strecke getestet und ebenfalls ausgewertet. Im Gegensatz zu den Stahlleisten weisen die Kombileisten der Hersteller eine größere Schwankungsbreite und weisen am Ende der Versuche eine wesentlich geringere Abnutzung auf (Abbildung 85). Dementsprechend ist eine Zustandsprognose bis zu einer vergleichbaren Abnutzung von  $y_a = 50$  mm (Abbildung 86) mit hoher Unsicherheit behaftet (Abbildung 87) und liegt statistisch bei 1.680,1 km.

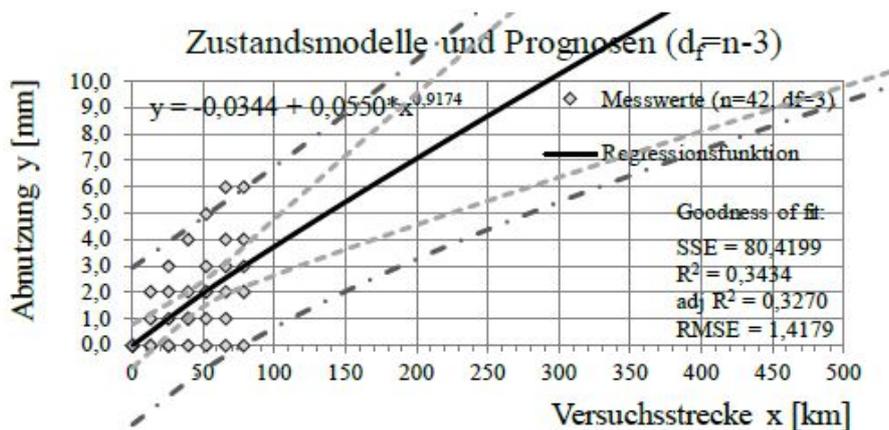


Abbildung 85: Abnutzung und Zustandsprognose alle Kombileisten bis 10 mm

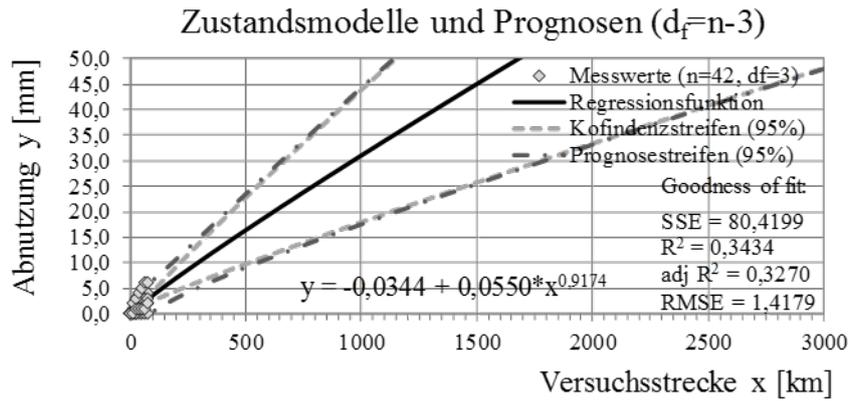


Abbildung 86: Abnutzung und Zustandsprognose alle Kombileisten bis 50 mm

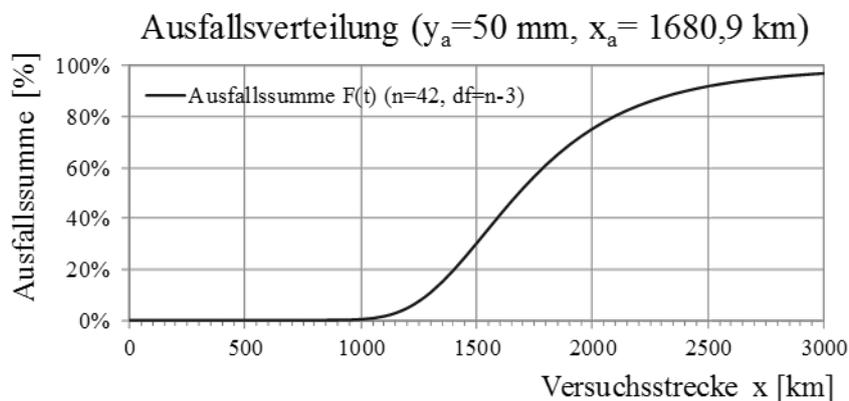


Abbildung 87: Laufleistung und Ausfallsverteilung alle Stahlleisten (Ausfall = 50 mm)

### 7.4.6 Vergleich Stahl- und Kombileisten

Für den Wirtschaftlichkeitsvergleich von Stahl- und Kombileisten ist neben der Laufleistung unter vergleichbaren Bedingungen die im Schnitt höhere Abnutzungsgrenze und geringeren Kosten der Stahlräumleisten zu berücksichtigen. Abbildung 88 zeigt dazu die prognostizierte mittlere Laufleistung bis zur jeweiligen Ausfallsgrenze auf Basis der Versuche. Wie erwartet zeigt sich, dass die etwas höhere Ausfallsgrenze der Stahlleisten einen Teil der größeren Laufleistung der Kombileisten kompensiert.

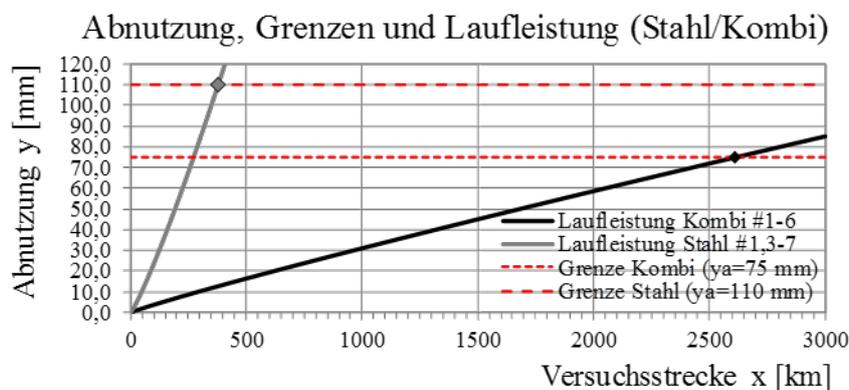
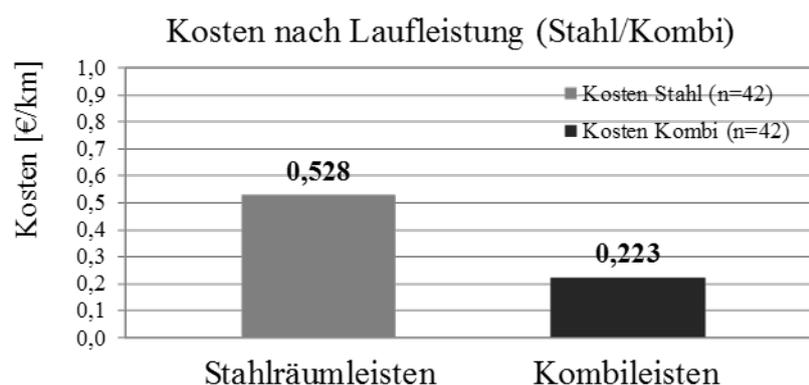


Abbildung 88: Prognostizierte mittlere Laufleistung bis zur jeweiligen Ausfallsgrenze

Zusammenfassend liegt die ausgewertete Laufleistung auf der Teststrecke für die untersuchten Stahlräumleisten bei durchschnittlich 380 km und damit deutlich unter den Werten aus der Befragung. Die Laufleistung für die untersuchten Kombileisten liegt dagegen mit 2.600 km annähernd im Bereich aus den Befragungen. Offensichtlich wurden die Stahlleisten auf der Versuchsstrecke bzw. insbesondere auf dem Asphaltanteil wesentlich stärker abgenutzt, während die Kombileisten bei vergleichbarem Anpressdruck weniger empfindlich waren.

Die Kostendaten für den Vergleich wurden von den Projektpartnern bzw. insbesondere den Ländern Oberösterreich und Niederösterreich zur Verfügung gestellt. Es zeigt sich, dass die Stahlräumleisten bei vergleichbarer Länge von ca. 3,5 m mit ca. 200 € deutlich billiger als Kombileisten mit ca. 580 € sind. Aufgrund der wesentlich höheren Laufleistung der Kombileisten liegen die Kosten/Laufleistung mit 0,223 €/km dennoch deutlich unter jenen von Stahlräumleisten mit 0,528 €/km (siehe Abbildung 89). Dementsprechend ist zu erwarten, dass Kombileisten seltener zu tauschen und günstiger im Einsatz sind. Dies gilt insbesondere bei erhöhten Beanspruchungen, großen Räumstrecken und hartem Gestein in der Deckschicht (Asphalt) d.h. vor allem am hochrangigen Straßennetz.

Zusammenfassend zeigten die Ergebnisse der Versuche teilweise deutliche Unterschiede zwischen Herstellern bzw. insgesamt eine bessere Laufleistung und Wirtschaftlichkeit der Kombileisten bei mittlerer bis hoher Beanspruchung. Nicht enthalten in dem Vergleich ist der Aufwand für den Tausch der Räumleisten, wobei der Aufwand mit ca. 0,5 bis 1,0 Stunden für 2 Personen angesetzt werden kann. Unabhängig davon haben die Auswertungen der Ausgaben der Projektpartner gezeigt, dass sich diese für Räumleisten auf 0,5% bis 1,0% der Gesamtausgaben für den Winterdienst belaufen. Die Frage nach der Wahl der Räumleisten ist zwar aus Sicht des Arbeitsaufwands und der Verfügbarkeit sowie der Räumleistung nicht unwesentlich. Aus rein wirtschaftlicher Sicht sind andere Themen wie z.B. Personalkosten, Salzbeschaffung und Salzlogistik bis hin zum Kraftstoffverbrauch wesentlicher.



**Abbildung 89: Kostenvergleich nach Laufleistung bis zur Erreichung der Ausfallgrenze**

### 7.4.7 Prototyp für Abriebversuche im Labor

Um die erhaltenen Versuchsergebnisse validieren zu können, wurde in dem Forschungsprojekt der Aufbau von Laborversuchen für den Vergleich der Räumleisten untereinander konzipiert. Dazu sollen die Schürfleisten unter Laborbedingungen mit einer definierten Reibungsarbeit beansprucht und anschließend ihr Verschleiß in mm gemessen werden. Ein erster Prototyp gemäß der nachstehenden Skizze (Abbildung 90) wurde ebenfalls entwickelt, konnte jedoch aus Kostengründen nicht realisiert werden. Dessen ungeachtet soll der Versuchsaufbau im Folgenden beschrieben werden.

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 und so ein Vergleich der unterschiedlichen Typen untereinander und mit den Auswertungen der Einsatzdaten sowie Feldversuchen angestellt werden. Der wesentliche Vorteil solcher Laborversuche ist die Wiederholbarkeit unter gleichen Bedingungen sowie vertretbare Prüfaufwand, wodurch auch ein Vergleich der unterschiedlicher Leistentypen und Produkte nach Hersteller möglich wird. In Kombination mit einer statistischen Auswertung der Einsatzdaten nach Leistentyp sind diese Ergebnisse auch unmittelbar in die Praxis bzw. in den Beschaffungsvorgang übertragbar.

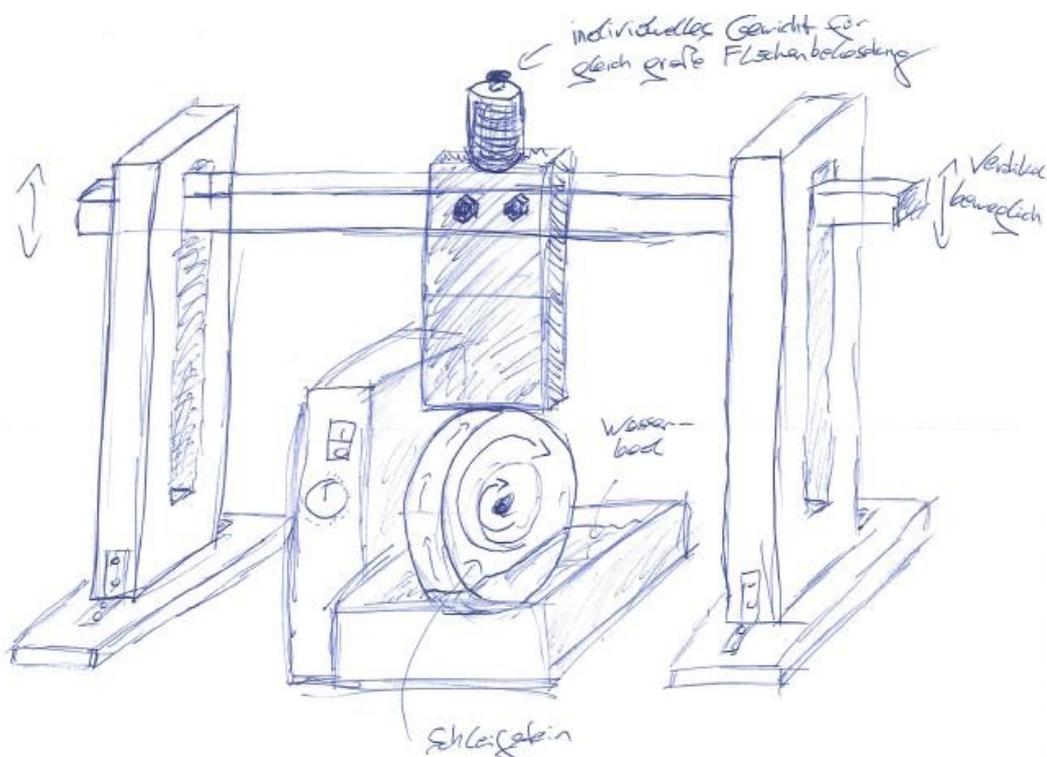


Abbildung 90: Prototyp zur Beurteilung des Räumleistenverschleißes

## 8 Restsalz

### 8.1 Inhalt und Methodik

Für dieses Arbeitspaket wurden die Restsalzmengen von festen und flüssigen Taumitteln mit definierten Salzgehalten unter Laborbedingungen mit dem Restsalzmessgerät SOBO 20 ermittelt. Weiters sollte der zeitliche Verlauf der Restsalzmenge nach einer Präventivstreuung mit einem SOBO 20 gemessen werden. Die Restsalzmessungen waren möglichst im Nahbereich von Verkehrsmessanlagen geplant, um die Abnahme des Restsalzmengen unter Berücksichtigung der Anzahl an Fahrzeugen zu ermitteln.

#### 8.1.1 Laborprüfungen

Die Laborprüfungen umfassten Vergleichsmessungen von zwei SOBO 20 Restsalzmessgeräten für verschiedene Streuszenarien (fest FS0 und flüssig FS100), Streumengen (10, 20, 30, 40 g/m<sup>2</sup>) und unterschiedliche Oberflächen (glatt, Bohrkern). Die ermittelten Restsalzmengen wurden verglichen und die Differenzen zu den theoretischen Sollsalzmengen bestimmt. Ergänzend wurde dabei auch der Einfluss von trockenen und befeuchteten Oberflächen sowie für aufgetrocknetem Tausalz untersucht. Die Prüfungen umfassten ca. 30 Einzelversuche, die im Herbst bzw. Winter 2017/18 durchgeführt wurden.

#### 8.1.2 Feldprüfungen

Die Feldprüfungen umfassten Restsalzmessungen mit dem SOBO 20 vor einer Präventivstreuung und unmittelbar bzw. 60, 120, 180 und 240 Minuten danach unter starker Verkehrsbelastung. Die Messungen wurden für den jeweiligen Straßenabschnitt an mindestens drei Messpunkten, sowohl in der rechten und linken Rollspur als auch in Fahrstreifenmitte, durchgeführt. Die Daten der Verkehrsmessanlage wurden vom Straßenbetreiber zur Verfügung gestellt.

#### 8.1.3 Ergebnisse

Laut den angestrebten Projektzielen wurde ein quantitativer Vergleich der gemessenen Restsalzmengen von SOBO 20 Geräten bei Prüfung von festen und flüssigen Streumitteln sowie die Differenz zu den theoretischen Mengen angestrebt. Auf Basis der Feldprüfungen sollte der zeitliche Verlauf der Abnahme der Restsalzmenge nach Präventivstreuungen ermittelt werden.

## 8.2 Überprüfung der Eignung des SOBO 20 Restsalzmessgerätes im Labor

### 8.2.1 Restsalzmessgerät SOBO 20

Die Funktionsweise des in Abbildung 91 gezeigten mobilen Restsalzmessgerätes SOBO 20 der Firma Boschung wird in der Folge beschrieben, da diese wesentlich für die Interpretation der Messergebnisse ist. Das Messprinzip des SOBO 20 basiert auf der unterschiedlichen Leitfähigkeit einer Messflüssigkeit in Abhängigkeit von ihrem Salzgehalt. Am unteren Ende des

SOBO 20 wird eine Gleichspannung zwischen zwei Elektroden angelegt und über die elektrische Leitfähigkeit bei definiertem Wasser-Aceton-Gemisch sowie eine Kalibrierkurve der Salzgehalt, umgerechnet auf  $\text{g}/\text{m}^2$ , angezeigt. Die Messflüssigkeit besteht aus 85 % destilliertem bzw. entmineralisiertem Wasser und 15 % Aceton, um ein Gefrieren zu verhindern.



**Abbildung 91: SOBO20 Restsalzmessgerät**

Vor jeder Messreihe ist die Funktionsfähigkeit des SOBO 20 zu überprüfen. Laut Hersteller gibt es dazu zwei Verfahren:

- Prüfung der Menge der Messflüssigkeit
- Prüfung der Elektronikeinheit durch Messen einer Salzlösung mit bekannter Konzentration

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 14 aufgelisteten Werte einhalten, ansonsten sind Ventile und Dichtungen zu überprüfen bzw. das Gerät zur Kalibrierung an den Hersteller zu schicken.

**Tabelle 14: Einzuhaltende Werte für die Überprüfung der SOBO 20 Elektronikeinheit**

23% NaCl-Lösung	SOBO 20 Messung	Mess-toleranz
0,5 ml	5 $\text{g}/\text{m}^2$	$\pm 1 \text{ g}/\text{m}^2$
1,0 ml	10 $\text{g}/\text{m}^2$	$\pm 2 \text{ g}/\text{m}^2$
1,5 ml	15 $\text{g}/\text{m}^2$	$\pm 3 \text{ g}/\text{m}^2$

### 8.2.2 Laborprüfung

Um die Messgenauigkeit des mobilen Restsalzmessgerätes SOBO 20 unter Laborbedingungen zu überprüfen, wurde die in der Folge beschriebene Prüfmethodik 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 92 dargestellt und wurde für alle Versuche dreimal wiederholt und statistisch ausgewertet.

In nachstehender

Tabelle 15 sind die auf die Petrischale bzw. auf den Bohrkern aufgebrachten Salz- und Solemengen in mg angegeben. Die geringen Mengen resultieren aus dem Umstand, dass beispielsweise bei einer Trockenstreuung FS0 mit 40 g/m<sup>2</sup> tatsächlich 40.000 mg Salz auf einem Quadratmeter Oberfläche liegen und das SOBO 20 auf seiner Messfläche (ca. 24,63 cm<sup>2</sup>) im Idealfall 98,5 mg Salz detektieren kann. Analog gilt für reine Solestreuung FS100 mit 40 g/m<sup>2</sup>, dass die aufgebrachte Solemenge bei gleicher Salzmenge jedoch wesentlich größer ist, da bei einer 20%-Lösung die restlichen 80 M-% (hier 394,1 mg) Wasser darstellen. Somit liegt bei Trockenstreuung und Solestreuung derselbe absolute Salzgehalt vor, wodurch die Messergebnisse der Trockenstreuung FS0 und der reinen Solestreuung FS100 verglichen werden können und zugleich die Handhabung der Soleerstellung einfacher ist.

**Tabelle 15: Für SOBO 20 aufgebrachte Salz- bzw. Solemenge in mg**

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

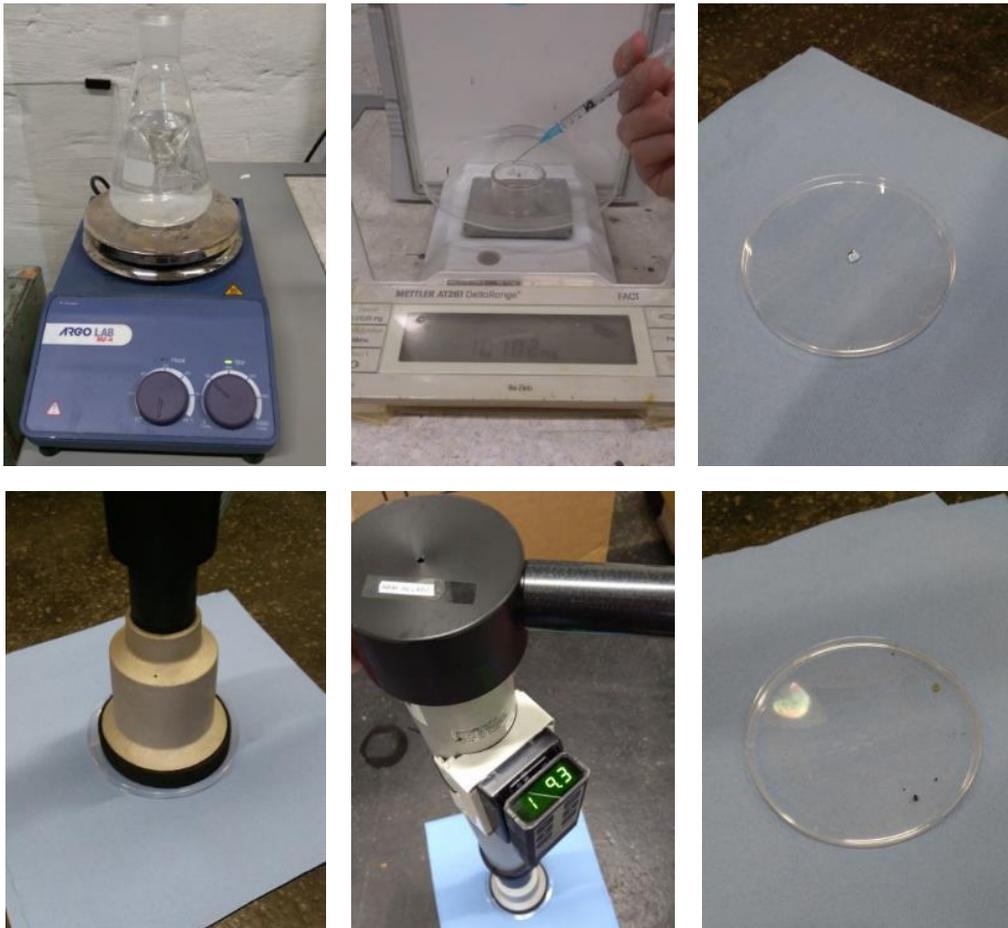


Abbildung 92: Restsalzmessungen im Labor (FS100)

### 8.2.3 Vergleichsmessung reine Sole (FS100)

Die in Abbildung 93 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 erwartenden Ergebnisse strichliert eingezeichnet. Auf der Petrischale sind die Abweichungen vom Sollwert allgemein geringer und steigen von 2 % bei 10 g/m<sup>2</sup> auf 6,7 % bei 40 g/m<sup>2</sup>. Auf der rauen Oberfläche (Bohrkern) steigt mit höherem Salzanteil auch die Streuung und die Unterschätzung der tatsächlich ausgebrachten Salzmenge; beispielsweise werden von 40 g/m<sup>2</sup> ausgebrachtem Streumittel nur zwischen 33 und 37 g/m<sup>2</sup> und damit 8 bis 18 % weniger detektiert.

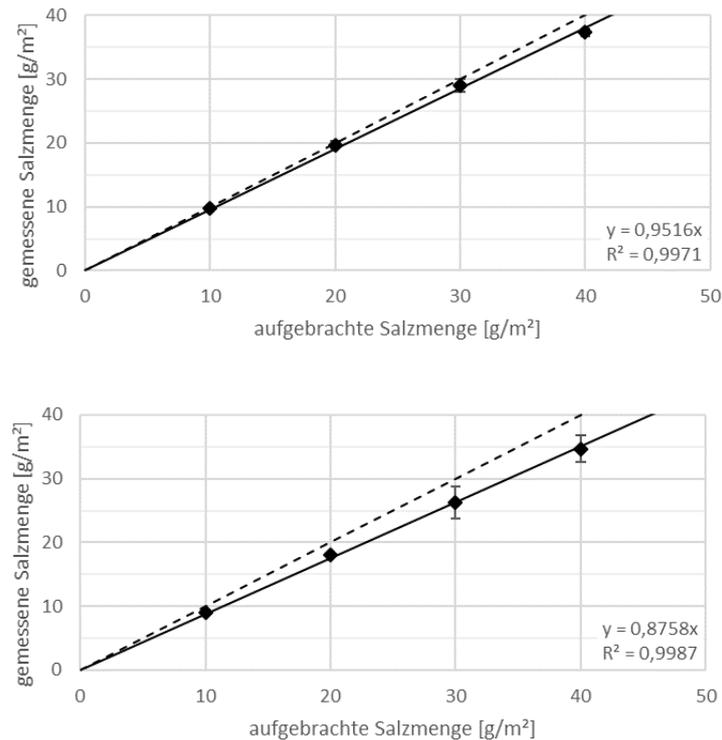
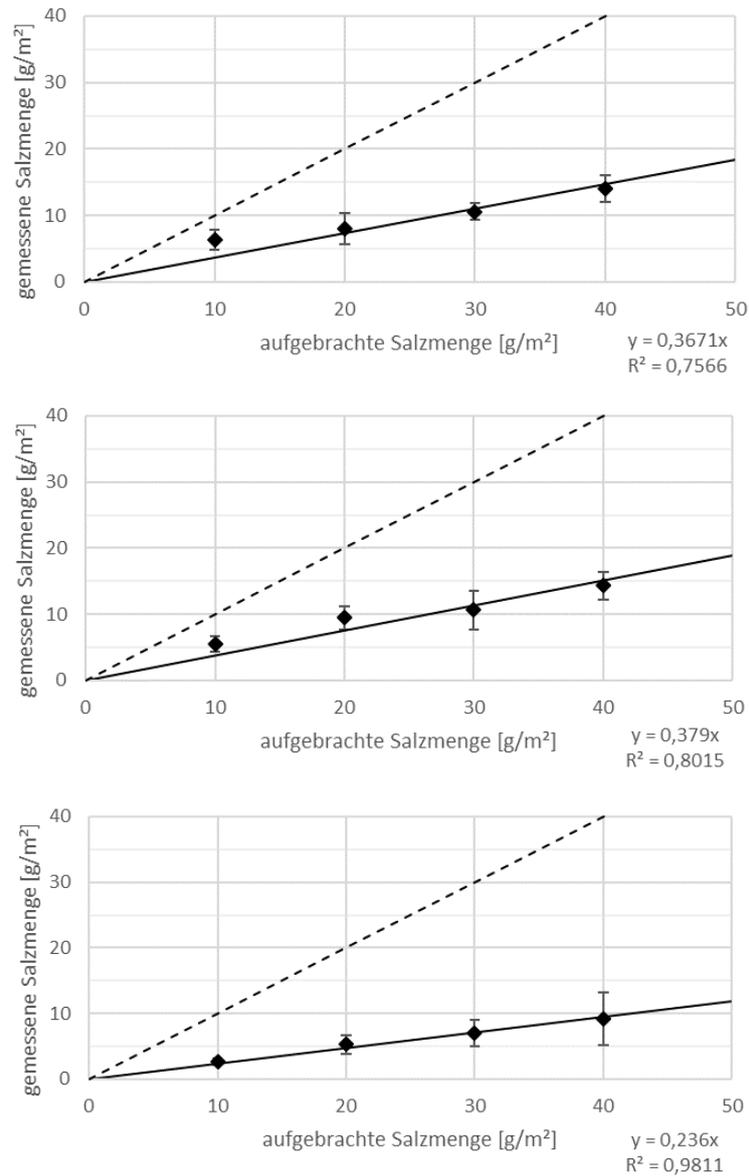


Abbildung 93: Restsalzmessungen im Labor FS100: oben Petrischale; unten Bohrkern

#### 8.2.4 Vergleichsmessung Trockensalz (FS0)

Aufwendiger gestaltete sich die Handhabung von Trockensalz, da das Aufbringen der geforderten Mengen (siehe Tabelle 15) 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 von 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 94. 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 bei allen Messungen mit dem SOBO 20.



**Abbildung 94: Restsalzmessungen im Labor FS0: oben Petrischale Siedesalz; mittig Bohrkern Siedesalz; unten Petrischale Steinsalz**

### 8.2.5 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 95 dargestellt, unterschiedliche Mengen reiner Sole einige Tage der Luft ausgesetzt, um die enthaltene Flüssigkeit zu verdampfen und so das Salz rekristallisieren zu lassen. Dieses rekristallisierte Restsalz war ebenfalls zu detektieren.

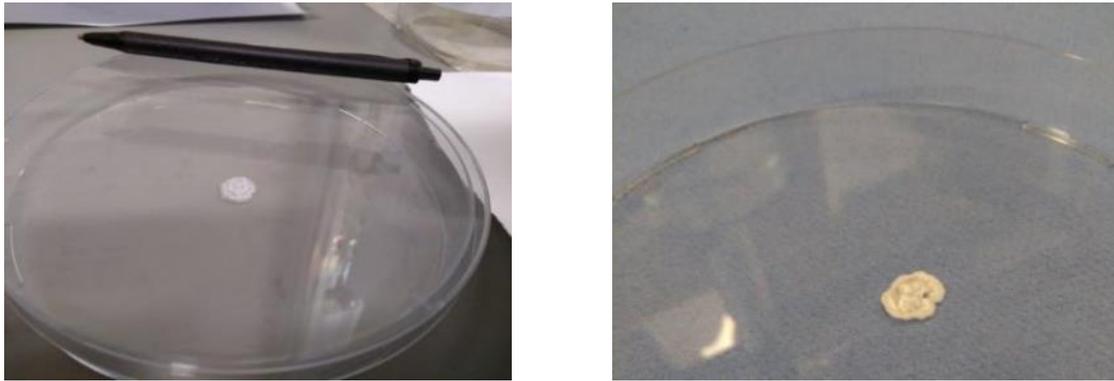


Abbildung 95: FS100 aufgetrocknet (5 Tage)

Wie in Abbildung 96 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 gemessen. Die Ergebnisse im zweiten Diagramm in untenstehender Abbildung 96 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 auf ein akzeptables Niveau erfolgte lediglich bei geringem Salzgehalt.

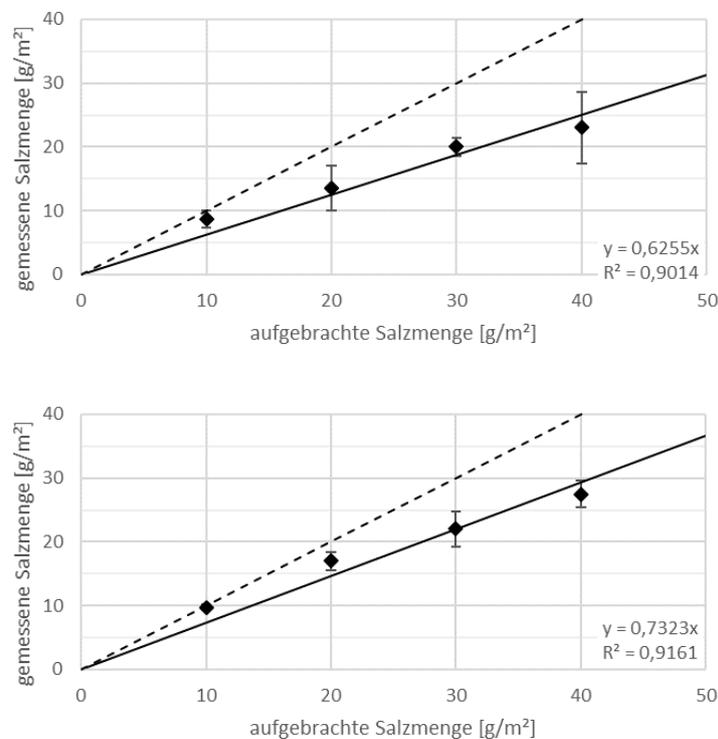


Abbildung 96: FS100 oben aufgetrocknet; unten aufgetrocknet und vor Messung befeuchtet

### 8.3 Restsalz auf der Fahrbahn

Auf Basis der Feldprüfungen soll der zeitliche Verlauf der Abnahme der Restsalzmenge nach Präventivstreuungen ermittelt werden. Weiters sollen die gemessenen Restsalzmengen in der Nähe von Verkehrsmessanlagen stattfinden, um die Auswirkung des Verkehrs auf die Abnahme der Restsalzmengen zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurde gemeinsam mit der ASFI-NAG ein kurzer Autobahnabschnitt an der A22 Donauuferautobahn in Richtung S3 Weinviertler Schnellstraße für Messungen ausgewählt (siehe Abbildung 97).



Abbildung 97: Restsalzmessungen auf der A22

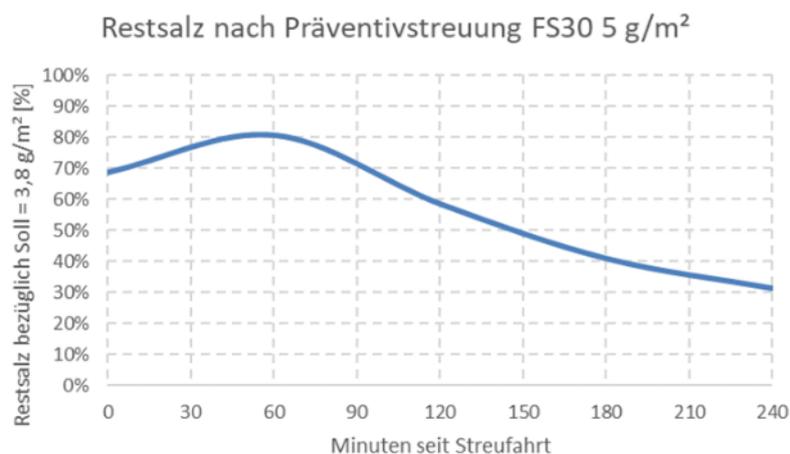
Dabei wurde der erste Fahrstreifen kurz vor der Messung gesperrt und sofort nach Beendigung wieder freigegeben. Eine Messung mit dem SOBO 20 erfolgte kurz vor der Streufahrt, um eventuell noch verbliebene Restsalzmengen zu identifizieren. Danach wurde von einem Streufahrzeug eine Präventivstreuung mit Feuchtsalz FS30 mit  $5 \text{ g/m}^2$  auf einer Breite von zwei Fahrstreifen ausgebracht. Die weiteren Restsalzmessungen fanden unmittelbar nach der Streufahrt sowie 60, 120, 180 und 240 Minuten danach statt. Es wurden je Messung mindestens 9 Messpunkte erstellt, davon jeweils 3 in der linken und rechten Rollspur sowie 3 in der Mitte der Fahrstreifenfläche. Diese Messpunktanordnung ist in Abbildung 98 ersichtlich. Die Fahrbahn war zu Beginn des Versuches leicht feucht und die Lufttemperatur betrug anfänglich  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , nach 4 Stunden  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Oberflächentemperatur stieg während den Messungen von  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  auf  $12 \text{ }^\circ\text{C}$ .



**Abbildung 98: Messpunkte der Restsalzmessungen mit SOBO 20**

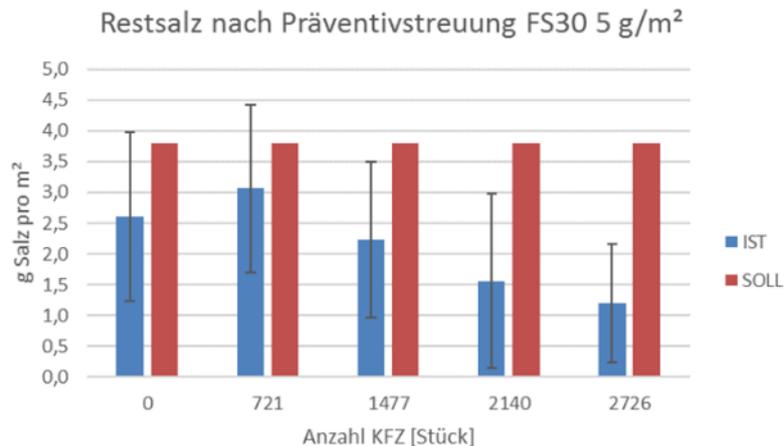
Da die im vorherigen Kapitel angesprochene Ungenauigkeit des Restsalzmessgerätes vor den Messungen bekannt war, konnte aus Eichungsmessungen ein Korrekturfaktor errechnet werden. Dieser ist für jeden SOBO 20 unterschiedlich und wurde hier mit dem Faktor 1,82 gewertet. Geht man nun davon aus, dass der bei Feuchtsalzstreuung FS30 mit  $5 \text{ g/m}^2$  ausgebrachte Salzanteil tatsächlich  $3,8 \text{ g}$  Salz je  $\text{m}^2$  beträgt, können die in Abbildung 99 dargestellte Restsalzmengen gegenübergestellt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass unmittelbar nach der Streufahrt nur  $2,5 \text{ g/m}^2$  bzw. knapp zwei Drittel der ursprünglich ausgebrachten Menge gemessen wurden.

Eine Stunde nach der Streufahrt erhöht sich der gemessene Salzanteil auf der Fahrbahnoberfläche auf knapp über 80 %. Dieser Umstand ist vermutlich der Verteilungswirkung des Verkehrs (vom zweiten Fahrstreifen) geschuldet. Die zweite Messung nach Streufahrt zeigt eine Abnahme des Restsalzgehaltes mit ca. 22 % pro Stunde bezogen auf den ausgebrachten Salzgehalt. Innerhalb der zweiten und dritten Stunde nach Streuung sinkt dieser Wert auf 18 % pro Stunde und zwischen der dritten und vierten Stunde fällt diese Rate auf 10 % pro Stunde.



**Abbildung 99: Restsalzmessungen in Abhängigkeit der Zeit**

Bezieht man nun den oben dargestellten Restsalzgehalt auf die den Messabschnitt durchquerenden Fahrzeuge, so ergibt sich das in Abbildung 100 dargestellte Ergebnis. Durch die verteilende Wirkung des Verkehrs wird das Feuchtsalz besser verteilt und nach einer Stunde wurde ein Maximalwert von 80 % der ausgebrachten Salzmenge ermittelt. Davon ausgehend sinkt nach ca. 1.000 Fahrzeugen der Salzgehalt um 2 bis 3 Prozentpunkte je 100 Fahrzeuge. Ab 2.000 Überrollungen sinkt diese Abnahmerate auf 2 %.



**Abbildung 100: Restsalzmessungen in Abhängigkeit der Fahrzeuge**

Weiters wurden die Werte der im Messbereich gelegenen Glättemeldeanlage ausgelesen und die Ergebnisse den Messungen der Streufahrt gegenübergestellt. Die Auswertungen der Lufttemperatur LT, Fahrbahntemperatur FBT, Gefriertemperatur GT und der relativen Luftfeuchte sind in Abbildung 101 und Abbildung 102 in 6 Minuten Abschnitten zu sehen. Die orange-strichlierten Linien zeigen den Zeitpunkt von Restsalzmessungen an, die rote durchgehende Linie jene der Streufahrt. Grundsätzlich ist die Genauigkeit von automatischen Messsensoren [15][16] als ungenau einzustufen. Trotzdem wurde ein Vergleich als sinnvoll erachtet, da die Sensoren zumindest qualitativ überprüft werden sollten. Jene Sensoren, die die Glättetemperatur ermitteln, können erst ab einem gewissen Feuchtegrad der Fahrbahn bzw. des Sensors messen und daher die Glättetemperatur leider nicht durchgehend dargestellt werden.

Bei der eingetragenen Streufahrt ist ein deutlicher Abfall der Gefriertemperatur zu sehen. Somit erkennt der Sensor zumindest einen Salzeintrag in seiner Umgebung. In der Folge reduzierte sich aufgrund der aufgehenden Sonne der Feuchtigkeitsgehalt, sodass der Sensor keine Werte mehr ermitteln konnte. Durch die SOBO 20 Restsalzmessung wurde der Fahrbahnbelag befeuchtet und diese Feuchtigkeit durch den Verkehr auf den Sensor verteilt, weshalb abermals Messwerte angezeigt wurden. Danach wurde kein Feuchteintrag mehr detektiert bzw. beobachtet und daher konnten keine Gefriertemperatur ermittelt werden.

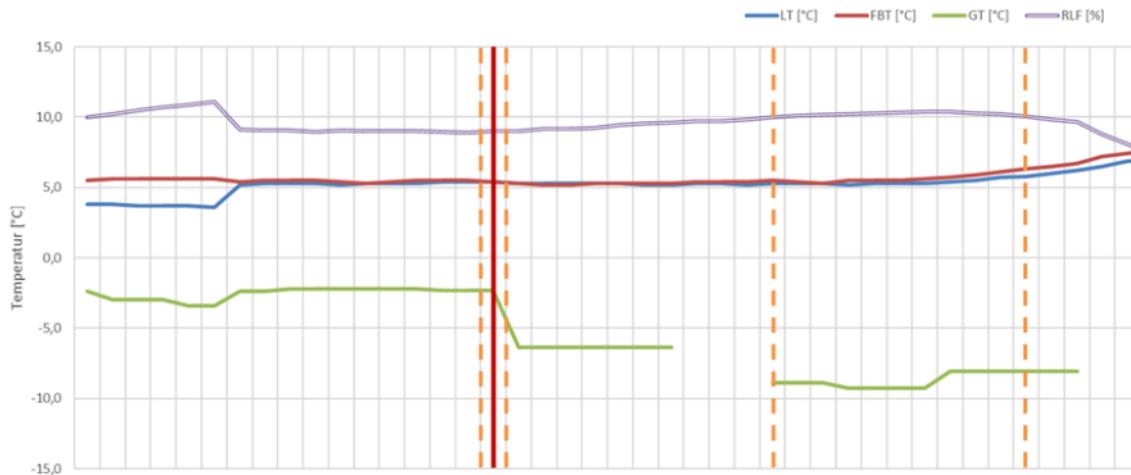


Abbildung 101: Daten der Glättemeldeanlage – Teil 1

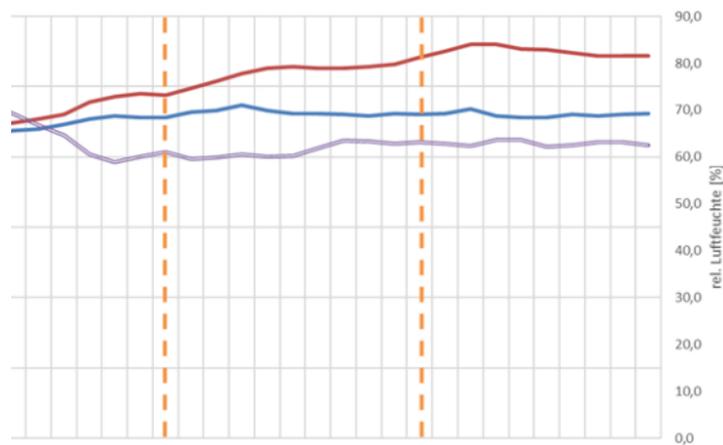


Abbildung 102: Daten der Glättemeldeanlage – Teil 2

## 8.4 Zusammenfassung und Ausblick

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/m<sup>2</sup>) 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<sup>2</sup>) 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 eine systematische Unterschätzung 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.

Aus den bisherigen Messungen des SOBO 20 konnte ein Korrekturfaktor für das zur Verfügung gestellte Gerät ermittelt und in den Feldmessungen eingesetzt werden. Die durchgeführte präventive Feuchtsalzstreuung FS30 mit 5 g/m<sup>2</sup> zeigte eine verteilende Wirkung des Verkehrs und eine Restsalzmenge von immerhin 30 % der ausgebrachten Streumenge nach

4 Stunden bzw. 2.700 Fahrzeugen im hochrangigen Straßennetz. Ein zusätzlicher Vergleich der SOBO 20-Ergebnisse mit den Werten einer Glättemeldeanlage zeigte die bereits aus dem Forschungsbereich WinterFIT I bekannten Grenzen der automatischen Sensoren. Zumindest konnte qualitativ ein Salzeintrag registriert werden.

## 9 Zusammenfassung

Die Untersuchungen der Tauleistung haben gezeigt, dass die Tauleistung von reiner Sole FS100 über FS70, FS50, FS30 bis hin zu Trockensalz FS0 sukzessive anstieg. Der Anstieg entsprach weitgehend dem Anstieg des Salzanteiles in der ausgebrachten Streumenge bei gleicher Einwirkdauer. Somit lässt sich die **Tauleistung der Feuchtsalze gut zwischen** der Tauleistung von **festen (FS0)** und **flüssigen (FS100) Taumitteln einordnen**. Weiters kann anhand der Messdaten und dem entwickelten Tauleistungsmodell eine Vorhersage ohne Berücksichtigung von Streumittelverlusten für jede Kombination aus Soleanteil, Temperatur und Einwirkdauer erfolgen.

Bei der Ermittlung der **Geschwindigkeit der Eisbildung** unter realen winterlichen Temperaturen **mit und ohne Präventivmaßnahmen** wurde festgestellt, dass die Versuche teilweise großen zeitlichen Schwankungen unterliegen. Bei Wiederholungsprüfungen vor allem bei Temperaturen bis  $-6\text{ °C}$  sind diese sehr groß und stark von **kleinen Verunreinigungen** (Kristallisationskeimen) **abhängig**. 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  $-6\text{ °C}$  können mit ca. 15 bis 60 Minuten abgeschätzt werden. Bei Temperaturen bis  $-11\text{ °C}$  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 Streumlaufzeiten** in erster Linie für Autobahnen und Schnellstraßen (max. 3 Stunden Umlaufzeit) **relevant** 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 **Auslaufwinkel**, 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. Aus praktischer Sicht ist somit ein möglichst geringer Feuchtegehalt bei der Lieferung und Lagerung von Salz anzustreben.

Um einen **Vergleich** unterschiedlicher Schneepflüge sowohl bezüglich ihrer **Schneeräumungseffizienz** als auch der **Abnutzung** ihrer **Räumleisten** anzustellen, wurden bereits Vorversuche zur **Entwicklung** und **Erprobung** eines **geeigneten Verfahrens** durchgeführt. Um

eine qualifizierte Aussage zur Feststellung des Abriebs der Schürfleisten und eine Korrelation zwischen Labor- und Feldversuchen herstellen zu können, wurde ein **Prototyp für Abnutzungsversuche im Labor entwickelt**. Weiters wurde mit **ausgewählten Straßenmeistereien** die **Abnutzung der Räumleisten** an definierten Räumstrecken **abgefragt**. Dazu wurden die Meistereien im Winter 2018/19 kontaktiert und um Ihre Mitarbeit gebeten. Mit den sich daraus ergebenden Erkenntnissen konnten die Fragestellungen in Bezug auf Verwendung von Pflug- und Räumleistentyp sowie Räumqualität und Räumleistenabnutzung bearbeitet werden.

In Ergänzung dazu wurden **ausführliche Feldversuche zur Abnutzung** durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuche zeigen teilweise deutliche Unterschiede zwischen den Herstellern bzw. **insgesamt eine bessere Laufleistung und Wirtschaftlichkeit der Kombineisten** im Vergleich zu Stahlräumleisten bei mittlerer bis hoher Beanspruchung. Nicht enthalten in dem Vergleich war der Aufwand für den Tausch der Räumleisten, welche die Ergebnisse tendenziell verstärken. Unabhängig davon haben die Auswertungen der Ausgaben der Projektpartner gezeigt, dass sich die **Ausgaben für Räumleisten auf 0,5% bis 1,0%** der Gesamtausgaben für den Winterdienst belaufen. Die Frage nach der Wahl der Räumleisten ist daher aus Sicht des Arbeitsaufwands und der Verfügbarkeit sowie der Räumleistung von gewisser Bedeutung. Aus rein wirtschaftlicher Sicht sind andere Themen wie z.B. Personalkosten, Salzbeschaffung und Salzlogistik bis hin zum Kraftstoffverbrauch wesentlicher.

Die **Eignung des Restsalzmessgerätes SOBO 20** der Firma Boschung konnte **nur** mit Einschränkung bestätigt werden. Die erwarteten Messergebnisse von NaCl-Sole (**FS100** bei Streumengen von 10 bis 40 g/m<sup>2</sup> Salz) wurden systematisch **mit 2 bis 7 % bei glatten** und **8 bis 18 % bei rauen Oberflächen** unterschätzt. Bei Trockensalzstreuung (**FS0** von 10 bis 40 g/m<sup>2</sup>) wurde 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. Für praktische Messungen ist daher darauf zu achten, dass die **tatsächliche Restsalzmenge bei Streuungen** nicht unterschätzt wird. Praktisch bedeutet dies, dass die **Restsalzabnahme tatsächlich etwas geringer als bisher angegeben** ist und die bisher publizierten Ergebnisse eine Untergrenze darstellen.

Zusätzlich konnte aus den Messungen des **SOBO 20** ein **Korrekturfaktor** abgeleitet und bei den **Feldprüfung** eingesetzt werden. Die durchgeführte **präventive Feuchtsalzstreuung FS30** mit 5 g/m<sup>2</sup> zeigte eine **verteilende Wirkung des Verkehrs** und eine Restsalzmenge von immerhin 30 % der ausgebrachten Streumenge nach 4 Stunden bzw. 2.700 Fahrzeugen im hochrangigen Straßennetz. Diese war in erster Linie auf die Salzaustragung von dem höher liegenden 2. Fahrstreifen zurückzuführen. Der zusätzliche Vergleich der SOBO 20-Ergebnisse mit den **Werten der Glättemeldeanlage** demonstrierte die **Grenzen der passiven und aktiven Restsalzsensoren**. Obwohl diese einen Salzeintrag registrierten, war eine Detektion nur bei entsprechender Feuchte möglich. Dementsprechend sind kontinuierliche Messungen der Restsalzmengen mit den Fahrbahnsensoren nicht möglich.

## 10 Ausblick

Obwohl das gegenständliche Forschungsprojekt einen weiteren Teil der Winterdienstforschung vorangetrieben und neue Erkenntnisse hervorgebracht hat, gibt es weiterhin ungeklärte Forschungsthemen. Zwei der vordringlichsten werden in der Folge kurz skizziert.

### Folgeuntersuchung zur Schneekonsistenz „Slush“ im Übergangsbereich der Gefrierkurve

Gerade im Hinblick auf die Gefrierpunktsuntersuchungen von wässrigen Lösungen (Sole) wurde der Bereich oberhalb der Gefrierkurve, in dem der Salzgehalt zur Verhinderung der Eisbildung ausreichend ist (graue Quadrate in Abbildung 103) und der Bereich unterhalb der Gefrierkurve, in dem es zum vollkommen Durchfrieren der Lösung kommt (blaue Kreise), hinreichend untersucht. Doch im Übergangsbereich zwischen den beiden bildet sich ein Gemisch aus Eiskristallen und wässriger Lösung, der sogenannte „Slush“ (orange Dreiecke), welcher unter bestimmten Umständen eine andere Räum- und Streustrategie erfordert. Daher soll in einem weiterführenden Forschungsprojekt der Slush auf die genauen Umstände seiner Bildung, seine Verdichtbarkeit und seines Einflusses auf die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen untersucht werden.

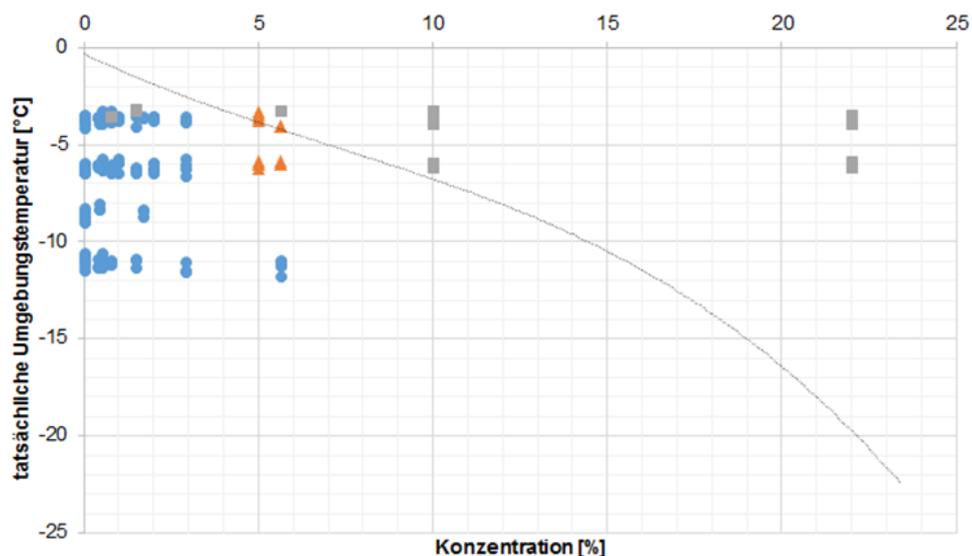


Abbildung 103: Gefrierkurve für NaCl und Probekörperzustand wie in Abbildung 11

### Folgeuntersuchung zur vergleichenden Beurteilung von Räumequipment und Kehrbürsten

Ausgehend von den bisherigen Überlegungen zur Räumleistung, den Vor- und Hauptversuchen mit Schnee- und Schneeeersatzmaterialien hat sich gezeigt, dass es eine Reihe von Einflussfaktoren gibt, welche die Räumleistung erheblich beeinflussen können. Zentrale Faktoren sind der Straßenzustand, wobei insbesondere die Querebenheit (Spurrinnen), die Straßentextur und die Restschneemenge einen Einfluss besitzen. Der Zustand der Schneedecke (frisch

gefallen oder festgefahren) sowie die Umgebungstemperatur knapp über oder unter dem Gefrierpunkt sind wesentlich für die Konsistenz (Schnee oder Slush) und damit für die Räumleistung. Um den Einfluss dieser Faktoren auf die Beurteilung von unterschiedlichem Räumequipment (Nachräumleiste, Schneekehrbürsten etc.) zu minimieren, ist eine hohe Anzahl an Wiederholungen der bereits entwickelten Methodik notwendig. Um unter annähernd gleichbleibenden Randbedingungen Versuche durchzuführen, ist eine geeignete und absperrbare Versuchsstrecke (Spurrinnen) auszuwählen. Nach Bestimmung der Querebenheit und des Texturvolumens des Streckenabschnittes wird eine künstliche Beschneieung vorgenommen (gleichbleibender Schnee), um schließlich nach einer erfolgten Räumfahrt den zurückgebliebenen Schnee bzw. Slush mittels z.B. Laserscanner zu bestimmen.



**Abbildung 104: Untersuchung von Querebenheit für Beurteilung von Räumequipment**

# 11 Anhang

## 11.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektorganisation und Beteiligte	3
Abbildung 2: Projektstrukturplan – Phasen, Arbeitspakete und Meilensteine	5
Abbildung 3: Projektzeitplan - Balkendiagramm	6
Abbildung 4: Tauleistung fester Taumittel [2]	8
Abbildung 5: Tauleistung flüssiger Taumittel [2]	8
Abbildung 6: Methodik zur Bestimmung der Tauleistung flüssiger Taumittel	9
Abbildung 7: Vergleich Tauleistung Fest – Feuchtsalz – Flüssig nach 5, 30 und 240 Minuten [9]	11
Abbildung 8: Gefrierpunktkurven für Natriumchlorid und Calciumchlorid [1]	13
Abbildung 9: Versuchslayout Eisbildung dünner Wasser- bzw. Solefilme in Plexiglasschale	14
Abbildung 10: Gefrierpunktermittlung und Gefrierphasen [10]	15
Abbildung 11: Gefrierkurve für NaCl und Probestoffzustand nach Gefriervorgang [9]	17
Abbildung 12: Charakteristische Konsistenz der Proben nach dem Gefriervorgang [9]	18
Abbildung 13: Gefrierverlauf dest. Wasser bei -3,7 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [9]	19
Abbildung 14: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -3,7 °C nach Restsalzkonzentration [9]	19
Abbildung 15: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -3,7 °C nach Restsalzkonzentration [9]	19
Abbildung 16: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -3,7 °C nach Restsalzkonzentration [9]	20
Abbildung 17: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -3,7 °C nach Restsalzkonzentration [9]	20
Abbildung 18: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -3,7 °C nach Restsalzkonzentration [9]	20
Abbildung 19: Konzentrations- und Gefrierpunktverlauf während des Tauvorganges [14]	22
Abbildung 20: Auswertung Tauleistungsversuche NaCl (FS0) nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [11]	23
Abbildung 21: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [11]	23
Abbildung 22: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -5,0 °C [11]	24
Abbildung 23: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -7,5 °C [11]	24
Abbildung 24: Abgeleitete Tauleistung nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -10,0 °C [11]	24
Abbildung 25: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -2,5 °C [11]	25
Abbildung 26: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -5,0 °C [11]	25
Abbildung 27: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -7,5 °C [11]	26
Abbildung 28: Tauleistung auf Basis der Tauleistungsversuche nach Soleanteil für FS0, FS30, FS70 und FS100 nach Einwirkdauer bei -10,0 °C [11]	26
Abbildung 29: Universelles Tauleistungsmodell auf Basis der Tauleistungsversuche für NaCl (FS0) nach Einwirkdauer und Temperatur mit globaler Parameteranpassung	27

Abbildung 30: Tauleistungsmodell mit Potenzfunktion und Bertalanffy-Term für NaCl (FS0) nach Einwirkdauer und Temperatur mit Parameteranpassung	27
Abbildung 31: Schematische Darstellung der Phasen des Gefriervorganges zusammen mit der Entwicklung der Griffigkeit [14]	28
Abbildung 32: Modellierung der Zeit bis zum Gefrierbeginn in Abhängigkeit von Temperatur, Solekonzentration und Schichtdicke mittels linearer Regression	29
Abbildung 33: Modellierung der Zeit bis zum Gefrierende in Abhängigkeit von Temperatur, Solekonzentration und Schichtdicke mittels linearer Regression	29
Abbildung 34: Sieblinien Stein- und Siedesalz je mit und ohne Antibackmittel	32
Abbildung 35: Anforderungen an Sieblinie nach ÖN 16811-1 [13]	32
Abbildung 36: Korrelation der Auslaufrate und des Auslaufwinkels	34
Abbildung 37: Zusammenhang der Auslaufrate und des Auslaufwinkels in Abhängigkeit des Antibackmittels und der Feuchtigkeit	35
Abbildung 38: Verhalten des Streusalzes VS6-12-Bio	35
Abbildung 39: Relative Auslaufrate von Steinsalz bezogen auf vollkommene Trockenheit	37
Abbildung 40: Auslaufraten in Abhängigkeit des Taumittels und der Feuchtigkeit	37
Abbildung 41: Auslaufwinkel in Abhängigkeit des Taumittels und der Feuchtigkeit	38
Abbildung 42: Optimum des Antibackmittelgehaltes für Steinsalze [12]	39
Abbildung 43: Optimum des Antibackmittelgehaltes für Siedesalze [12]	39
Abbildung 44: Tauleistung Steinsalz FS0 und FS100 mit und ohne Antibackmittel	40
Abbildung 45: Tauleistung Siedesalz FS0 und FS100 mit/ohne Antibackmittel	40
Abbildung 46: Tauleistung FS0 mit und ohne Antibackmittel für 60 und 240 Minuten	41
Abbildung 47: Tauleistung FS100 mit/ohne Antibackmittel für 60 und 240 Minuten	41
Abbildung 48: Tauleistung Steinsalz auf tatsächlichen Salzgehalt rückgerechnet	42
Abbildung 49: Tauleistung Siedesalz auf tatsächlichen Salzgehalt rückgerechnet	42
Abbildung 50: Meistereien und Pflüge je Bundesland	45
Abbildung 51: Pflug- und Räumleistenhersteller	45
Abbildung 52: prozentuelle Aufteilung der Pflugerhersteller je Bundesland	46
Abbildung 53: prozentueller Anteil an bestimmter Zusatzausrüstung	46
Abbildung 54: Aufteilung des Pflugalters	47
Abbildung 55: Räumleistenverbrauch und Tauschintervall	47
Abbildung 56: v.l.n.r. Flötzingler DKV-A und Springer SHL 3204 mit Nachräumklavier	49
Abbildung 57: v.l.n.r. Kombinationsräumleiste und Nachräumleiste	49
Abbildung 58: Methodik zur Beurteilung der Räumqualität	51
Abbildung 59: Vorversuch Schneeaufnahme: a) nicht geräumt; b) nach händischer Vorräumung; c) nach Räumung mit Nasssauger; d) verstopftes Saugrohr	52
Abbildung 60: Vorversuch Schneeaufnahme: a) nicht geräumt; b) nach händischer Vorräumung; c) nach händischem Einkehren; d) Restschnee	53
Abbildung 61: Vorversuch Schneeaufnahme am Mistplatz Wien-Auhof - Flötzingler DK-V	54
Abbildung 62: Vorversuch Schneeaufnahme am Mistplatz Wien-Auhof – Springer SHL 3204	54
Abbildung 63: Vorversuch Schneeaufnahme mit Schwammfix von Pergo-Tools	55

Abbildung 64: Löschschaum als Schneersatzmaterial	56
Abbildung 65: befeuchtete Wärmedämmschüttung als Schneersatzmaterial	56
Abbildung 66: Trockenschüttung nach Räumfahrt	57
Abbildung 67: Bereitgestellter Schneepflug der MA48	58
Abbildung 68: Feinsand nach Räumfahrt	58
Abbildung 69: Versuchsort Kirchberg am Wechsel	59
Abbildung 70: Rahmen zur Ermittlung der Restmengen bzw. der Räumleistung	60
Abbildung 71: Bereitgestellter Schneepflug der Straßenmeisterei Gloggnitz	60
Abbildung 72: Voruntersuchung von Querebenheit und Oberflächentextur	62
Abbildung 73: Schneekanone für Beschneigung der Versuchsstrecke und Kristallform von Naturschnee bzw. Kunstschnee	63
Abbildung 74: Ausrüstung zur Ermittlung der Restschneemengen	64
Abbildung 75: Zusammenhang von Lebens- und Restlebensdauer	65
Abbildung 76: Auswertung kumulatives Pflugalter und Räumleistenverbrauch	66
Abbildung 77: Räumleistenverbrauch nach Typ und Zeit (Stahl/Kombileisten)	66
Abbildung 78: Räumleistenverbrauch nach Typ und Laufleistung (Stahl/Kombileisten)	67
Abbildung 79: Feldversuch Verschleiß der Räumleistensegmente	68
Abbildung 80: Erste Charge des Verschleißversuchs	68
Abbildung 81: Abnutzung und Zustandsprognose alle Stahlleisten	69
Abbildung 82: Laufleistung und Ausfallsverteilung alle Stahlleisten (Ausfall = 50 mm)	69
Abbildung 83: Abnutzung und Zustandsprognose Stahlleisten (ohne Ausreißer)	70
Abbildung 84: Laufleistung und Ausfallsverteilung ohne Ausreißer (Ausfall = 50 mm)	70
Abbildung 85: Abnutzung und Zustandsprognose alle Kombileisten bis 10 mm	70
Abbildung 86: Abnutzung und Zustandsprognose alle Kombileisten bis 50 mm	71
Abbildung 87: Laufleistung und Ausfallsverteilung alle Stahlleisten (Ausfall = 50 mm)	71
Abbildung 88: Prognostizierte mittlere Laufleistung bis zur jeweiligen Ausfallgrenze	71
Abbildung 89: Kostenvergleich nach Laufleistung bis zur Erreichung der Ausfallgrenze	72
Abbildung 90: Prototyp zur Beurteilung des Räumleistenverschleißes	73
Abbildung 91: SOBO20 Restsalzmessgerät	75
Abbildung 92: Restsalzmessungen im Labor (FS100)	77
Abbildung 93: Restsalzmessungen im Labor FS100: oben Petrischale; unten Bohrkern	78
Abbildung 94: Restsalzmessungen im Labor FS0: oben Petrischale Siedesalz; mittig Bohrkern Siedesalz; unten Petrischale Steinsalz	79
Abbildung 95: FS100 aufgetrocknet (5 Tage)	80
Abbildung 96: FS100 oben aufgetrocknet; unten aufgetrocknet und vor Messung befeuchtet	80
Abbildung 97: Restsalzmessungen auf der A22	81
Abbildung 98: Messpunkte der Restsalzmessungen mit SOBO 20	82
Abbildung 99: Restsalzmessungen in Abhängigkeit der Zeit	82
Abbildung 100: Restsalzmessungen in Abhängigkeit der Fahrzeuge	83

Abbildung 101: Daten der Glättemeldeanlage – Teil 1	84
Abbildung 102: Daten der Glättemeldeanlage – Teil 2	84
Abbildung 103: Gefrierkurve für NaCl und Probekörperzustand wie in Abbildung 11	88
Abbildung 104: Untersuchung von Querebenheit für Beurteilung von Räumequipment	89
Abbildung 105: Gefrierverlauf reines Wasser bei -6,2 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [9]	96
Abbildung 106: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]	96
Abbildung 107: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]	96
Abbildung 108: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]	97
Abbildung 109: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [9]	97
Abbildung 110: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [9]	97
Abbildung 111: Gefrierverlauf reines Wasser bei -8,6 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [9]	98
Abbildung 112: Gefrierverlauf 0,5 mm und 2 mm bei -8,6 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]	98
Abbildung 113: Gefrierverlauf reines Wasser bei -11,1 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [9]	98
Abbildung 114: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]	99
Abbildung 115: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]	99
Abbildung 116: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]	99

## 11.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Phasen des Forschungsprojekts Wirkmodell Streuung, Räumung und Restsalz	4
Tabelle 2: Prüfprogramm Tauleistung Feuchtsalz	10
Tabelle 3: Prüfergebnisse Tauleistung Feuchtsalz	10
Tabelle 4: Prüfprogramm Eisbildungsdauer Wasser bzw. Solelösungen	15
Tabelle 5: Unterschied eingestellter zu gemessener Temperatur des Klimaschranks	17
Tabelle 6: Verfügbare Auftausalze (NaCl) und Antibackmittel sowie -gehalte für Österreich	31
Tabelle 7: Prüfprogramm Rieselfähigkeit	33
Tabelle 8: Prüfprogramm Tauleistung mit und ohne Antibackmittel	33
Tabelle 9: Auslaufrate bezogen auf den prozentualen Auslauf vollkommener Trockenheit	36
Tabelle 10: Auswahl Pflüge für Feldversuche [technische Details lt. Herstellerdatenblätter]	48
Tabelle 11: Auswahl Räumleisten für Feldversuche	48
Tabelle 12: Ergebnisse des Sandvorversuches	59
Tabelle 13: Ergebnisse der Räumleistungsversuche mit Sand	61
Tabelle 14: Einzuhaltende Werte für die Überprüfung der SOBO 20 Elektroneinheit	75
Tabelle 15: Für SOBO 20 aufgebrauchte Salz- bzw. Solemenge in mg	76

## 11.3 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, für Bundesländer, ASFINAG, BMVIT, 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] M. Hoffmann, & M. Steininger & A. Böhmer & J. Neuhold (2015); Technische und wirtschaftliche Aspekte von Streuungen mit erhöhtem Soleanteil; Strasse und Autobahn, Nr. 9/2015; S 618 - 626
- [7] B. Wehner: „Griffigkeitsmessungen auf winterglatten Fahrbahnoberflächen“; Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 40, Bad Godesberg (D), 1960.
- [8] Erkenntnis des Verwaltungsgerichtshofes (VwGH), Geschäftszahl 2010/10/0092, Entscheidungsdatum 14.07.2011, 2011.
- [9] 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.
- [10] ASTM D1177-16; Standard Test for Freezing Point of Aqueous Engine Coolants; ASTM International, West Conshohocken (USA), 2007.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Austrian Standards (AS); ÖNORM EN 16811-1: Winterdienstausrüstung – Enteisungsmittel – Teil 1: Natriumchlorid – Anforderungen und Prüfmethode, Wien, 2016.
- [14] P. Nutz, M. Hoffmann: Vorlesungsunterlagen der Lehrveranstaltung Straßenbetrieb an der Technischen Universität Wien, 2017.
- [15] H. Badelt et al; Prüfung von Sensoren für Glättemeldeanlagen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (bast), Verkehrstechnik Heft V 146, Bergisch Gladbach, 2006.
- [16] H. Badelt, S. Eimermacher: „Sensoren für Straßenwetterstationen – Qualität und deren Prüfung“ VKS-News Nr. 228, 2018.
- [17] R.R. Schulz (2006); Rauhtiefenmessung an Betonoberflächen; Vortragskriptum; Frankfurt
- [18] M. Hoffmann (2019): Lebenszykluskosten der Straßeninfrastruktur; Monographie zur Habilitation an der Technischen Universität Wien; Wien

### 11.4 Temperaturverläufe Eisbildung

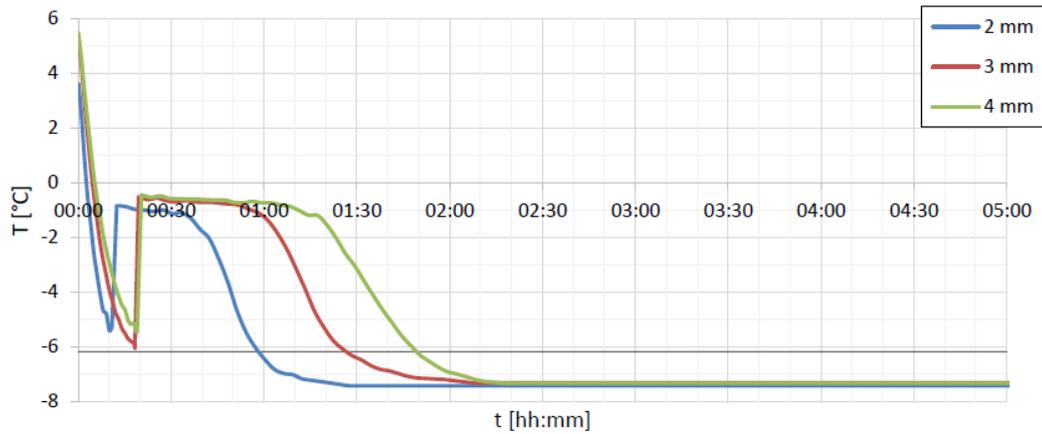


Abbildung 105: Gefrierverlauf reines Wasser bei -6,2 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [9]

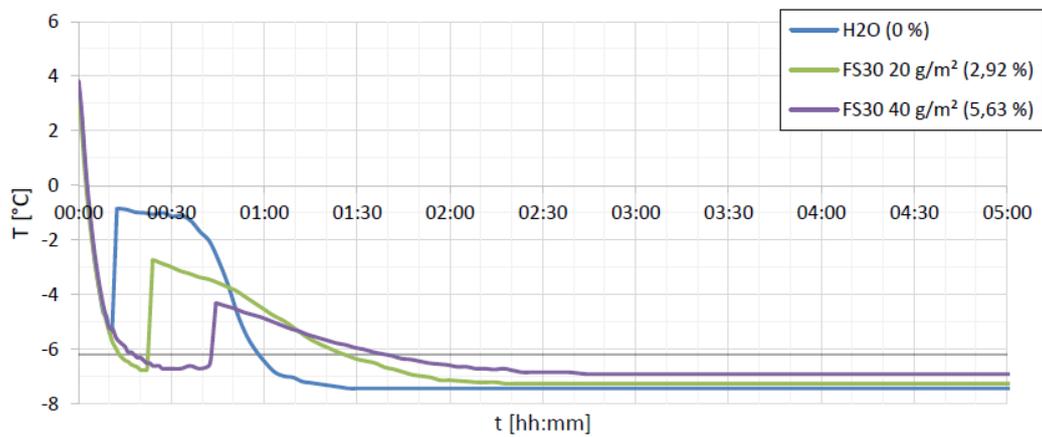


Abbildung 106: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]

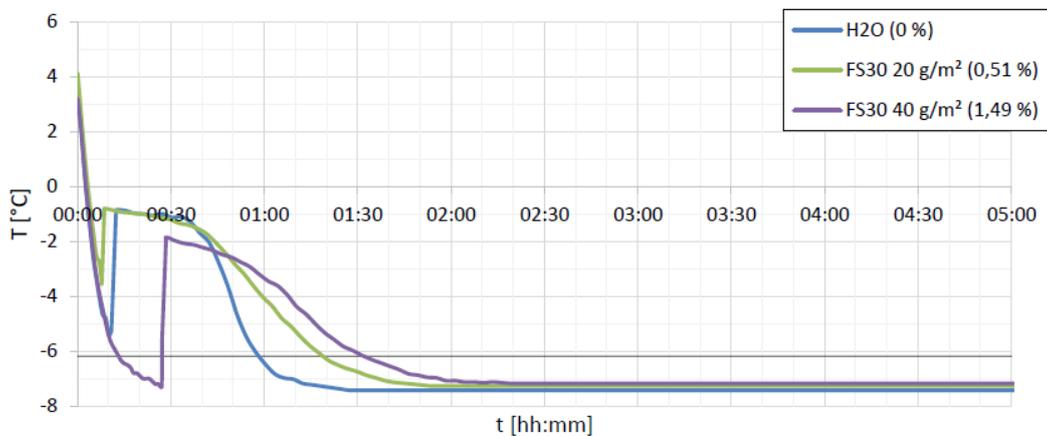


Abbildung 107: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]

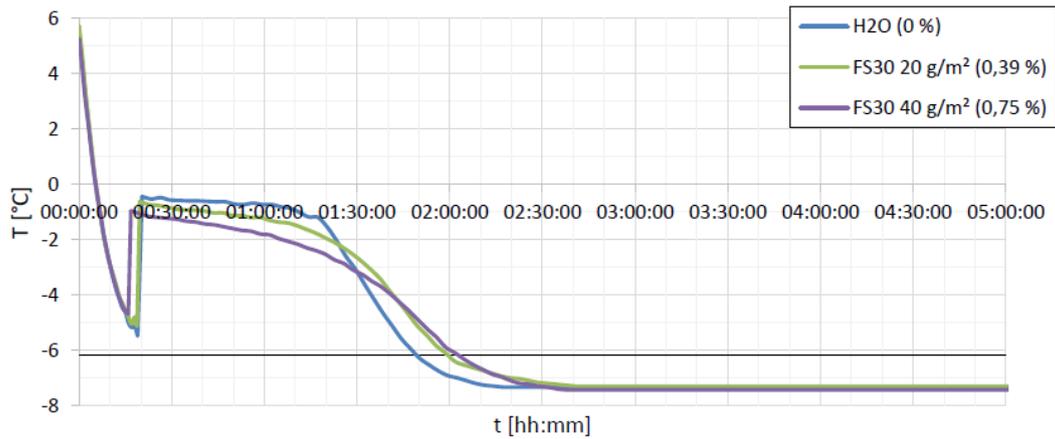


Abbildung 108: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]

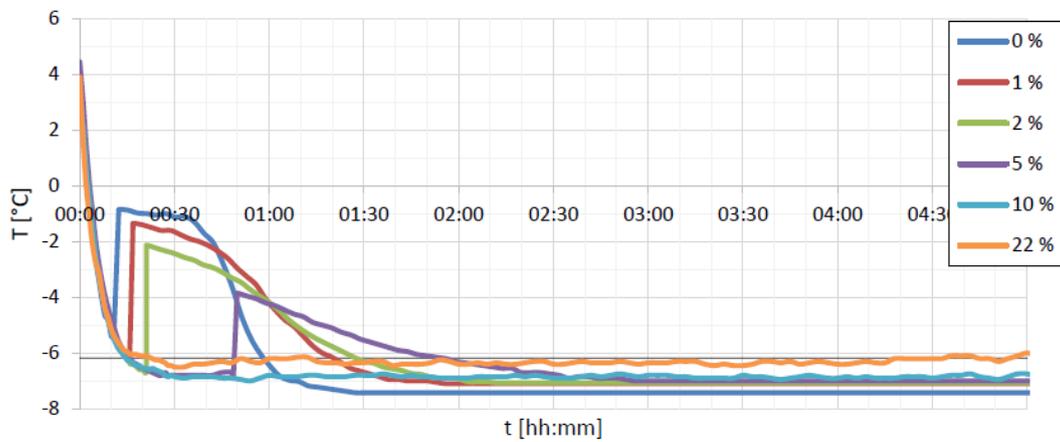


Abbildung 109: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [9]

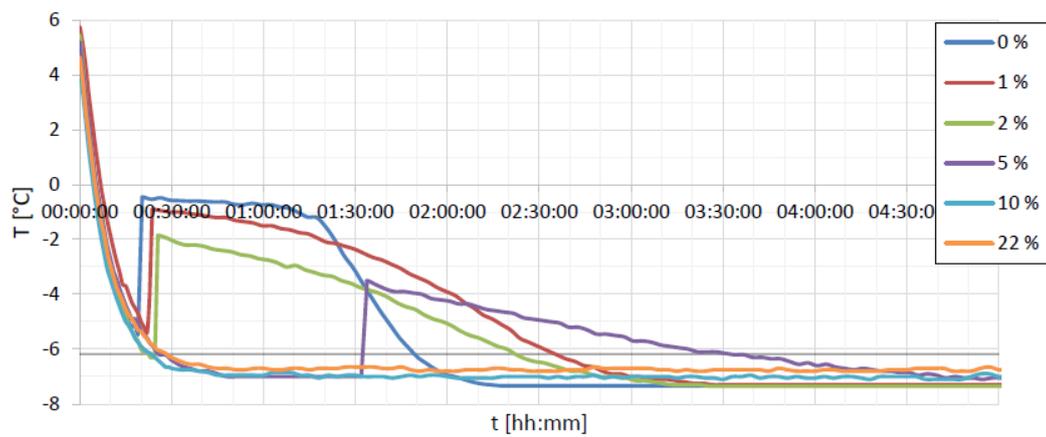


Abbildung 110: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -6,2 °C für unterschiedliche Salzkonzentrationen [9]

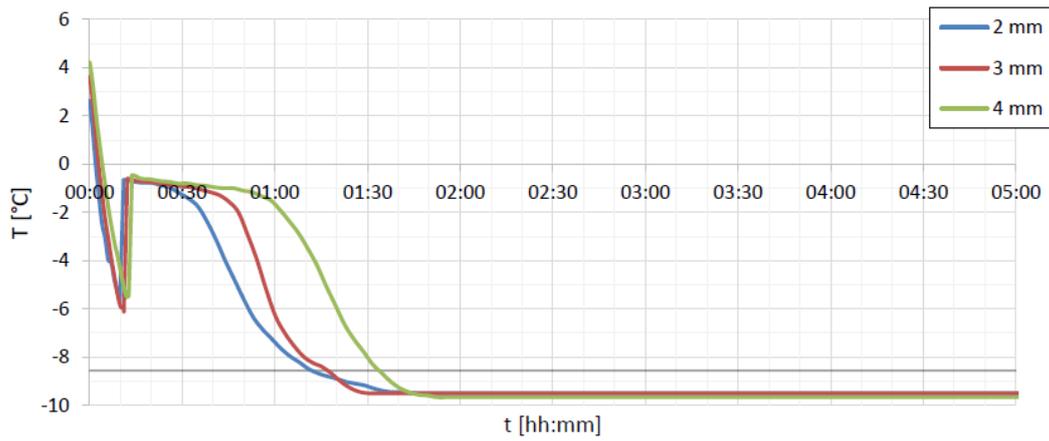


Abbildung 111: Gefrierverlauf reines Wasser bei -8,6 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [9]

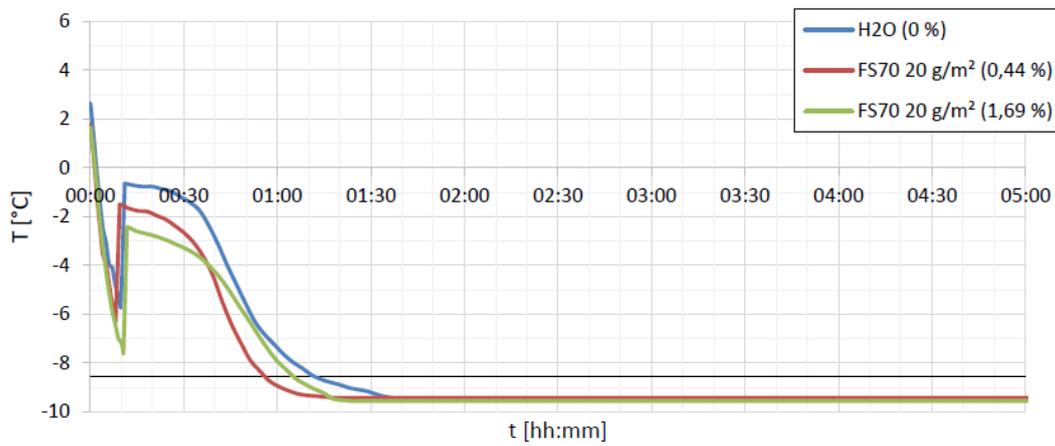


Abbildung 112: Gefrierverlauf 0,5 mm und 2 mm bei -8,6 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]

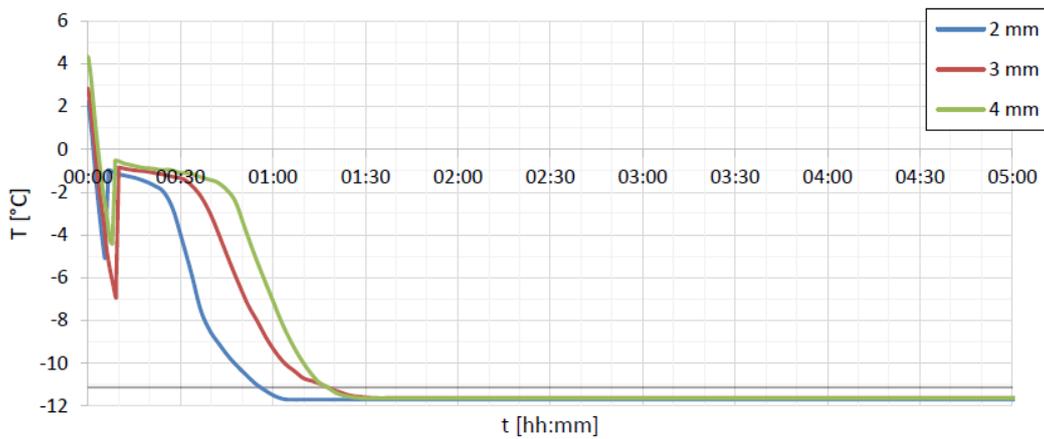


Abbildung 113: Gefrierverlauf reines Wasser bei -11,1 °C für unterschiedliche Wasserfilmdicken [9]

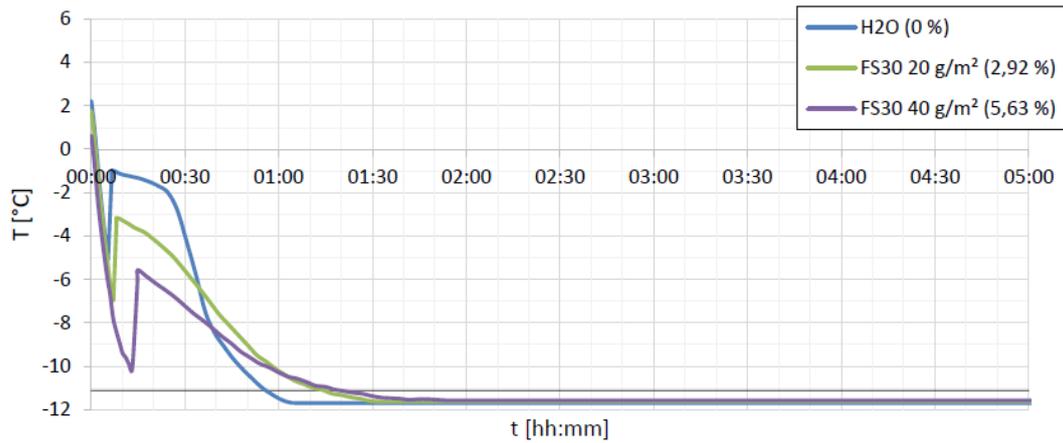


Abbildung 114: Gefrierverlauf Reifmenge 0,5 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]

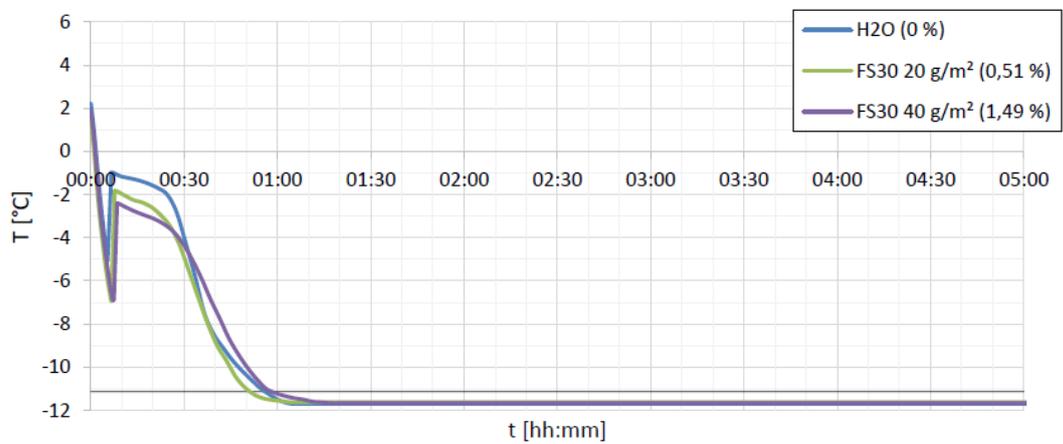


Abbildung 115: Gefrierverlauf Niederschlag 2 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]

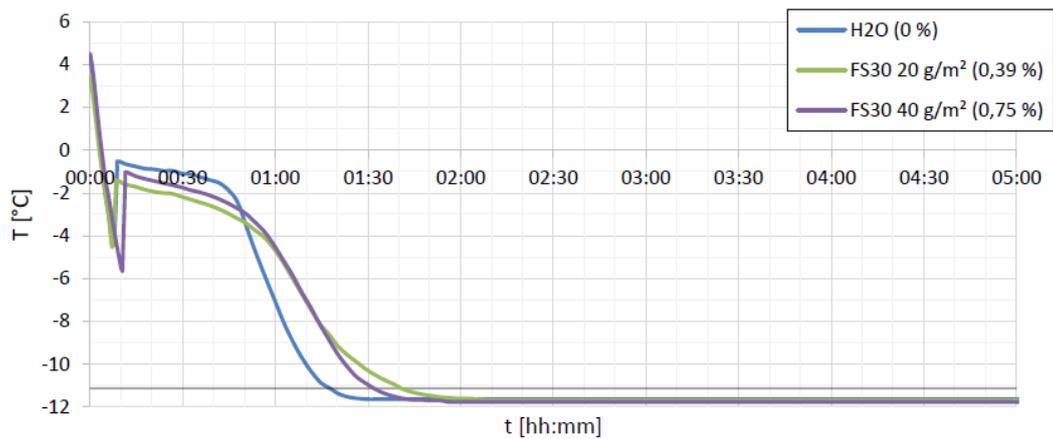


Abbildung 116: Gefrierverlauf Niederschlag 4 mm bei -11,1 °C für unterschiedliche Feuchtsalzmengen [9]