

Diploma Thesis

**Assessment of alternative thawing agents for winter  
maintenance  
regarding thawing capacity and grip**

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieurin  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

DIPLOMARBEIT

**Beurteilung alternativer Streumittel im Wiener  
Winterdienst  
bezüglich Tauleistung und Griffigkeit**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer  
Diplom-Ingenieurin  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Marlene Krejcy**

Matr.Nr.: 01426377

unter der Anleitung von

Assoc.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Bernhard Hofko**

Dipl.-Ing. **Michael Gruber**

Institut für Verkehrswissenschaften  
Forschungsbereich Straßenwesen  
Technische Universität Wien,  
Gusshausstraße 28/E230-3, 1040 Wien

Wien, Juni 2020

---

## Kurzfassung

Um auch bei winterlichen Bedingungen eine ausreichende Verkehrssicherheit zu gewährleisten, müssen entsprechende Winterdienstarbeiten durchgeführt werden. Diese Aufgabe obliegt in Wien der MA 48, der Magistratsabteilung für Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien. Neben der konventionellen Schneeräumung werden auch Streuarbeiten durchgeführt. Hierbei werden zum einen abstumpfende Streumittel, welche die Fahrbahngriffigkeit erhöhen, und zum anderen auftauende Streumittel zur Schnee- und Eisschmelze aufgebracht.

Diese Studie legt den primären Fokus auf die auftauende Streuung.

Zu auftauenden Zwecken wird als Streumittel hauptsächlich Natriumchlorid, kurz NaCl, eingesetzt. Aus umweltschutztechnischen Gründen ist es in manchen Bereichen jedoch nicht zulässig, NaCl auszustreuen, die MA 48 behilft sich in diesen Zonen mit Kaliumcarbonat. Doch auch Kaliumcarbonat, welches ausschließlich in granulierter Form erhältlich ist, stellt, besonders auf Grund der Schwierigkeiten bei der Soleherstellung, keine zufriedenstellende Alternative dar.

Ziel dieser Arbeit ist es somit ein flüssiges Auftaumittel zu finden, für Bereiche, in denen keine NaCl-Streuung zulässig ist. Dieses neuartige Taumittel soll dann anstatt Kaliumcarbonat eingesetzt werden. Die auf Basis einer ausführlichen Recherche ausgewählten Alternativstreumittel „Viaform“ (Addcon, Deutschland) und „Auftaumittel 49 % 1:1“ (Brenntag, Österreich) werden hinsichtlich Gefrierpunkt und Tauleistung in Laborversuchen im Klimaschrank, und bezüglich Griffigkeitsminderung mittels Grip Tester Messungen am Feld untersucht. Die Ergebnisse werden mit jenen von Natriumchlorid und Kaliumcarbonat, sowie mit jenen des Enteisungsmittels (Winkler, Deutschland) und Propylenglycol, welche zwei weitere Referenzmittel darstellen, verglichen.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass sowohl ein Einsatz von „Viaform“ als auch des „Auftaumittels 49 % 1:1“ als Ersatz für Kaliumcarbonat theoretisch möglich wäre. Anwendungstechnisch ergeben sich bei keinem der beiden Auftaumittel Probleme, aus technischer Sicht stellt „Viaform“ jedoch die bessere Alternative dar. Die Kosten belaufen sich auf das 15-fache im Vergleich zu Natriumchlorid, und ungefähr auf das 4-fache im Vergleich zu Kaliumcarbonat, folglich sollte „Viaform“ nur in jenen Gebieten eingesetzt werden, in denen aus umweltschutztechnischen Gründen keine NaCl-Streuung zulässig ist.

## Abstract

During the cold season winter maintenance is critical to ensure the road safety for all users. In Vienna, the municipal authorities for waste disposal and fleet, MA 48, are in charge of winter service. In addition to snow removal they also salt roads and sidewalks. They either use grit, such as sand or gravel, or thawing agents which are supposed to melt snow and ice.

The present study focuses on thawing agents.

Sodium chloride (NaCl) is the mainly used thawing agent in winter maintenance. However, it is prohibited in some places due to environmental reasons; in these areas the MA 48 substitutes sodium chloride with potassium carbonate, even though it is only available in granular form and the sole production can be problematic as the granules do not dissolve completely in water.

This study aims at finding a better liquid alternative to potassium carbonate to be used in areas where sodium chloride is prohibited.

After intensive research the MA 48 decided that “Viaform” (Addcon, Germany) and “Auftaumittel 49 % 1:1” (Brenntag, Austria) could be considered as potential alternatives. Therefore these two thawing agents were tested regarding freezing point, thawing performance and impact on friction of road surfaces. Sodium chloride and potassium carbonate as well as the “De-icing agent” (Winkler, Germany) and propylenglycol served as references.

The results of the study indicate that both –“Viaform” and “Auftaumittel 49 % 1:1”– could replace potassium carbonate. Considering technical aspects “Viaform” is declared as the preferable thawing agent. However, the costs are approximately 15 times as high as for sodium chloride and four times higher than for potassium carbonate, therefore “Viaform” should be used in environmental critical areas only.

## Inhalt

Kurzfassung .....	1
Abstract .....	2
Zusammenfassung.....	6
1 Ausgangssituation .....	8
1.1 Allgemeine Einführung.....	8
1.2 Verordnungen und Richtlinien .....	9
1.2.1 RVS 12.04.12.....	10
1.2.2 RVS 12.04.16.....	11
1.2.3 Winterdienstverordnung.....	12
1.2.4 § 1319a ABGB.....	12
1.3 Streumittel.....	13
1.3.1 Abstumpfende Streumittel.....	13
1.3.2 Auftauende Streumittel.....	13
1.4 Streumengen in Österreich [5].....	16
1.5 Streumethoden Wien.....	16
2 Natriumchlorid .....	17
2.1 Allgemein.....	17
2.2 Eigenschaften .....	17
2.3 Wirkungsweise .....	17
3 Alternative Streumittel.....	19
3.1 Kaliumcarbonat .....	20
3.2 Viaform (50% Kaliumformiat).....	21
3.3 Auftaumittel 49 % 1:1 (20-30 % Kaliumcarbonat).....	21
3.4 Enteisungsmittel (50-60 % Ethanol, 0-10 % Ethandiol).....	22
3.5 Propylenglykol .....	22
3.6 Sno'n'Ice .....	22
4 Kalibrierung .....	24
4.1 Klimaschrank .....	24
4.1.1 Allgemein.....	24
4.1.2 Kalibrierung Datenlogger - 1. Messung.....	24
4.1.3 Kalibrierung Datenlogger - 2. Messung.....	25
4.1.4 Temperaturverteilung im Klimaschrank.....	27
4.1.5 Konstruktive Maßnahmen zur Reduktion des Temperaturgefälles .....	29
4.1.6 Praktischer Lösungsansatz.....	30
4.2 Verbesserung der Prüfmethoden.....	32
4.3 Hinweis Arbeitsanweisung .....	33
5 Gefrierversuche.....	34
5.1 Gefriervorgang .....	34

5.2	Versuchsablauf: Gefrierpunktbestimmung .....	36
5.3	Prüfprogramm .....	37
5.4	Ergebnisse .....	37
5.4.1	Natriumchlorid .....	37
5.4.2	Kaliumcarbonat .....	39
5.4.3	Viaform .....	40
5.4.4	Auftaumittel 49 % 1:1.....	40
5.4.5	Enteisungsmittel.....	41
5.4.6	Propylenglykol .....	41
5.4.7	Sno'n'Ice .....	41
5.4.8	Schlussfolgerung.....	42
5.5	Referenzstudie für Natriumchlorid .....	43
6	Tauleistungsversuche .....	45
6.1	Tauvorgang.....	45
6.2	Versuchsablauf: Tauleistung flüssiger Taumittel.....	45
6.3	Prüfprogramm .....	47
6.4	Ergebnisse .....	48
6.4.1	Natriumchlorid .....	48
6.4.2	Kaliumcarbonat .....	48
6.4.3	Viaform .....	49
6.4.4	Auftaumittel 49 % 1:1.....	49
6.4.5	Enteisungsmittel.....	50
6.4.6	Propylenglykol .....	50
6.4.7	Vergleich.....	50
6.4.8	Schlussfolgerung.....	58
6.5	Monetäre Tauleistung .....	59
6.5.1	Exemplarisches Beispiel.....	59
6.6	Referenzstudie für Natriumchlorid .....	60
7	Griffigkeitsversuche.....	63
7.1	Allgemein.....	63
7.2	Versuchsablauf .....	63
7.3	Prüfprogramm .....	65
7.4	Ergebnisse .....	66
7.5	Schlussfolgerung.....	68
8	Abschließende Bewertung .....	69
9	Zusammenfassung.....	72
	Literaturverzeichnis.....	73
	Abbildungsverzeichnis.....	75
	Tabellenverzeichnis .....	76

---

Formelverzeichnis .....	77
Anhang .....	78
Inhaltsverzeichnis Anhang .....	78
Abbildungsverzeichnis Anhang.....	78
Tabellenverzeichnis Anhang.....	78
Taumittelvergleich.....	79
Gefrierkurven Natriumchlorid.....	81
Gefrierkurven Kaliumcarbonat.....	82
Tauleistungen aller Taumittel bei -5°C.....	82
Tauraten aller Taumittel bei -5°C.....	83
Tauleistungen aller Taumittel bei -10°C.....	84
Tauraten aller Taumittel bei -10°C.....	86

## Zusammenfassung

Um auch bei winterlichen Bedingungen eine ausreichende Verkehrssicherheit zu gewährleisten, müssen entsprechende Winterdienstarbeiten durchgeführt werden. Diese Aufgabe obliegt in Wien der MA 48, der Magistratsabteilung für Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien. Neben der konventionellen Schneeräumung werden auch Streuarbeiten durchgeführt. Hierbei werden zum einen abstumpfende Streumittel, welche die Fahrbahngriffigkeit erhöhen, und zum anderen auftauende Streumittel zur Schnee- und Eisschmelze aufgebracht.

Diese Studie legt den primären Fokus auf die auftauende Streuung.

Zu auftauenden Zwecken wird als Streumittel hauptsächlich Natriumchlorid, kurz NaCl, eingesetzt. Aus umweltschutztechnischen Gründen ist es in manchen Bereichen jedoch nicht zulässig, NaCl auszustreuen, die MA 48 behilft sich in diesen Zonen mit Kaliumcarbonat. Doch auch Kaliumcarbonat, welches ausschließlich in granulierter Form erhältlich ist, stellt, besonders auf Grund der Schwierigkeiten bei der Soleherstellung, keine zufriedenstellende Alternative dar.

Ziel dieser Arbeit ist es somit ein flüssiges Auftaumittel zu finden, für Bereiche, in denen keine NaCl-Streuung zulässig ist. Dieses neuartige Taumittel soll dann anstatt Kaliumcarbonat eingesetzt werden.

Dazu wird in **Kapitel 1** zuerst eine ausführliche Recherche der momentanen Winterdienstsituation in Wien unter Berücksichtigung der gesetzlichen Grundlagen durchgeführt.

Auf Grund der Präsenz von Natriumchlorid als auftauendes Streumittel werden dessen Eigenschaften und Wirkungsweise anschließend in **Kapitel 2** beschrieben.

Nach den beiden Grundlagenkapiteln 1 und 2 werden in **Kapitel 3** eine Vielzahl alternativer Streumittel aufgelistet. Unter Einbeziehung der gesetzlichen Grundlagen und nach Absprache mit der MA 48 werden „Viaform“ (Addcon, Deutschland) und das „Auftaumittel 49 % 1:1“ (Brenntag, Österreich) als bestmögliche Alternativen festgelegt. Hinzu kommen ein Enteisungsmittel und der Alkohol Propylenglykol, welche den beiden eben genannten Alternativen als Referenzwerte dienen. Die in den darauffolgenden Kapiteln durchgeführten Versuche testen sowohl Viaform und das Auftaumittel 49 % 1:1, als auch ein Enteisungsmittel (Winkler, Deutschland) und Propylenglykol, sowie Natriumchlorid und Kaliumcarbonat. Zusätzlich wird bei der Gefrierpunktbestimmung ein weiteres Streumittel, „Sno'n'Ice“, analysiert.

Es werden sowohl Versuche im Klimaschrank betreffend Gefrierpunkt und Tauleistung durchgeführt, als auch Versuche im Freien zur Griffigkeitskontrolle.

Bevor jedoch mit den Versuchen im Klimaschrank begonnen werden kann, muss dieser kalibriert werden. Die genaue Beschreibung der Kalibrierung wird in **Kapitel 4** behandelt.

In **Kapitel 5** werden Versuche zur Gefrierpunktermittlung durchgeführt. Dazu wird Salzsole beziehungsweise flüssiges Taumittel im Klimaschrank bei -40°C eingefroren. Anschließend kann der Gefrierpunkt anhand der Temperatur-Zeit-Kurve der Flüssigkeit bestimmt werden.

**Kapitel 6** beschäftigt sich mit der Tauleistung aller sechs Streumittel. Auf eigens hergestellten Eiskörpern mit Vertiefung wird das flüssige Taumittel aufgebracht. Über die Gewichtsdifferenz des Eiskörpers vor dem Aufbringen des Taumittels und nach dem Tauprozess kann die Tauleistung in Gramm getautes Eis pro Gramm Taumittel berechnet werden. Um ein möglichst breit gefächertes Ergebnisspektrum zu erhalten, werden die sechs Taumittel bei Temperaturniveaus von -2,5°C, -5°C und -10°C und einer Einwirkzeit von 2/10/30/60/120/240 Minuten untersucht. Die Ergebnisse einer Vierfachbestimmung werden gemittelt.

Nach den Laborversuchen behandelt **Kapitel 7** die Feldversuche mit dem Grip Tester. Diese betreffen ausschließlich Natriumchlorid, Viaform und das Auftaumittel 49 % 1:1. Über den Reibungsbeiwert  $\mu$  können die Griffigkeitsverluste durch den Streumittelauftrag mittels eines Grip Testers bestimmt werden. Dabei werden sowohl auf trockener, als auch auf nasser Fahrbahn Taumittel in unterschiedlicher Dosierung aufgebracht und die Messwerte verglichen.

In **Kapitel 8** erfolgt abschließend eine Bewertung der in Kapitel 5-7 ermittelten Ergebnisse zu Gefrierpunkt, Tauleistung und Griffigkeit und eine Empfehlung einer Streumittelalternative zu Kaliumcarbonat als Ersatz für Natriumchlorid unter Berücksichtigung der Umweltaspekte.

**Kapitel 9** liefert eine kurze Zusammenfassung dieser Diplomarbeit.

# 1 Ausgangssituation

## 1.1 Allgemeine Einführung

Pro Tag legt jede Person durchschnittlich drei Wege zurück. Bezogen auf Wien, bei einer Einwohnerzahl von etwas über 1,9 Millionen und der Annahme, dass es sich bei circa 85 % um mobile Personen handelt, werden täglich 4,8 Millionen Wege zurückgelegt [32], [6]. Die MA 48 hat dafür Sorge zu tragen, dass eine ausreichende Verkehrssicherheit für alle Verkehrsteilnehmer gegeben ist, unabhängig davon ob sie motorisiert oder nicht-motorisiert unterwegs sind.

Der Winterdienst ist nicht nur für den Straßennutzer von großer Relevanz, sondern für die gesamte Gesellschaft, für die Umwelt und den Betreiber. All diese Zielgruppen verfolgen unterschiedliche Zielsetzungen. Die Nutzer verlangen Nutzungssicherheit, geringe Zeitverluste und hohen Fahrkomfort, die Gesellschaft verfolgt das Prinzip des maximalen Nutzens zu minimalen Kosten, will ein sicheres Verkehrssystem und Ausgewogenheit zwischen Nutzer, Betreiber und Umwelt. Betrachtet man ausschließlich Umweltaspekte sind minimale Streumengen von verträglichen Streumittel gefordert. Der Betreiber strebt nach Rechtssicherheit, sparsamen Streumittleinsatz und maximalen Nutzen zu minimalen Kosten. Um all diese Wünsche zu berücksichtigen, sind Kompromisslösungen meist unabdingbar (Abbildung 1) [13].

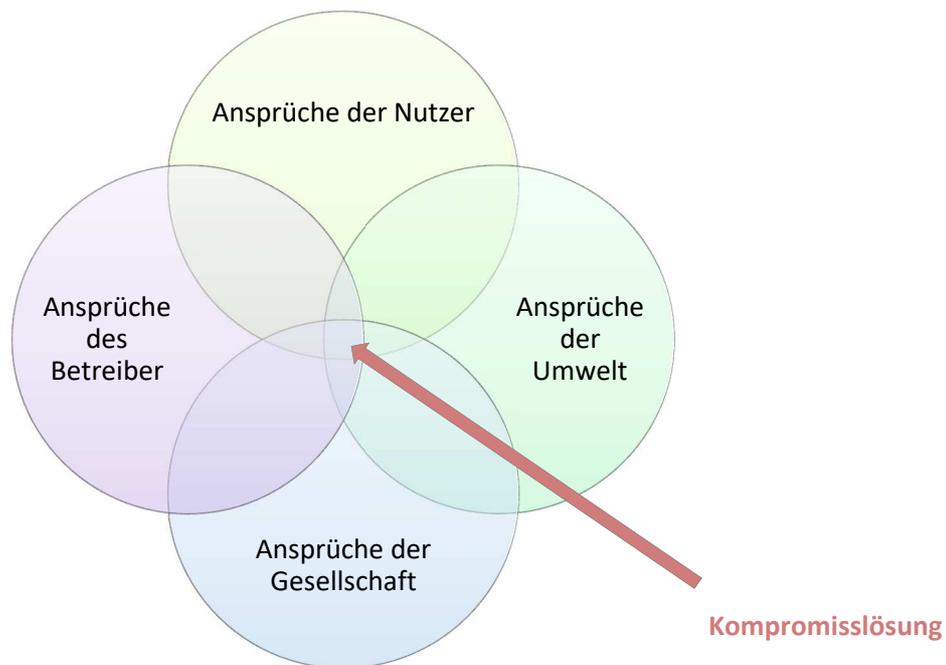


Abbildung 1 Anforderungen an den Winterdienst [13]

Diese Arbeit richtet sich primär an den Betreiber.

In Wien ist die MA 48 für Winterdienstarbeiten auf Straßen und Gehsteigen verantwortlich, mit Ausnahme von Autobahnen und Schnellstraßen im Stadtgebiet, und Gehsteigen für die Dritte verantwortlich sind. Auf Grund der Größe des Straßennetzes ergibt sich eine Betreuungsfläche von rund 23 Millionen m<sup>2</sup>. Bei der MA 48 handelt es sich um die Magistratsabteilung für Abfallwirtschaft, Straßenreinigung und Fuhrpark der Stadt Wien [2].

Prinzipiell bestehen die beiden Hauptaufgaben des Winterdienstes im Räumen und Streuen. Die Intensität des zu leistenden Winterdienstes ist im außerstädtischen Bereich abhängig vom jährlich durchschnittlichen täglichen Verkehrsaufkommen, im innerstädtischen Bereich von der Verkehrsflächenart. Daraus ergeben sich die Winterdienstkategorien, welche in Kapitel 1.2.1 genauer erläutert werden.

Allgemein gilt: Die Entfernung des auf der Fahrbahn befindlichen Schnees wird als Räumen bezeichnet und unterteilt sich je nach Intensität in Schwarzräumung und Weißräumung. Bei der Schwarzräumung

wird die Fahrbahn nahezu vollständig von Schnee und Eis befreit, wo hingegen bei der Weißräumung nach einer ersten Räumung des Neuschnees der übrige Schnee zu einer festen Decke präpariert wird, üblicherweise durch Festfahren des Schnees. Danach kann auf der verdichteten Schneedecke Split zur Erhöhung der Fahrbahngriffigkeit aufgebracht werden. Beim Streuen spricht man entweder von abstumpfender Streuung, unter Verwendung von Splitt, Sand etc., welche die Fahrbahngriffigkeit erhöhen sollen, oder von auftauender Streuung, bei der Eis und Schnee geschmolzen wird. Der primäre Fokus dieser Arbeit liegt auf der auftauenden Streuung [14].

In Wien ist es aus umweltschutztechnischen Gründen nicht möglich, überall Natriumchlorid zur Vermeidung von Glätte auszustreuen. Laut MA 48 ist die Situation die folgende: Überall wo eine Verkehrsfläche ohne Befestigung direkt an eine Grünfläche anschließt, darf kein Natriumchlorid, kurz NaCl, ausgestreut werden, da die Salzsole unmittelbar in die Erde abfließen würde. Ein extremes Beispiel hierfür ist die Prater Hauptallee im zweiten Wiener Gemeindebezirk. Diese wird zwar nicht durch den motorisierten Verkehr befahren, dennoch muss für Fußgänger und Radfahrer gestreut werden. Splitstreuen, also eine abstumpfende Streuung, kommt in diesem Fall nicht in Frage. Da insbesondere Renn- und Straßenräder nur eine sehr geringe Reifenbreite aufweisen, können die auf der Fahrbahn durch Streuung aufgebrauchte Gesteinskörner die Laufruhe des Rades beeinflussen, und somit die Sicherheit gefährden.

Aber auch gewöhnliche Stadtstraßen, die baulich nicht von der anschließenden Begrünung wie Wiese, Blumenbeete, Nährboden für Bäume der Stadtbegrünung getrennt sind, fallen in diesen Bereich. Die einzige Ausnahme sind Straßen für den Busverkehr, da dieser oberste Priorität hat. Splitstreuen wäre eine denkbare Alternative im Straßenverkehr. Da das ausgestreute Gestein am Ende der Winterperiode wieder aufgekehrt und eingesammelt werden muss, ist der Arbeitsaufwand enorm im Vergleich zu einer auftauenden Streuung. Hinzu kommt die zusätzliche Feinstaubbelastung.

Momentan verwendet die MA 48 in diesen Bereichen Kaliumcarbonat ( $K_2CO_3$ ). Dieses ist ausschließlich in granulierter Form erhältlich und muss nach Lieferung eigens mit Wasser angemischt werden. Der Lösevorgang ist ein sehr zeitaufwändiger Prozess, folglich muss Kaliumcarbonatsole schon vorbeugend hergestellt werden, um zum gegebenen Zeitpunkt sofort zur Verfügung zu stehen. Die Lagerung der fertigen Sole ist allerdings problematisch. Bei längeren Stehzeiten, beispielsweise in Silos, setzen sich nach und nach immer mehr Feinteile ab und verbinden sich zu Klumpen, welche die Ablassvorrichtung verstopfen. Somit kann Kaliumcarbonatsole nicht über die Sommermonate gelagert werden. Eine Entleerung der Silos und Entsorgung der Reste erfolgt im Frühjahr. Des Weiteren kommt es beim Misch- und Lösevorgang immer wieder zu Granulatrückständen. Restgranulate können die Düsen der Streufahrzeuge verstopfen und so den Streubetrieb behindern. Auch kostentechnisch handelt es sich um keine gute Alternative. Um den Zielen Umweltschutz und Verkehrssicherheit gerecht zu werden, soll nun ein neues Streumittel gefunden werden, welches eine sowohl umweltverträgliche als auch arbeitsexensive Alternative zu Kaliumcarbonat beziehungsweise Natriumchlorid darstellt [36].

Auf dieser Basis hat die MA 48 zwei neuartige Streumittel, Viaform (20-30 % Kaliumcarbonatlösung) und eine Lösung aus Kaliumformiat ( $KHCO_2$ ), bezeichnet als „Auftaumittel 49 % 1:1“, bezogen. Beide sind bereits in flüssiger Form erhältlich, sofort aufbringbar und über einen längeren Zeitraum lagerbar. Viaform oder das Auftaumittel 49 % 1:1 sollten im Idealfall Kaliumcarbonat (als Ersatz für Natriumchlorid) in Zukunft abzulösen.

Im Zuge dieser Arbeit werden die neuen Auftaumittel sowohl mit dem Grundmittel NaCl als auch der momentanen Alternative Kaliumcarbonat, sowie mit einem Scheibenentfroster (Enteisungsmittel) und einem Alkohol (Propylenglykol) in Hinblick auf Gefriervorgang, Tauleistung und Griffigkeitsminderung verglichen.

## 1.2 Verordnungen und Richtlinien

Grundsätzlich müssen die im Winterdienst verwendeten Streumittel folgende allgemeine Anforderungen erfüllen [7]:

- ◆ Schnelle und lang andauernde Wirksamkeit
- ◆ Einfache Handhabung
- ◆ Geringe Kosten und hohe Verfügbarkeit, sowie kurzfristige Lieferbarkeit
- ◆ Gute Lagerfähigkeit
- ◆ Keine Schädigung von Bauwerken, Straßen und Fahrzeugen
- ◆ Minimale Schädigung der Umwelt

Die für diese Arbeit wichtigsten Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, kurz RVS, sind die RVS 12.04.12 und RVS 12.04.16. In der RVS 12.04.12 ist die Schneeräumung und Streuung geregelt, in der RVS 12.04.16 ist genau festgelegt welche Qualitätsanforderungen ein Streumittel zu erfüllen hat, damit es im Straßenverkehr aus rechtlicher Sicht angewendet werden darf. In Wien wird die RVS 12.04.16 durch die Winterdienstverordnung Wien ergänzt. Zusätzlich ist § 1319a des allgemeinen Bürgerlichen Gesetzbuchs (ABGB) ein wichtiger zu berücksichtigender Gesetzestext. Diese Gesetze, Vorschriften und Richtlinien gewährleisten nicht nur Verkehrssicherheit, sondern auch Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit [9].

Die folgenden, genaueren Ausführungen der eben genannten Rechtsquellen beziehen sich lediglich auf jene Gesetzes- und Verordnungsteile, die in Zusammenhang mit der auftauenden Streuung stehen oder allgemeine Anforderungen enthalten.

### 1.2.1 RVS 12.04.12

Die RVS 12.04.12 befasst sich mit der Schneeräumung und Streuung auf Bundes-, Landes- und Gemeindestraßen. Auf diesen Straßen gilt sie verpflichtend, wo hingegen sie auf allen anderen Straßen, wie zum Beispiel auf Privatstraßen, freiwillig angewendet werden kann. Die Ziele sind:

- ◆ Gewährleistung der Befahrbarkeit des öffentlichen Straßennetzes
- ◆ Geringe Benützungshinderung
- ◆ Förderung der Verkehrssicherheit trotz winterlicher Fahrbahnverhältnisse
- ◆ Wirtschaftliche Betriebsweise
- ◆ Abwägung von Kosten und Wirkung
  - Direkte Betriebskosten
  - Veränderte Betriebskosten
  - Unfallkosten und Unfallfolgekosten
  - Verminderung wirtschaftlicher Produktionsausfälle
  - Umweltbelastung

Es werden Winterdienstkategorien sowohl für Bundes- und Landesstraßen als auch für den urbanen Bereich als Mindeststandard zur Erreichung dieser Ziele festgelegt. Grundsätzlich orientieren sich die Kategorien an der Verkehrsstärke, ausgedrückt durch das JDTV<sup>1</sup> in [KFZ/24h] und an anderen Einflussfaktoren wie DTV<sup>2</sup> zwischen 1. November und 31. März, LKW-Anteil, ÖPNV<sup>3</sup>, Tourismus, Freiland/Ortsgebiet, behördlichen Anordnungen. Die Verkehrsflächen in Städten und Gemeinden lassen sich je nach Verkehrsflächennart und Nutzung in die Kategorien P1 bis P7 einteilen. Für unterschiedliche Witterungssituationen werden dadurch die durchzuführenden Winterdienst-

<sup>1</sup> jährliches durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen

<sup>2</sup> durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen

<sup>3</sup> Öffentlicher Personennahverkehr

maßnahmen festgelegt. Für eine genaue Ausführung der Winterdienstkategorien im städtischen Bereich wird auf die RVS 12.04.12 verwiesen.

Bezüglich der auftauenden Streumittel legt die RVS 12.04.12 die Durchführung von Qualitätskontrollen zur Überprüfung von Sieblinie (Korngrößenverteilung), Feuchtigkeit und chemischer Zusammensetzung fest. Dabei werden NaCl-Gehalt, Sulfatanteil, wasserunlöslicher Rückstand und Antbackmittel berücksichtigt. Des Weiteren muss eine Ökobilanz aufgestellt werden, um die Auswirkungen des Taumittels auf die Umwelt während seines gesamten Lebenszyklus zu deklarieren. In der Regel sorgen auftauende Streumittel für Chloridbelastung im Grundwasser, Bauwerksschäden durch Sulfate, Schädigung von Pflanzen durch Sprühnebel und Bodeneintrag, und schädliche Korrosion an Fahrzeugen. Diese Phänomene sollten möglichst gering gehalten werden.

Auch die für auftauende Streumittel verwendbaren Streugeräte werden in dieser RVS festgelegt. In Frage kommen Aufsatzstreuer, Anbaustreuer, Anhängestreuer, Einhängestreuer und Solesprühgeräte. Hinsichtlich Streudichte, Streubreite und –streifen, Streumittelverteilung, Streumittelbefeuchtung und Entleerungsmöglichkeit müssen folgende Grenzwerte eingehalten werden:

- ◆ Streudichte: 5-40 g/m<sup>2</sup> (frei regelbar)
- ◆ Streubreite/Streustreifen 1 Streuteller: 2-8 m
- ◆ Streubreite/Streustreifen 2 Streuteller: 4-12 m
- ◆ Streuteller: < 500 mm über Fahrbahn
- ◆ Trockensalz: Anfeuchtung mit konstantem Mischverhältnis zwischen Trockensalz und Sole
- ◆ Entleerung Streufahrzeug: Bei Stillstand unbedingt notwendig

Unter Einhaltung dieser Randbedingungen können die richtlinienkonformen Taumittel mittels zulässiger Streufahrzeuge zur Vermeidung und Bekämpfung von Schnee- und Eisglätte sowie zur Bekämpfung außergewöhnlicher Verhältnisse wie Bodennebel, Schmelzwasser und Eisregen eingesetzt werden [23].

### 1.2.2 RVS 12.04.16

In Hinblick auf die Anforderungen an auftauende Streumittel ergänzt die RVS 12.04.16 die ÖNORM EN 16811-1 (für Natriumchlorid), die ÖNORM EN 16811-2 (für Calcium- und Magnesiumchlorid) sowie die ONR CEN/TS 16811-3 (für alle anderen flüssigen und festen Enteisungsmittel). Zusammen mit den genannten ÖNORMEN zielt sie auf einen einheitlichen Standard aller Enteisungsmittel in Bezug auf Wirksamkeit, Umweltverträglichkeit, Wirtschaftlichkeit und Beschaffung ab.

Für abstumpfende Taumittel fordert die RVS 12.04.16:

- ◆ Hohe Tauwirksamkeit (Tauleistung, Taurate, Wirkungsdauer)
- ◆ Geringe Umweltbelastung (Lebewesen und Pflanzen) und Umgebungsbelastung (Bauwerke und Fahrzeuge)
- ◆ Wirtschaftlicher Einsatz (Beschaffungs- Lager und Ausbringungskosten)
- ◆ Keine dauerhafte Griffigkeitsminderung der Verkehrsfläche

Für Informationen zu genauen Anforderungen und Grenzwerten wird auf die ÖNORM EN 16811-1, ÖNORM EN 16811-2 und ONR CEN/TS 16811-3 verwiesen.

Taumittel, sowohl abstumpfende als auch auftauende, müssen deshalb einer Qualitätsprüfung unterzogen werden. Für auftauende Streumittel ist jedenfalls eine Produktbeschreibung gemäß Anhang A der entsprechenden ÖNORM vom Anbieter anzufertigen, welche durch eine akkreditierte Prüfstelle bestätigt werden muss und nicht älter als ein Jahr sein darf. Darüber hinaus sollte unbedingt eine Qualitätskontrolle der Lieferung durchgeführt werden [24].

### 1.2.3 Winterdienstverordnung

Das Magistrat der Stadt Wien hat 2003 die Winterdienstverordnung erlassen. Darin werden nicht nur die Grundsätze und Ziele des Winterdienstes in Wien formuliert, sondern auch Bestimmungen sowie Verbote sowohl zu abstumpfenden als auch zu auftauenden Streumitteln festgelegt. Die Verordnung bezieht sich ausschließlich auf Flächen des öffentlichen Fahrzeug- und Fußgänger Verkehrs, nicht jedoch auf Schnellstraßen und Autobahnen. Sie ist Bundes- und Landesgesetzen/-verordnungen sowie ortspolizeilichen Vorschriften der Gemeinde Wien nachgeordnet.

Auf Basis dieser Verordnung soll die Verkehrssicherheit, unter Verhinderung von Glätte zufolge Eis oder Schnee, im öffentlichen Bereich gewährleistet werden. Darüber hinaus ist auf den Schutz von Menschen und Umwelt Bedacht zu nehmen.

Grundsätzlich können sowohl abstumpfende als auch auf auftauende Mittel zur Erreichung dieser Ziele verwendet werden. Die Verordnung besagt laut § 2: „Auftaumittel sind auftauende, wasserlösliche Streumittel, die auf Grund ihrer chemisch-physikalischen Eigenschaften den Gefrierpunkt von Wasser herabsetzen“ [21, S.1]. „Abstumpfende Streumittel sind natürlich vorkommende, wasserunlösliche Mittel insbesondere Gesteine in unterschiedlichen Korngrößen (Splitt), künstliche Mittel wie insbesondere geblähte Tone, die geeignet sind die Rutschfestigkeit zu erhöhen, oder Verbrennungsrückstände wie insbesondere Schlacke oder Asche“ [21, S.1]. In beiden Fällen sollten die Mittel möglichst gezielt aufgebracht und eine übermäßige Dosierung vermieden werden. Die weitere Betrachtung der Verordnung beschränkt sich ausschließlich auf auftauende Streumittel, da nur diese für diese Arbeit relevant sind. Folgende Bestimmungen gelten:

- ◆ Es dürfen keine Auftaumittel die Stickstoff, Natrium oder Halogenide<sup>4</sup> enthalten als vorbeugende Maßnahme verwendet werden. Die einzige Ausnahme ist Feuchtsalz (§ 3).
- ◆ Stickstoffverunreinigungen in Auftaumitteln sind mit einem maximalen Ausmaß von 1 % beschränkt (§ 3).
- ◆ Bei einem Abstand kleiner 10 m zur unversiegelten Bodenfläche dürfen, außer es handelt sich um Brücken, Haltestellen für den ÖV, Behindertenrampen oder Stiegenhäuser, auf öffentlichen Fußgängerflächen keine Auftaumittel mit Natrium- oder Halogenidanteilen größer 1 % aufgebracht werden. Durch bauliche Maßnahmen, die das Einsickern der Substanz in den Boden verhindern, kann diese Beschränkung aufgehoben werden (§ 4).
- ◆ Außer auf Flächen für den ÖV, Brücken, Radwegen, Geh- und Radwegen und Behindertenparkplätzen dürfen auf öffentlichen Fahrzeugverkehrsflächen keine Auftaumittel mit Natrium- oder Halogenidanteilen größer 1 % aufgebracht werden (§ 5).

Bei Verstoß gegen die Vorschriften drohen Sanktionen, da eine Verwaltungsübertretung begangen wurde. Das Ausmaß der Strafe richtet sich nach § 108 Abschnitt 2 der Wiener Stadtverfassung.

Laut § 6 sind unter entsprechenden Voraussetzungen Ausnahmegewilligungen zu erteilen. Beim Vorherrschen extremer Witterungsverhältnisse und in Folge dessen Gefährdung der erforderlichen Verkehrssicherheit, können laut § 7 Paragraph 4 und 5 für einen Zeitraum von maximal drei Tagen vom Magistrat außer Kraft gesetzt werden. Eine Kundmachung ist zwingend nötig [22].

### 1.2.4 § 1319a ABGB

Ein Weg definiert sich wie folgt: „Ein Weg im Sinn des Abs. 1 ist eine Landfläche, die von jedermann unter den gleichen Bedingungen für den Verkehr jeder Art oder für bestimmte Arten des Verkehrs benützt werden darf, auch wenn sie nur für einen eingeschränkten Benützerkreis bestimmt ist“ [24, § 1319a (2)].

Paragraph 1319a des ABGB besagt, dass beim Zuschadenkommen einer Person, auf Grund des mangelhaften Zustandes eines Weges, jene Person haftet, die dafür verantwortlich war, den Weg in einem ordnungsgemäßen Zustand zu halten, außer die Benützung erfolgte rechtswidrig und die

<sup>4</sup> Chemische Verbindung zwischen Elementen der siebten Hauptgruppe des Periodensystems

Rechtswidrigkeit war dem Benützer bekannt (Verbotszeichen, Abschränkungen, Art des Weges). Ob der Zustand eines Weges als mangelhaft zu bewerten ist, hängt von der Art des Weges, seiner Widmung, ab [25].

### 1.3 Streumittel

Prinzipiell können zwei Arten von Streumitteln unterschieden werden:

- ◆ Abstumpfende Streumittel
- ◆ Auftauende Streumittel

#### 1.3.1 Abstumpfende Streumittel

Als abstumpfende Streumittel kommen in Frage: Natürlich vorkommende Gesteine und Mineralien, Abfälle aus der industriellen Produktion, Verbrennungsrückstände aus dem Haushalt, natürlich oder künstlich hergestellte Streumittel.

Folglich liegen abstumpfende Streumittel ausschließlich in fester Form vor und dienen der Erhöhung der Reibung. Damit sie wirken können, ist eine eckige oder kantige Form nötig. Die Kanten dürfen weder weich sein, noch leicht brechen. Sollte das Korn brechen, muss wieder ein kantiges Korn entstehen. Dadurch wird gewährleistet, dass das Streumittel nicht davonrollt sondern sich einerseits in die Eis- bzw. Schneedecke, andererseits gleichzeitig in Reifenprofile oder Schuhsohlen eingräbt. Gleiten und Rutschen soll so verhindert werden [16]. Abstumpfende Streumittel dürfen keine schmierigen Bestandteile wie Lehme enthalten [5].

Auf Flächen für den Kraftfahrzeugverkehr wird eine Korngröße von 2-8 mm empfohlen, bei Gehwegen reicht eine Größe von 2-4 mm aus. Sind die Körner zu groß, werden sie auf der Straße durch den Verkehr zu schnell weggeschleudert, am Gehsteig vermindern zu große Körner die Trittfestigkeit. Zu kleine Körner werden zu schnell in den wirkungslosen Bereich zerkleinert.

Somit sollten folgende wesentliche Anforderungen bei der Auswahl berücksichtigt werden: Korngröße, Widerstand gegen Schlagabrieb und Zertrümmerung (im Fußgängerverkehr nicht von Relevanz), Flächendeckung und Dauerwirkung [16].

Zur Wirkungsweise: Durch eine abstumpfende Streuung wird die Griffigkeit nur über einen kurzen Zeitraum hinweg verbessert. Das liegt daran, dass das aufgebrauchte Streugut durch den Verkehr teilweise von der Straße befördert wird und somit wirkungslos ist (siehe dazu auch Abbildung 4). Abstumpfende Streuung eignet sich um den Zeitraum vor der ausreichenden Wirkung der auftauenden Salze zu überbrücken, wenn nicht das ganze Eis restlos getaut werden kann, oder auf sehr steilen Straßen mit einer Neigung von über 16 %, auf welchen ein alleiniger Einsatz von auftauenden Streumittel nicht ausreichend ist [5].

Bei zu hohen Schneeverhältnissen ist die Wirkung abstumpfender Streumittel begrenzt. Sie können nur so lange wirksam Glätte verhindern, solange zumindest ein Teil der Streukörner über der Eis- oder Schneeoberfläche liegt, und sie nicht vollständig eingegraben sind. Des Weiteren verhindern zu harte Eisschichten ein Eindringen der Körnung und schränken die Wirksamkeit stark ein. In diesem Fall ist eine Kombination mit einem auftauenden Streumittel empfehlenswert. Auch gefrierender Niederschlag kann die Wirkung abstumpfender Streumittel gänzlich aufheben [16].

#### 1.3.2 Auftauende Streumittel

Als Vorteil der auftauenden Streuung ist anzuführen, dass, im Gegensatz zur Splitstreuung, im Frühjahr weder Streugut eingesammelt noch Klärschächte gereinigt werden müssen [5].

Bei der auftauenden Streuung handelt es sich um einen chemischen Vorgang. Streumittel und Wasser bilden eine Lösung und es erfolgt eine Gefrierpunktniedrigung durch die Absenkung der Gefrierpunkttemperatur unter die Fahrbahntemperatur. Dadurch schmilzt der Schnee, beziehungsweise das Eis [15].

Als wichtiger Punkt ist anzuführen, dass die Gefrierpunktniedrigung nicht von der Art des im Lösungsmittel gelösten Stoffes abhängt, sondern ausschließlich von der Menge, also der Konzentration [17].

### 1.3.2.1 Zustandsarten

Auftauende Streumittel sind in fester und in flüssiger Form erhältlich, die Wirkungsweise ist jedoch unterschiedlich. Kommen klassische auftauende Streumittel (NaCl und andere Salze) zum Einsatz, unterscheidet man zwischen Trockensalz, Feuchtsalz und Sole.

Streut man festes Streusalz auf eine Eisoberfläche, schmilzt jedes Körnchen das es umgebende Eis. Dieses Phänomen wird als Lochfraß bezeichnet. Durch den Schmelzvorgang entsteht Wasser, es kommt zu einer Verdünnung des Taumittels und einem Abfall der Wirksamkeit bis hin zur vollständigen Wirkungslosigkeit. Demnach sollte immer genügend Streumittel aufgebracht werden, dass der Schmelzprozess nicht zu rasch zum Erliegen kommt. Als positiver Effekt fester Taumittel ist zu nennen, dass sich auf Grund des Lochfraßes Hohlräume bilden. Diese reduzieren die Festigkeit und Stabilität der Eisdecke. Durch den Kraftfahrzeugverkehr können Hohlräume aufgebrochen, die Griffigkeit erhöht und die Tauwirkung beschleunigt werden. Vor allem bei sehr winterlichen Verhältnissen, wie großen Schneemengen auf der Fahrbahn, wird Trockensalz verwendet.

Im Regelfall wird das gekörnte Salz aber nicht in trockener Form ausgestreut sondern vor dem Aufbringen angefeuchtet. Es entsteht das sogenannte Feuchtsalz, in Form von FS 30 oder FS 50 (genaue Erläuterung in Kapitel 1.5). Durch die Anfeuchtung wird die Liegedauer des Salzes auf der Fahrbahn erhöht, da durch die Feuchte Windverblasung und Verschleuderung durch den Verkehr verringert werden (siehe dazu auch Abbildung 4). Der gleiche Effekt tritt auch bei Trockensalz beim Aufbringen auf eine nasse Fahrbahn auf [16].

Reine Solestreuerung, so wie sie in diesem Projekt getestet wird, wird meistens bei Reifglätte eingesetzt. Da die Winter vor allem im Stadtgebiet zunehmend wärmer werden, tritt Reifglätte weitaus öfter auf als beispielsweise gefrierender Niederschlag oder Schneefahrbahn. Die Sole wird über Sprühbalken (Abbildung 2 und Abbildung 3) aufgebracht. Diese sind entweder an LKWs, Kleinfahrzeugen, Traktoren oder kombinierten Streugeräten montiert [2].

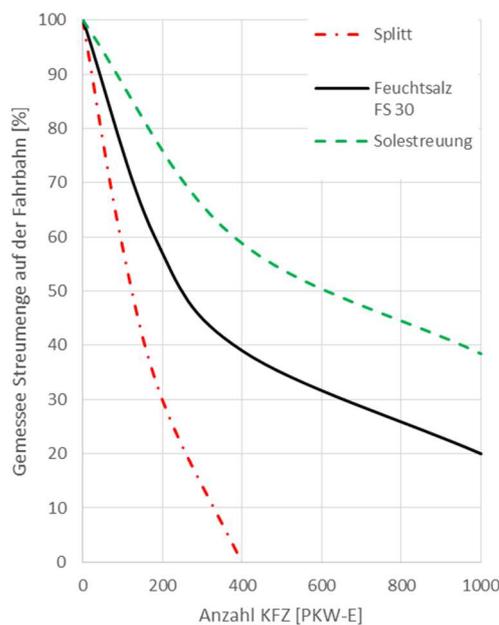


Abbildung 2 Solestreuer



Abbildung 3 Solestreuer-Düsen

Vergleicht man nun die drei Streumethoden hinsichtlich der Liegedauer des Salzes auf der Fahrbahn ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 4):



**Abbildung 4 Streumittelverluste durch den Straßenverkehr [5]**

Wird an Stelle von Trockensalz Feuchtsalz aufgebracht, reduziert sich der Streusalzverlust durch Verkehrsverschleuderung. Bei einer Solestreueung kommt es zu einer weiteren Reduktion. Gleiches gilt auch für die Verluste in Folge von Windverblasung.

Als weiterer Vorteil der Solestreueung ist zu nennen, dass die Streufahrzeuge präventiv befüllt werden können, auch Reste können für einen längeren, unbeschränkten Zeitraum im Fahrzeug verbleiben. Auch bei der Dosierung ist ein sparsamerer Einsatz im Vergleich zu Trockensalz möglich, sowie eine gleichmäßigere Verteilung. Bei Extremwetterereignissen sollte gegebenenfalls allerdings auf Trockensalz zurückgegriffen werden, da die Tauwirkung besser ist als bei Feuchtsalz oder reiner Sole [5].

### 1.3.2.2 Aufgaben

Je nach Zeitpunkt der Aufbringung werden dem Streusalz unterschiedliche Aufgaben zugeschrieben, in der Fachsprache unterscheidet man zwischen zwei Arten der Streueung, der präventiven Streueung (anti-icing) und der kurativen Streueung (anti-compaction und de-icing) [5].

#### **Präventive Streueung (anti-icing)**

Die präventive Streueung (anti-icing) von durchschnittlich  $10 \text{ g/m}^2$  findet vor dem Niederschlagsereignis statt und verhindert, dass Niederschlag auf der Fahrbahn festfriert. In Folge dessen wird die nachträgliche Räumung erleichtert, beziehungsweise überhaupt ermöglicht [15].

Es sei angemerkt, dass nicht ausschließlich die Gefrierpunktniedrigung zum anti-icing beiträgt, sondern auch ein gewisses Verkehrsaufkommen für die effiziente Eisbekämpfung nötig ist. Sollte das vorhandene Eis nicht über eine ausreichende Stabilität verfügen, bricht es unter der Verkehrslast und kann somit einfach entfernt werden [17].

Der Zeitpunkt des Streumittelauftrags ist beim anti-icing von großer Wichtigkeit. Wird die Streueung zu früh durchgeführt, kann, vor allem bei der Verwendung von Trockensalz, welches bei großen Schneemengen eine höhere Wirksamkeit hat als Feuchtsalz oder Sole, ein Teil des Salzes durch den Verkehr an den Straßenrand verschleppt und die Tauwirkung abgeschwächt werden. Bei Feuchtsalz oder Sole ist die Verschleppung durch den Straßenverkehr geringer, genauso wie bei Trockensalz das

auf eine bereits nasse Fahrbahn aufgebracht wird. Es wirkt durch die Verdünnung wie Feuchtsalz. Eventuell müssen, als Folge des Streusalzverlustes durch hohes Verkehrsaufkommen größere Salzmengen als eigentlich zur präventiven Streuung nötig sind, aufgebracht werden [5]. Das Aufbringen von zu großen Mengen an Streusalz hat überdies eine schädliche Wirkung auf den Straßenbelag [14]. Bei zu spätem Einsatz kann die Glatteisbildung nicht mehr wirksam verhindert werden.

Der ideale Zeitpunkt für den Streueinsatz wäre eine Stunde vor Eintritt der Glätte, allerdings ist es sehr schwierig diesen Zeitpunkt genau vorherzusagen [5]. Nicht nur in Wien bietet die ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) deshalb umfangreiche Vorhersagen über Wetterverlauf, Niederschlagsmenge und -art, Schneefallgrenze, Temperatur und Glätte an. Dadurch wird die Planung der erforderlichen Winterdienstarbeiten erleichtert. Trotzdem lässt sich das Wetter nicht mit hundertprozentiger Sicherheit vorhersagen, weshalb kurative Streuungen nötig werden können [35].

### **Kurative Streuung (anti-compaction und de-icing)**

Während des Niederschlagsprozesses erfolgt die kurative Streuung (anti-compaction und de-icing) gegen Schneeglätte, welche durch gefrorenen oder auf der Fahrbahn anfrierenden Niederschlag entsteht. Es sind teilweise bis zu 40 g/m<sup>2</sup> Taumittel erforderlich [15]. Um den eben genannten Effekten entgegen zu wirken wird zum einen das Konzept „anti-compaction“ angewendet. Dabei wird das Taumittel aufgebracht um die Bindung zwischen den gerade fallenden Schneekristallen untereinander und zwischen Schneekristall und Fahrbahn zu verhindern, um die nachfolgende Räumung zu erleichtern. Zum anderen wird beim sogenannten „de-icing“ der bereits gefallene Schnee beziehungsweise das bereits gebildet Eis getaut [17]. Erst nach Ende des Niederschlages und Entfernung der gesamten Schneemenge, kann die kurative Streuung gestoppt werden [15].

Als Abschluss sei darauf hingewiesen, dass folgender Grundsatz aus ökologischer und ökonomischer Sicht bei auftauenden Streumitteln besonders wichtig ist: Zuerst räumen, dann streuen! Dadurch kann der Verbrauch pro Quadratmeter stark gesenkt werden [16].

## **1.4 Streumengen in Österreich [5]**

- ◆ Vorbeugende Salzstreuung: 10-20 g/m<sup>2</sup>
- ◆ Beginnender Schneefall: 15-20 g/m<sup>2</sup>
- ◆ Starker Schneefall: bis 40 g/m<sup>2</sup>
- ◆ Dünnes Glatteis, geringe Kälte: 10-20 g/m<sup>2</sup>
- ◆ Dickes Glatteis, tiefe Temperaturen: 30-40g/m<sup>2</sup>

## **1.5 Streumethoden Wien**

Da sich dieses Projekt mit dem Winterdienst in städtischen Bereich befasst, wurde Dr. Nutz, Leiter der Winterdienste in Wien, zu der momentan angewendeten Streumethodik in Wien befragt: Zurzeit streut die MA 48 größtenteils Feuchtsalz, FS 30 oder FS 50. Dabei werden die Streufahrzeuge sowohl mit trockenem Salz als auch mit Salzsole, jedoch in separaten Tanks, befüllt. Erst beim Aufbringen auf die Fahrbahnoberfläche werden Salz und Salzsole auf dem Streuteller vermischt, das Trockensalz wird angefeuchtet. Bei FS 30 werden 70 Gewichtsprozent Auftausalz und 30 Gewichtsprozent Sole aufgebracht, bei der FS 50 Streuung ist das Verhältnis 50:50. Zurzeit streut die MA 48 zumindest FS 30, ein geringerer Soleanteil wird nicht verwendet. Es wird versucht, auf reine Solestreuung umzusteigen und FS 30 bzw. FS 50 nur als Rückfallebene, beispielsweise bei gefrierendem Regen, zu verwenden. Derzeit sind jedoch nur ein Teil der Fahrzeuge für die Solestreuung ausgerüstet, die Einsatzmöglichkeit ist somit begrenzt. Im Zuge der geplanten Fuhrparkerneuerung sollen jedoch auch Streuer für reine Solestreuung angeschafft werden [36].

## 2 Natriumchlorid

Da Natriumchlorid, kurz NaCl, das am weitesten verbreitete Streumittel ist, und somit momentan auch in Wien in großem Ausmaß zur Verwendung kommt, wird ihm ein eigenes Kapitel gewidmet.

### 2.1 Allgemein

Natriumchlorid stellt aktuell das Hauptstreumittel in Österreich dar [15]. Bis zu einer Temperatur von  $-5^{\circ}\text{C}$  ist der Einsatz von NaCl wirtschaftlich vertretbar. Bei dieser Temperatur sind  $40\text{ g/m}^2$  Streumittel nötig um einen Millimeter Eis oder einen Zentimeter unverpressten Schnee zu schmelzen. Auf Gehwegen kann der eben genannte Wert auf  $20\text{-}30\text{ g/m}^2$  reduziert werden. Wenn zuvor eine Schwarzräumung erfolgt ist, reichen  $5\text{ g/m}^2$  aus, um den trotz Räumung auf der Straße verbliebenen Restschnee zu schmelzen [16].

Neben der Winterdienstanwendung findet NaCl auch Einsatz als Gewerbesalz, Pharmasalz, Industrieresalz, etc. Der Salzverbrauch im industriellen Bereich und der des Winterdienstes halten sich ungefähr die Waage, der Speisesalzverbrauch verzeichnet nur einen vernachlässigbar kleinen Anteil. Bei  $80\text{-}90\text{ Euro/Tonne}$  (Stand 2015) ist der Preis im Vergleich zu anderen auftauenden Streumitteln verhältnismäßig gering [15].

Gewonnen wird Natriumchlorid entweder aus Steinsalz oder aus Siedesalz. Steinsalz wird in Salzlagerstätten abgebaut, Siedesalz wird aus verdampfender Sole hergestellt. Der Reinheitsgrad von Siedesalz ist deutlich höher als von Steinsalz. Bei Steinsalz liegt der NaCl-Gehalt zwischen  $90\%$  und  $98\%$ , bei Siedesalz muss er mindestens  $96\%$  betragen [5].

### 2.2 Eigenschaften

Es handelt sich um farblose Kristallwürfel die sowohl in kaltem als auch in warmem Wasser lösbar sind. Natriumchlorid ist nicht hygroskopisch, zieht jedoch Feuchtigkeit an [9]. Nachstehende Auflistung gibt einen Überblick über die chemischen und physikalischen Eigenschaften [5], [15]:

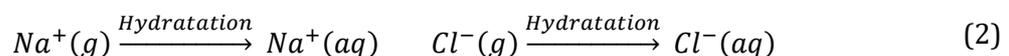
- ◆ Siedepunkt:  $109^{\circ}\text{C}$
- ◆ Dichte:  $2,17\text{ g/cm}^3$  (bei  $20^{\circ}\text{C}$ )
- ◆ Löslichkeit in Wasser:  $359\text{ g/l}$  (bei  $20^{\circ}\text{C}$ )
- ◆ Molekulargewicht:  $58,45$
- ◆ Schmelzpunkt:  $800^{\circ}\text{C}$
- ◆ Eutektischer Punkt der gesättigten Lösung:  $-21,1^{\circ}\text{C}$
- ◆ Spezifische Oberfläche von  $1\text{ kg}$ :  $14,7\text{ m}^2$

### 2.3 Wirkungsweise

Beim Lösungsprozess von NaCl in Wasser findet eine Temperaturänderung statt, welche über die Enthalpie, die Wärmemenge, die ein System mit der Umgebung austauscht, beschrieben wird. Wasser löst aus dem kristallinen NaCl-Ionengitter die einzelnen Ionen heraus, es bilden sich ein gasförmiges Anion ( $\text{Cl}^-$ ) und ein gasförmiges Kation ( $\text{Na}^+$ ).



In einem weiteren Schritt erfolgt die Solvatisierung. Dabei lagern sich weitere Wassermoleküle an den Ionen an und es entstehen hydratisierte Ionen.



Zum Herauslösen der Ionen aus dem Gitter ist die sogenannte Gitterenthalpie nötig. Für die anschließende Hydratation wird ebenfalls Energie benötigt, die Hydratationsenthalpie. Beide zusammen ergeben die Lösungsenthalpie.

Da es sich bei dieser zweistufigen Reaktion um einen leicht endothermen Prozess handelt, muss dem Vorgang Energie zugeführt werden, es findet somit eine Abkühlung statt. Das heißt, beim Aufbringen von NaCl als Streumittel entsteht eine Abkühlung der Oberflächentemperatur da der Schneedecke Wärme entzogen wird.

Bei der Verwendung von Natriumchlorid ist überdies darauf zu achten, dass sich nach vollständiger Auftrocknung des Niederschlagwassers griffigkeitsmindernde Kristalle auf der Fahrbahn bilden und ansammeln können. Je nach Temperatur und Luftfeuchtigkeit bildet sich entweder Halit (Luftfeuchtigkeit < 100 %, Temperatur > 0°C), oder Hydrohalit (Luftfeuchtigkeit > 100 %, Temperatur < 0°C) [15]. Die bei Plusgraden entstehenden Halitkristalle sind auch beim Abfallen der Temperaturen in den Minusbereich stabil, können aber durch ein Niederschlagsereignis wieder gelöst werden. Sollten sie jedoch im Zuge des Trocknungsprozesses verklumpt sein, lassen sie sich nicht oder nun sehr langsam lösen. Meisten sammeln sich die Kristalle im Fahrprofil, der Fahrbahntextur, an und reduzieren die Griffigkeit. Werden sie durch den Niederschlag nicht vollständig gelöst entsteht darüber ein Film aus Schmutz und gelöstem Salz, die Fahrbahngriffigkeit sinkt weiter ab. Auch Hydrohalit kann schmierige Schichten bilden und dadurch die Fahrbahngriffigkeit reduzieren. Im Unterschied zu Halit entsteht Hydrohalit im Minusgradbereich, ab Temperaturen von -15°C in sehr großen Mengen, unter -23°C kommt es zu einem sprunghaften Wachstum. Das Problem bei der Hydrohalitbildung ist folgendes: Eigentlich sollte die NaCl-Sole das auf der Straßenoberfläche befindliche Eis tauen. Ein Hydrohalitkristall hat das Aussehen eines gewöhnlichen NaCl-Kristalles, jedoch befindet sich innerhalb des Kristallgitters auch Wasser. Im Gegensatz zu NaCl hat Hydrohalit keine Tauwirkung, vielmehr ist ein Hydrohalitkristall ein Ausgangspunkt für Eisbildung und somit doppelt schädlich im Winterdienst.

Anhand des folgenden eutektischen Diagrammes (Abbildung 5) werden die einzelnen Zustände in Abhängigkeit von Temperatur und Solekonzentration für NaCl näherungsweise graphisch dargestellt [9].

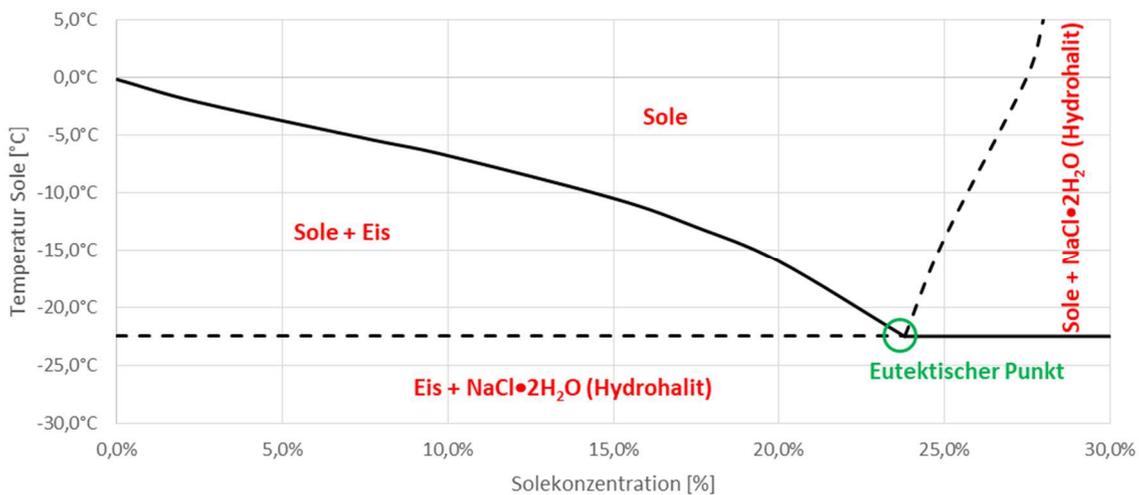


Abbildung 5 Zustandsdiagramm Natriumchlorid [9]

Auf Grund der potenziellen Halit- und Hydrohalitbildung werden dem Streusalz zusätzlich Antbackmittel beigemischt. Diese verhindern, dass NaCl bei trockener Luft zusammenklebt. Die sonst mit einem Solefilm umhüllten Salzkörner geben bei zu trockenen Verhältnissen Feuchtigkeit an ihre Umgebung ab und bilden feine Kristalle. Antbackmittel wirken als Stabilisatoren und können die Kristallbildung, und somit das Zusammenbacken, größtenteils verhindern, sind aber nur bis zu einer Temperatur von -5°C wirksam. Bei kälteren Witterungsbedingungen kann das Salz selbst frieren [5].

### 3 Alternative Streumittel

Nicht nur Natriumchlorid hat auftauende Eigenschaften, weltweit sind schon einige Alternativen bekannt und kommen an unterschiedlichen Orten in unterschiedlichem Ausmaß zum Einsatz. Prinzipiell sollten folgende Aspekte bei der Auswahl alternativer Streumittel berücksichtigt werden [7]:

- ◆ Tauleistung
- ◆ Gefrierkurve
- ◆ Gleitwiderstand
- ◆ Schwermetalle und Kohlenwasserstoff
- ◆ pH-Wert
- ◆ Korrosivität und Beinhaltung von Sulfaten
- ◆ Flammpunkt
- ◆ Wasserunlösliche Bestandteile und biologische Abbaubarkeit
- ◆ Kinematische Viskosität
- ◆ Leitfähigkeit
- ◆ Dichte und Schüttgewicht

Darüber hinaus müssen die gesetzlichen Anforderungen erfüllt sein, in Wien sowohl die RVS als auch die Winterdienstverordnung.

Eine ausführliche Recherche ergab eine Vielzahl alternativer Taumittel. Unabhängig von ihrer Eignung werden der Vollständigkeit halber alle angeführt, die anfänglich in Betracht gezogen wurden. Einige schießen aufgrund der Anforderungen der RVS und der Winterdienstverordnung sofort aus:

- ◆ Magnesiumchlorid ( $MgCl_2$ ): Halogenid → Widerspricht Winterdienstverordnung
- ◆ Calciumchlorid ( $CaCl_2$ ): Halogenid → Widerspricht Winterdienstverordnung
- ◆ Harnstoff ( $CH_4N_2O$ ): enthält Stickstoff → Widerspricht Winterdienstverordnung
- ◆ Ammoniumsulfat ( $(NH_4)_2SO_4$ ): enthält Stickstoff → Widerspricht Winterdienstverordnung
- ◆ Bellow Zero (chem. Präparat / Noice SRL, Italien): Halogenid → Widerspricht Winterdienstverordnung
- ◆ Ice Breaker Liquid/Granulat ( $CaCl_2$ -Lösung / RAW, Deutschland): Halogenid → Widerspricht Winterdienstverordnung

In der Vergangenheit wurden bereits eine Vielzahl an Studien über alternative Streumittel durchgeführt. In Folge dessen wurden einige Taumittel bereits hinreichend getestet und sind für diese Arbeit nicht weiter von Relevanz, da sie keine neuen Ergebnisse liefern würden.

- ◆ Calcium-Magnesium-Acetat ( $C_8H_{12}CaMgO_6$ )

Als zulässige Alternativen eignen sich folgende Stoffe/Lösungen/Gemische:

- ◆ Kaliumcarbonat ( $K_2CO_3$  / bereits verwendet Alternative zu NaCl)
- ◆ Viaform (50% Kaliumformiat ( $KHCO_2$ ) / Addcon, Deutschland)
- ◆ Auftaumittel 49 % 1:1 (20-30 % Kaliumcarbonat ( $K_2CO_3$ ) / Brenntag, Österreich)
- ◆ Enteisungsmittel (50-60 % Ethanol ( $C_2H_5OH$ ), 0-10 % Ethandiol ( $C_2H_6O_2$ ) / Winkler, Deutschland)
- ◆ Propylenglykol ( $C_3H_8O_2$ )

- ◆ Sno'n'Ice (NaCl und Na<sub>3</sub>O<sub>2</sub>Si / Steinmann, Schweiz)
- ◆ Natriumformiat (CHO<sub>2</sub>Na)
- ◆ Monoethylenglykol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>)
- ◆ Diethylenglykol (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub>)
- ◆ Natriumacetat (C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>Na)
- ◆ Kaliumacetat (CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>K)

Diese Liste wurde den Verantwortlichen des Winterdienstes der MA 48 vorgelegt. Unter Berücksichtigung der Besorgbarkeit in ausreichender Menge und zu erschwinglichen Preisen sowie der erforderlichen Genehmigungen und Zertifizierungen entschied die MA 48, dass folgende Lösungen eine für den Wiener Straßenverkehr brauchbare Alternative darstellen könnten:

- ◆ Viaform
- ◆ Auftaumittel 49 % 1:1

Diese Taumittel stehen in dieser Arbeit im Mittelpunkt der Betrachtung.

Darüber hinaus wurde auch Kaliumcarbonat erneut getestet, um zu überprüfen ob die beiden oben angeführten Alternativen bessere Ergebnisse in Hinblick auf Gefrierpunkt, Tauleitung und Griffigkeitsverluste liefern.

Da die gesuchte Alternative an Stelle von Kaliumcarbonat Natriumchlorid ersetzen sollte, wurden auch neuerliche Messungen für NaCl durchgeführt.

Im Auftrag der MA 48 wurden zwecks Vergleichbarkeit auch das Enteisungsmittel und Propylenglykol getestet. Diese Werte stellen lediglich Referenzwerte dar, um die Ergebnisse besser beurteilen zu können.

In Ergänzung zu den von der MA 48 geforderten Versuchen wurde auch das Produkt Sno'n'Ice im Zuge dieses Projektes analysiert. Für den Wiener Winterdienst stellt es keine mögliche Alternative dar, da Sno'n'Ice ausschließlich in granulierter Form erhältlich ist, jedoch eine im Einkauf bereits flüssig Lösung gefordert wird. Erste Versuche zeigen allerdings schnell, dass dieses Produkt unter Berücksichtigung von Kosten und Nutzen keine brauchbare Alternative darstellt. Die Versuche werden auf Gefrierversuche beschränkt.

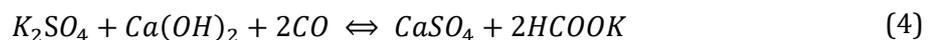
Auf den folgenden Seiten folgt eine ausführliche Beschreibung der untersuchten Alternativen. Eine Tabelle der wichtigsten Eigenschaften aller oben genannten Taumittel befindet sich im Anhang (Tabelle A 1 sowie Tabelle A 2).

### 3.1 Kaliumcarbonat

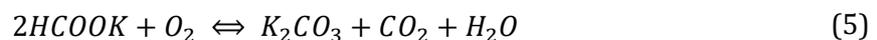
Kaliumcarbonat (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), auch bekannt als Pottasche, ist ein weißes, stark hygroskopisches, in Wasser lösliches Pulver. Die Lösung reagiert alkalisch. Hergestellt wird Kaliumcarbonat entweder durch Einleiten von CO<sub>2</sub> in 50%ige Kalilauge und darauffolgendem Eindampfen,



oder durch das Formiat-Pottasche-Verfahren. Zuerst entsteht Kaliumformiat, das aus Kaliumsulfat und Calciumhydroxid unter der Zufuhr von Kohlenmonoxid hergestellt wird,



es wird isoliert und anschließend durch Luftzufuhr zu Calciumcarbonat gegläht



[12], [26]. Dichte (2,428 g/cm<sup>3</sup>) und Löslichkeit in Wasser (1200 g/l) von Kaliumcarbonat sind deutlich höher als von Natriumchlorid. Gleiches gilt auch für den Preis, welcher bei 300-350 Euro/Tonne (Stand 2015) mehr als ein Dreifaches beträgt [15].

### 3.2 Viaform (50% Kaliumformiat)

Viaform ist eine wässrige, basische farb- und geruchlose Lösung aus Kaliumformiat ( $\text{KHCO}_2$ ), bei Herstellung durch die Firma Addcon beträgt der Anteil circa 50 %. Die relative Dichte liegt bei  $1,33\text{--}1,37\text{ g/cm}^3$ . Oxidierende Eigenschaften sind nicht bekannt, jedoch eine Unverträglichkeit zu Oxidationsmitteln sowie zu starken Säuren. Auch hat Viaform keine explosiven Eigenschaften, jedoch kommt es beim Erhitzen über  $300^\circ\text{C}$  zu einem Zerfall von Kaliumformiat. Es bildet sich Kaliumoxalat und Wasserstoff, welcher explosionsgefährdet ist. Viaform alleine brennt nicht. Kontakt mit Feuer oder heißen Oberflächen reicht jedoch aus, um in Dämpfen Zersetzungsprodukte mit hoher Reizwirkung zu bilden. Zur Brandbekämpfung empfehlen sich Trockenlöschmittel,  $\text{CO}_2$ , Sprühnebel oder Alkoholschaum. Beim Hantieren sollte Haut- und Augenschutz verwendet werden. In Hinblick auf die Umweltverträglichkeit sind keine ökotoxikologischen Wirkungen anzuführen. Alle enthaltenen Stoffe sind unbedenklich für die Umwelt oder können biologisch oder in Kläranlagen abgebaut werden. Es liegt keine Bioakkumulation vor [11].

Laut Hersteller ist Viaform ungiftig für Tiere, Pflanzen und Wasserorganismen, frei von Salzen wie Stickstoff und Chlor sowie Schwermetallen, verursacht keine Feinstaubbelastung und hat darüber hinaus eine sehr gute Materialverträglichkeit. Des Weiteren ist Viaform biologisch abbaubar. Der für die Zersetzung des Produkts erforderliche Sauerstoffbedarf ist vergleichsweise gering und die Entstehung von anaeroben Verhältnissen im Untergrund, Boden und Wasser werden somit vermieden, was sich wiederum positiv auf die Umweltverträglichkeit auswirkt. Da Viaform somit auf natürliche Weise abgebaut wird, ist es rückstandsfrei. Der einzige, eventuell entstehende Rückstand ist eine weiße Staubschicht. Diese entsteht durch die Auskristallisation von organischen Salzen während des Trocknungsvorganges und kann mit Hilfe von Wasser einfach und komplett gewaschen werden. Addcon schreibt Viaform eine schnell einsetzende und lange andauernde Tauwirkung zu. Der aktuelle Anwendungsbereich umfasst sowohl den öffentlichen als auch privaten Bereich.

Viaform ist sowohl in granulierter („Viaform granular“) als auch in flüssiger Form („Viaform liquid“) erhältlich. Viaform granular basiert auf Natriumformiat. Im Gegensatz zu Viaform granular basiert Viaform liquid auf Kaliumformiat, es ist eine Kaliumformiatlösung, die vorwiegend bei dünneren Eisschichten oder zur präventiven Streuung, um das Entstehen von Schnee- und Eisschichten zu verhindern, verwendet wird.

Der Produktkatalog bietet empfohlenen Dosierungen als Richtwerte für unterschiedliche Verhältnisse und ist in Tabelle 1 aufgelistet.

**Tabelle 1 Streuempfehlung Viaform laut Hersteller**

	Temperatur	Dosierung Eis < 1mm	Dosierung Eis 1-3 mm
Viaform liquid	$\pm 0^\circ\text{C} - -5^\circ\text{C}$	15–25 g/m <sup>2</sup>	30–40 g/m <sup>2</sup>
	$-5^\circ\text{C} - -10^\circ\text{C}$	25–35 g/m <sup>2</sup>	40–60 g/m <sup>2</sup>
Viaform granular	$\pm 0^\circ\text{C} - -5^\circ\text{C}$	10–20 g/m <sup>2</sup>	25–40 g/m <sup>2</sup>
	$-5^\circ\text{C} - -10^\circ\text{C}$	20–30 g/m <sup>2</sup>	40–50 g/m <sup>2</sup>

Auf Grund der Fahrzeuggegebenheiten der Winterdienste in Wien stehen flüssige Taumittel im Zentrum der Betrachtung. Deshalb ist für diese Arbeit nur Viaform liquid von weiterer Relevanz. Es kann mit Streufahrzeugen für flüssige Enteisungsmittel aufgebracht werden. Eine Verdünnung ist nicht zulässig. Zwangsläufig kommt es bei feuchten Witterungsbedingungen zu einer automatischen Verdünnung beim Aufbringen, und die Wirksamkeit wird abgeschwächt. In solchen Fällen muss eine größere Menge Viaform aufgebracht werden um dieselbe Wirksamkeit zu erzielen [1].

### 3.3 Auftaumittel 49 % 1:1 (20-30 % Kaliumcarbonat)

Beim „Auftaumittel 49 % 1:1“ der Firma Brenntag handelte es sich um ein wässriges Gemisch aus 20-30 % Kaliumcarbonat ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ). Vorwiegend wird es als Auftaumittel verwendet, andere Anwendungsbereiche sind nicht bekannt. Die basische (pH-Wert 11,17) Flüssigkeit ist klar, farb- und geruchlos und in Hinblick auf die Wasserlöslichkeit vollkommen mischbar. Laut Produktdatenblatt liegt

die Dichte bei circa  $1,43 \text{ g/cm}^3$  ( $20^\circ\text{C}$ ) und der Gefrierpunkt bei rund  $-48,9^\circ\text{C}$ . Bei Lagerung in den Originalbehältern, dicht verschlossen in einem belüfteten Raum, kühl und trocken ist das Gemisch chemisch stabil. Zu den unverträglichen Materialien zählen starke Säuren, Calciumhydroxid, Aluminium, Zink, Zinn und Kupfer. Sowohl Haut- als auch schwere Augen- und gegeben falls Atemwegsreizungen sind Folge von ungeschütztem Inberührungkommen. Haut- und Augenkontakt sollte somit vermieden und die Sprühgase nicht eingeatmet werden. Zur sicheren Handhabung sind Augenschutz, Atemschutz und Handschuhe anzulegen. Sollte das Auftaumittel in Brand geraten, eigenen sich Kohlendioxid, Trockenlöschmittel, Schaum und Wassersprühstrahlen zur wirkungsvollen Bekämpfung. Im Falle einer unvollständigen Verbrennung ist die Bildung von giftigen Pyrolyseprodukten möglich. Das Produkt ist weder explosionsgefährlich noch verfügt es über oxidierende Eigenschaften. In Hinblick auf die Umweltauswirkung ist das Eindringen in Untergrund, Oberflächengewässer, und Kanalisation nach Möglichkeit zu vermeiden. Aus der Einleitung in Gewässer resultierte eine pH-Verschiebung, die schädliche Auswirkung auf die vorhandenen Wasserorganismen hat. Zur Entsorgung eignet sich demnach flüssigkeitsbindendes Material und anschließendes Entsorgen in verschlossenen Behältern, sowie sehr starke Wasserverdünnung der verbleibenden Rückstände [3].

### 3.4 Enteisungsmittel (50-60 % Ethanol, 0-10 % Ethandiol)

Das Enteisungsmittel wird als Scheibenfrostschutz der Firma Winkler (Ulm, Deutschland), ausgeschrieben und vorwiegend als Scheibenreiniger verwendet. Andere Anwendungsbereiche sind bis dato nicht bekannt, es wird aber auch nicht ausdrücklich davon abgeraten. Bei der blauen, klaren Flüssigkeit handelt es sich um ein Gemisch aus 50-60 % Ethanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) und 0-10 % Ethandiol ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$ ) in Kombination mit Wasser. Der Geruch ist leicht alkoholisch mit den für Scheibenreinigungsmitteln typischen Duftstoffen. Bei sachgerechter Lagerung ist das Gemisch chemisch stabil. Kontakt mit anderen Chemikalien, vor allem Säuren, sollte vermieden werden. Sowohl Flüssigkeit als auch Dampf sind entzündbar (Selbstentzündung bei rund  $425^\circ\text{C}$ ) und verursachen schwere Augenreizungen. Zur Brandbekämpfung eignen sich Wassersprühstrahlen, alkoholbeständiger Schaum,  $\text{CO}_2$  und Trockenlöschmittel, nicht jedoch Wasservollstrahlen. Im Falle von Augen- oder Hautkontakt wird schnellst möglichstes Reinigen und Ausspülen empfohlen. Auf Grund der starken Reizwirkung sollten beim Arbeiten mit größeren Mengen eine Schutzbrille zum Gesichtsschutz und Handschuhe zum Hautschutz getragen werden. Darüber hinaus ist Arbeitsschutzkleidung empfehlenswert. Bei einer oralen Aufnahme des Scheibenfrostschutzes in größeren Mengen als  $2000 \text{ mg/kg}$  tritt akute Toxizität ein [21].

### 3.5 Propylenglykol

Prinzipiell werden Alkohole und Glykole zu auftauenden Zwecken gegenwärtig nur auf Flughäfen verwendet. Der entscheidende Vorteil ist, dass sie keine Korrosion verursachen. Die Tauleistung ist allgemein allerdings geringer als bei  $\text{NaCl}$ . Da es bei der Aufbringung technische Schwierigkeiten geben kann, auf Grund des niedrigen Flammpunkte besondere Sicherheitsmaßnahmen erforderlich sind, sie eine starke Belastung des Bodens und von Kläranlagen verursachen und die Kosten jene von  $\text{NaCl}$  bei weitem übersteigen, wurden Alkohole und Glykole im Straßenwinterdienst bis dato selten bis gar nicht in größerem Ausmaß eingesetzt [5], [16].

### 3.6 Sno'n'Ice

Bei Sno'n'Ice handelt es sich um ein in der Schweiz von der Firma Steinmann produziertes, speziell aufbereitetes Streusalz in granulierter Form. Es beinhaltet 6 Inhibitoren (Hemmstoffe/Additive), jedoch keinen Harnstoff und wäre somit laut Winterdienstverordnung theoretisch zulässig. Sno'n'Ice enthält CMA (=Calcium-Magnesium-Acetat) und Meltium. CMA besteht aus Dolomitkalk und Essigsäure. Im Gegensatz zu  $\text{NaCl}$  ist CMA nicht toxisch und vollständig biologisch abbaubar [4]. Meltium ist ein, vorwiegend zu Auftauzwecken hergestelltes, patentiertes Produkt der Firma Eastman,

welches auf Formiaten basiert [28]. Es wirkt als Puffer für CMA in Hinblick auf Korrosion und reduziert zusätzlich die Schmelztemperatur [4].

Das Granulat hat ein Schüttgewicht von 800-1200 g/l und ist wasserlöslich. Es ist weder explosionsgefährlich noch brennbar, zersetzt sich allerdings beim Erhitzen ab einer Temperatur von circa 260°C. Sollte es zum Brand kommen, eignet sich Wasser als Löschmittel. Die Lagerung sollte trocken erfolgen, hohe Temperaturen, direkte Sonneneinstrahlung und hohe Luftfeuchtigkeit sind zu vermeiden. Auch sollte das Granulat nicht mit konzentrierten Säuren oder Laugen oder leicht brennbaren Stoffen in Kontakt kommen. Werden all diese Bedingungen eingehalten, ist Sno'n'ice chemisch stabil [30].

Im Vergleich zum gewöhnlichen Streusalz NaCl ist die Korrosion an Stahlbauteilen sowie die Rissbildung an Betonbauteilen laut Hersteller deutlich geringer. Auch beruft sich die Firma Steinmann auf eine Ungefährlichkeit sowohl für Menschen als auch für Tiere. Beim Hantieren wird zwar eine Schutzausrüstung empfohlen, ist aber nicht unbedingt notwendig, es liegen weder Gefahren- noch Sicherheitshinweise vor [29].

Die rosa bis pinke Färbung mit Lebensmittelfarbe dient einer möglichst gleichmäßigen und sparsamen Streuung, da nach dem Aufbringen erkannt werden kann, wo bereits gestreut wurde, und wo noch Streugut aufzubringen ist. Die Färbung ist jedoch nicht dauerhaft und verschwindet nach kurzer Zeit von selbst [27]. Laut Produktflyer hält die Wirkung 24 Stunden und setzt sofort mit dem Aufbringen ein. Die Körnung ist relativ flach. Bei widrigen Bedingungen wie starkem Wind oder starkem Gefälle soll dadurch die Haftung verbessert werden [29].

Der primäre Einsatzbereich ist als Auftaumittel, wo es sowohl per Hand aber auch mittels Maschinen gestreut werden kann [30].

## 4 Kalibrierung

### 4.1 Klimaschrank

#### 4.1.1 Allgemein

Der Klimaschrank (Abbildung 6) dient dazu, Temperaturversuche, sowohl im Plusgradbereich als auch im Minusgradbereich durchzuführen. Temperatur und Luftfeuchtigkeit können individuell geregelt werden, wobei Temperaturen zwischen  $-70^{\circ}\text{C}$  und  $+180^{\circ}\text{C}$  und Luftfechtigkeiten von 0-100 % möglich sind. Zur Regelung dient ein in der linken oberen Ecke befindliches Display. Um Lufttemperaturen oder Temperaturen von im Klimaschrank befindlichen Flüssigkeiten zu messen werden Datenlogger (Abbildung 7) mit anschließbaren Temperaturfühlern verwendet (Hersteller: Elpro).



Abbildung 6 Klimaschrank



Abbildung 7 Datenlogger

#### 4.1.2 Kalibrierung Datenlogger - 1. Messung

Das Ziel der ersten Messung im Klimaschrank ist es, die Datenlogger und Temperaturfühlern zu kalibrieren. Der Versuch wird mit zwei Datenloggern (Seriennummer 85942 und 85896) mit je vier Temperaturfühlern durchgeführt (1-4).

Dabei verblieben die Datenlogger außerhalb des Klimaschranks und die Temperaturfühlern werden durch eine verschließbare Öffnung in den Klimaschrank geführt. Dort werden sie befestigt und die Enden in eine geöffnete Plastikflasche gehängt um Luftströmungen, welche durch das Kühlaggregat des Schrankes verursacht werden, möglichst gering zu halten.

Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, wird nicht ausschließlich eine Temperatur untersucht, sondern Messungen im Bereich von  $+30^{\circ}\text{C}$  bis  $-30^{\circ}\text{C}$  durchgeführt. Dazu wird dem Klimaschrank ein entsprechendes Programm vorgegeben (Tabelle 2).

Tabelle 2 Prüfprogramm Kalibrierung Messung 1

Temperatur	Zeit
$+30^{\circ}\text{C}$	60 min
$+20^{\circ}\text{C}$	60 min
$+10^{\circ}\text{C}$	60 min
$\pm 0^{\circ}\text{C}$	60 min
$-10^{\circ}\text{C}$	60 min
$-20^{\circ}\text{C}$	60 min
$-30^{\circ}\text{C}$	60 min

Es ergibt sich folgendes Resultat: Die am Klimaschrank eingestellte Temperatur entspricht nicht der auf den Datenloggern angezeigten Temperatur. Im Negativtemperaturbereich beträgt die Abweichung zwischen Klimaschrank und Temperaturfühlern überschlagsmäßig zwei Grad Celsius. Je tiefer die Temperaturen werden, desto kleiner wird allerdings die Abweichung vom Ist- zum Sollwert.

Im Plusgradbereich sind die Schwankungen sehr unterschiedlich. Statt den vorgegebenen 10°C werden über 15°C gemessen, statt 20°C zeigen die Fühler 23°C und die Messungen im Bereich von 30°C sind, vermutlich auf Grund der zu lange dauernden Aufheizphase, nicht besonders aussagekräftig. Eine mögliche Erklärung für die Abweichungen beim Temperaturplateau von 20°C bzw. 10°C ist, dass, da die Luft immer weiter abgekühlt wird, die Fühler sich jedoch in einer Flasche befinden, die warme Luft in der Flasche gespeichert wird, dort zirkuliert und somit die Ergebnisse verfälscht.

Des Weiteren sind beim Datenlogger mit der Seriennummer 85896 auch Abweichungen der einzelnen Temperaturfühler untereinander erkennbar. Beim Logger mit der Seriennummer 85942 sind die Abweichungen untereinander geringer als 0,1°C und auch nicht regelmäßig, daher vernachlässigbar.

#### 4.1.3 Kalibrierung Datenlogger - 2. Messung

Da der erste Versuchsdurchlauf keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferte, wird eine Wiederholung durchgeführt. Dabei werden allerdings einige Änderungen am Versuchsaufbau und den Versuchsbedingungen vorgenommen, um qualitativ bessere Ergebnisse zu erhalten:

- ◆ Adaption des Temperaturprogrammes: Da es in etwa etwas über eine halbe Stunde dauert bis sich bei einem Temperatursprung der Solltemperatur von 10°C wieder ein konstantes Temperaturplateau einstellt, werden die einzelnen Temperaturstufen von einer Stunde auf zweieinhalb Stunden (150 Minuten) verlängert. Des Weiteren wird für den ersten Temperaturbereich von +30°C ein Zeitintervall von dreieinhalb Stunden (210 Minuten) gewählt, um die verlängerte Aufheizphase zu berücksichtigen. Unter der Annahme, dass die Messwerte der Temperaturfühler korrekt sind, und die Ungenauigkeiten durch den Klimaschrank verursacht werden, wird auch die Temperatur im Programm des Klimaschranks umgestellt. Die vermutliche Temperaturabweichung beträgt circa 2°C. Es ergibt sich somit folgendes Prüfprogramm (Tabelle 3):

**Tabelle 3 Prüfprogramm Kalibrierung Messung 2**

Temperatur	Zeit
+32°C	210 min
+22°C	150 min
+12°C	150 min
+2°C	150 min
-8°C	150 min
-18°C	150 min
-28°C	150 min

- ◆ Um die Ungenauigkeiten beim Datenlogger mit der Seriennummer 85896 zu korrigieren, wird die Anzeige mit Hilfe des „elproLOG ANALYZE“ Programm manuell umgestellt. Dem Fühler Nummer 2 wird vorgegeben, die gemessene Temperatur um 0,2°C zu reduzieren während Fühler 3 fortan 0,2°C mehr anzeigen soll.
- ◆ Weiters wird der Versuchsaufbau leicht abgeändert. Die Temperatursensoren werden nicht wie beim ersten Durchlauf in einer Flasche positioniert, sondern frei schwebend, ungefähr in der Mitte des Klimaschranks und mit Isolierband zusammengebunden, dass sie möglichst nah aneinander liegen.

Unter Anpassung der oben angeführten Änderungen wird der Versuch erneut durchgeführt, mit folgenden Temperaturzeitverläufen als Ergebnis (Abbildung 8 und Abbildung 9 sowie Tabelle 4):



Abbildung 8 Temperaturverlauf Kalibrierung Messung 2-Datenlogger 85942

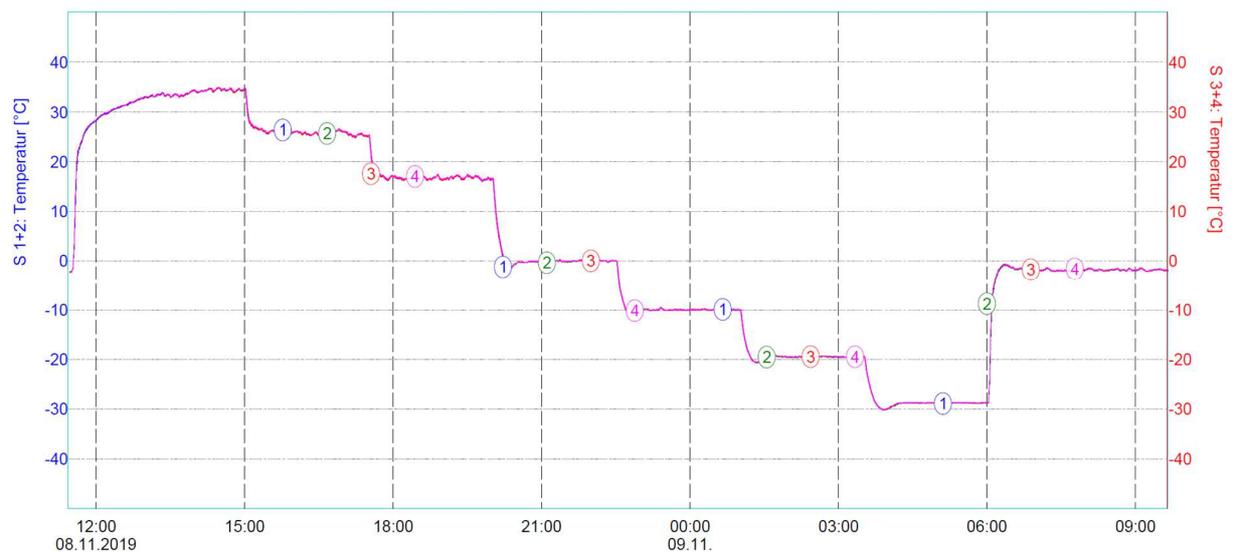


Abbildung 9 Temperaturverlauf Kalibrierung Messung 2-Datenlogger 85896

Auf den ersten Blick ist sofort erkennbar, dass die Halteplateaus beim zweiten Mal ausreichend lang gewählt wurden und dass bei konstant gehaltener Temperatur am Klimaschrank auch die Temperatur an den Fühlern konstant bleibt.

Tabelle 4 Ergebnisse Kalibrierung Messung 2

Eingestellte Temperatur	Soll-Temperatur	Gemessene Temperatur	Abweichung
+32°C	+30°C	+34,0°C	+4,0°C
+22°C	+20°C	+25,5°C	+5,5°C
+12°C	+10°C	+17,0°C	+7,0°C
+2°C	±0°C	±0,0°C	±0,0°C
-8°C	-10°C	-10,0°C	±0,0°C
-18°C	-20°C	-19,5°C	+0,5°C
-28°C	-30°C	-28,8°C	+1,2°C

Auch die Angleichung der Klimaschranktemperatur führt im Negativtemperaturbereich zum gewünschten Ergebnis. In den Grafiken sind die Temperaturplateaus von  $\pm 0/-10/-20/-30^{\circ}\text{C}$  erkennbar. Folglich wird bei allen weiteren Versuchen die Temperatur am Klimaschrank um zwei Grad höher eingestellt als erforderlich, um die gewünschte Solltemperatur zu erhalten. Bei  $0^{\circ}\text{C}$  und  $-10^{\circ}\text{C}$  ist quasi keine Abweichung zwischen Ist- und Solltemperatur vorhanden, im Bereich von  $-20^{\circ}\text{C}$  ist die Temperatur tendenziell ein halbes Grad zu hoch und bei  $-30^{\circ}\text{C}$  sind bereits Abweichungen von über einem Grad zu erkennen.

Die im ersten Versuchsablauf vorhandene Flasche, in welcher die Temperaturfühler positioniert waren, wird beim zweiten Durchlauf laut obiger Schilderung entfernt, dennoch verändert beziehungsweise verbessert sich das Ergebnis im Plusgradbereich nicht maßgebend. Die Annahme, dass die warme Luft in der Flasche gespeichert wird, war somit falsch und erklärt die großen Abweichungen zwischen Ist- und Solltemperatur nicht. Da sich diese Arbeit mit auftauenden Streumitteln für den Winterdienst beschäftigt, werden alle folgenden Versuche ausschließlich im Negativtemperaturbereich durchgeführt. Auch sind in Österreich Temperaturen von  $-30^{\circ}\text{C}$  oder tiefer eher unwahrscheinlich und nur in Ausnahmefällen möglich. Somit muss den Temperaturabweichungen im Plusgradbereich keine weitere Betrachtung geschenkt werden, sie können vernachlässigt werden. Auch die Abweichungen bei sehr tiefen Temperaturen haben keine große Bedeutung.

Alle Datenlogger sind nun für die weiteren Versuche kalibriert.

#### 4.1.4 Temperaturverteilung im Klimaschrank

Da für die Gefrierpunktermittlung und die Tauleistungsbestimmung das ganze Volumen des Klimaschranks benötigt wird, wird auch die Temperaturverteilung innerhalb des Klimaschranks untersucht. So soll überprüft werden, dass an jeder Stelle die gleiche Temperatur vorherrscht, und es zu keinerlei Strömungen durch das Lüftungsaggregat kommt, die die Versuchsergebnisse verfälschen könnten. Bisher befanden sich alle Temperaturfühler gebündelt und frei schwebend in der Mitte des Klimaschranks, nun werden sie im gesamten Schrankinnenraum verteilt angeordnet.

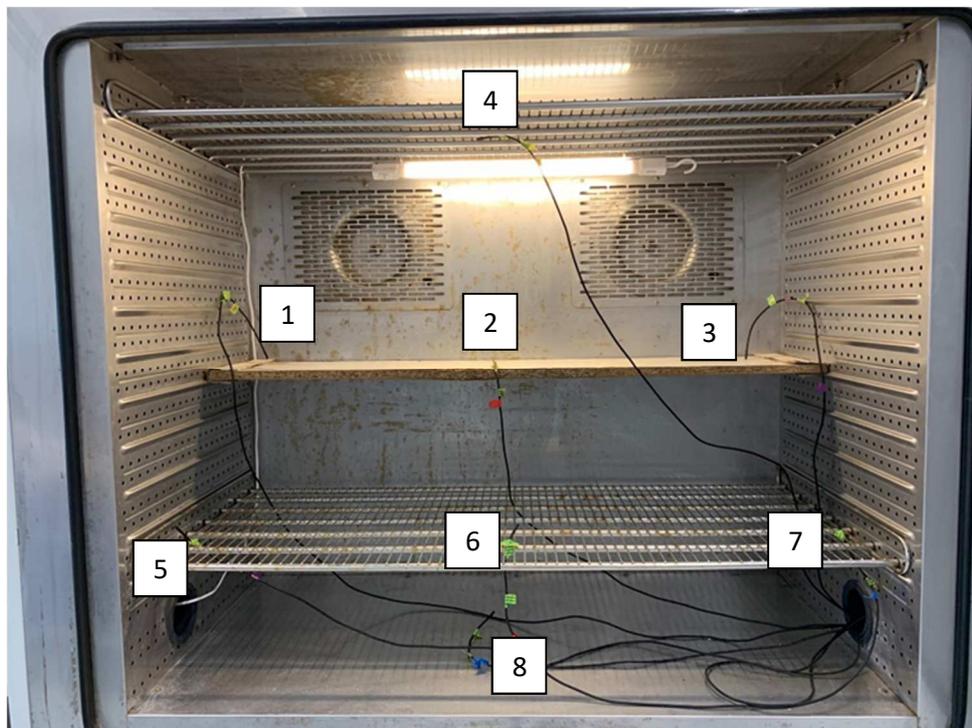


Abbildung 10 Sensorenverteilung Temperaturverteilungsmessung

Die ersten drei Sensoren des Datenloggers mit der Seriennummer 85942 befinden sich auf der Platte im oberen Drittel des Klimaschranks, links, in der Mitte und rechts (Sensoren 1-3). Der vierte Sensor ist mittig an der Decke des Klimaschranks angebracht. Die Temperaturfühler des Loggers mit der Seriennummer 85896 sind am Metallgitter im unteren Drittel des Klimaschranks fixiert, wieder jeweils links, in der Mitte und rechts (Sensoren 5-7). Der letzte Sensor ist mittig am Boden angebracht (Aufbau Abbildung 10).

Der Klimaschrank wird genauso programmiert wie bei der Kalibrierung der Sensoren. Nach rund 22 Stunden Aufzeichnung können folgende Ergebnisse (gemittelte Temperatur innerhalb eines Zeitintervalls) festgestellt werden (Tabelle 5):

**Tabelle 5 Temperaturverteilung im Klimaschrank**

Zeit [min]	Soll-Temperatur [°C]	Ist-Temperatur Sensor [°C]							
		Logger Nr. 85942				Logger Nr. 85896			
		Oben links	Oben Mitte	Oben rechts	Decke	Unten links	Unten Mitte	Unten rechts	Boden
210	+30,0 Abweichung	+35,0 +5,0	+34,5 +4,5	+33,5 +3,5	+34,5 +4,5	+35,0 +5,0	+34,0 +4,0	+33,0 +3,0	+34,0 +4,0
150	+20,0 Abweichung	+27,0 +7,0	+26,0 +6,0	+25,0 +5,0	+26,0 +6,0	+26,5 +6,5	+25,5 +5,5	+24,5 +4,5	+25,5 +5,5
150	+10,0 Abweichung	+18,0 +8	+17,5 +7,5	+16,5 +6,5	+17,5 +7,5	+17,5 +7,5	+17,0 +7,0	+16,0 +6,0	17,0 +7,0
150	±0,0 Abweichung	+1,5 +1,5	+1,0 +1,0	-1,0 -1,0	+1,0 +1,0	+1,5 +1,5	±0,0 -	-1,0 -1,0	±0,0 -
150	-10,0 Abweichung	-8,3 +1,7	-9,0 +1,0	-10,8 -0,8	-9,0 +1,0	-7,5 +2,5	-10,0 -	-11,0 -1,0	-10,0 -
150	-20,0 Abweichung	-18,3 +1,7	-19,0 +1,0	-20,1 -0,1	-19,0 -1,0	-18,8 +2,2	-19,5 +0,5	-20,5 -0,5	-19,5 +0,5
150	-30,0 Abweichung	-28,2 +1,8	-28,3 +1,7	-29,0 +1,0	-28,3 +1,7	-28,8 +1,2	-28,8 +1,2	-29,3 +0,7	-28,8 +1,2

Von links nach rechts ergibt sich ein Temperaturgefälle von circa 2°C, egal in welcher Höhenlage im Klimaschrank man sich befindet und in welchem Temperaturbereich Messungen durchgeführt werden. Lediglich bei sehr tiefen Temperaturen um die -30°C rücken die Werte näher zusammen.

Würde man mit dieser Temperaturverteilung Gefrier- und Auftauversuche durchführen, hätte das erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse und deren Vergleichbarkeit, da Proben im rechten Teil des Schrankes einer zwei Grad geringeren Temperatur ausgesetzt sind als im linken Teil.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass die Temperaturen des Sensors 85942 tendenziell nach oben, das heißt in höhere Temperaturbereiche, verschoben sind im Vergleich zu den Daten bei der Kalibrierung, obwohl dieselben Verhältnisse vorherrschend waren. Das legt die Vermutung nahe, dass auf Grund der Tatsache, dass warme Luft aufsteigt, weiter oben im Klimaschrank höhere Temperaturen als weiter unten vorhanden sein könnten. Die Temperatur am Gitterrost, auf welchem später die Tauleistungsversuche durchgeführt werden, entspricht im Minusgradbereich jedoch der Soll-Temperatur welche auch bei der zweiten Messung der Klimaschrank-Kalibrierung gemessen wurde (siehe Kapitel 4.1.3).

Um eine Gleichmäßigkeit der Temperatur für die Tau- und Gefrierversuche herzustellen, wird folgende Vorgehensweise angedacht: Mit Hilfe eines 3D-Screenings sollen jene Punkte im Klimaschrank gefunden und markiert werden, an welchen dieselbe Temperatur vorherrscht. Danach kann der Versuchsaufbau dahingehend adaptiert werden, dass alle Proben an Punkten gleicher Temperatur platziert werden. Um möglichst viele Messpunkte zu erhalten, besteht der Gedanke darin, das Gitter auf verschiedenen Höhen im Klimaschrank einzubauen und so jeweils die Temperaturen über das ganze Gitter verteilt in verschiedenen Höhen zu messen. Nach Verschieben des Gitters wurde jedoch

festgestellt, dass ein Hantieren im geschlossenen Klimaschrank bei einer anderen Gitterposition als der Ausgangsposition nicht mehr möglich ist, da die Handschuhöffnungen blockiert werden. Somit ist auch das Temperaturscreening des gesamten Schrankes hinfällig.

Deshalb müssen Überlegungen angestellt werden, um die das Temperaturgefälle erzeugenden Strömungen konstruktiv zu reduzieren.

#### 4.1.5 Konstruktive Maßnahmen zur Reduktion des Temperaturgefälles

Wichtig bei der Auswahl der konstruktiven Maßnahmen ist die Berücksichtigung der eingeschränkten Hantierbarkeit mittels der Handschuhe durch die Öffnungen des Klimaschranks während der Versuche. In Folge dessen sollten die Maßnahmen, falls nötig, leicht zu entfernen und gegebenenfalls auch nach Entfernung und vor Wiederanbringung an irgendeiner Stelle im Klimaschrank deponierbar sein, ohne den Versuch zu behindern. Für alle nachfolgenden Versuche werden die Sensoren jeweils auf selber Höhe am Gitter angebracht und über die Breite von links nach rechts verteilt, während die Temperatur konstant gehalten wird.

##### **Variante 1:**

Die erste Idee besteht darin, eine Unterlage und eine leicht entfernbare Abdeckung am Gitter anzubringen. Dazu werden auf das Gitter zwei Lagen starkes Backpapier gelegt und die Sensoren (Sensoren des Loggers 85896 links, des Loggers 85942 rechts) darauf angebracht. Abgedeckt wird die Konstruktion mit einer Luftpolsterfolie, welche zur Befestigung gegen den Luftstrom mit Wasserflaschen beschwert wird. (Abbildung 11 Bild 1). Bei einer Temperatur von  $\pm 0^\circ\text{C}$  werden die Sensoren eine Stunde im Klimaschrank belassen und folgende gemittelte Sensortemperatur festgestellt.

**Tabelle 6 Temperaturverteilung; Konstruktive Maßnahmen Variante 1**

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
-0,4°C	-0,7°C	-0,7°C	-1,1°C	-1,4°C	-1,5°C	-1,7°C	-2,7°C

Die Ergebnisse sind äußerst unzufriedenstellend, das Temperaturgefälle von links nach rechts ist immer noch aufrecht.

##### **Variante 2:**

Die Luftpolsterfolie wird entfernt und durch eine massivere Abdeckungen ersetzt. Dazu wird für die linken 4 Sensoren eine Hartplastikkiste verwendet, für die rechten vier Sensoren eine beschwerte Kartonkiste (Abbildung 11 Bild 2). Allerdings liefert auch diese Konstruktion keine zielführende Verbesserung der Ergebnisse.

**Tabelle 7 Temperaturverteilung; Konstruktive Maßnahmen Variante 2**

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
-0,6°C	-0,6°C	-0,6°C	-1,1°C	-2,0°C	-2,1°C	-2,5°C	-2,7°C

##### **Variante 3:**

Als dritte Variante wird die massive Konstruktion unterhalb der Sensoren angebracht, das heißt die Sensoren werden in die Hartplastikkisten hineingelegt, um einen eventuellen Luftstrom von unten zu unterbinden. Abgedeckt wird die erste Kiste mittels zweilagigem, dickem Backpapier, die zweite Kiste mittels Luftpolsterfolie. Die Abdeckungen werden mit Gaffer in Position gehalten. Angemerkt sei, die erste Kiste, in welcher sich die ersten drei Sensoren des Datenloggers 85896 befinden, ist circa doppelt so hoch ist wie die zweite Kiste, in der der vierte Temperaturfühler des Loggers 85896 und alle Fühler des Loggers 85942 angebracht sind (Abbildung 11 Bild 3).

**Tabelle 8 Temperaturverteilung; Konstruktive Maßnahmen Variante 3**

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
-1,2°C	-1,2°C	-1,3°C	-2,2°C	-2,2°C	-2,8°C	-3,2°C	-3,8°C

Anhand der Messergebnisse ist folgendes festzustellen: Die drei Sensoren, die sich in der hohen Kiste befinden zeigen annähernd die gleiche Temperatur an, das Temperaturgefälle ist kompensiert. Bei den restlichen Temperaturfühlern verbleibt allerdings ein ähnliches Gefälle wie schon in den zuvor durchgeführten Versuchen. Die Konstruktion mit der hohen Kiste könnte somit noch weiter untersucht und gegebenenfalls verbessert werden. Nach genauerer Überprüfung der Konstruktion kann jedoch festgestellt werden, dass die hohe Kiste ein Hantieren im Klimaschrank erheblich erschweren, wenn nicht sogar unmöglich machen würde. Deshalb wird auch diese Idee wieder verworfen.

#### **Variante 4:**

Mit einer ganz anderen Konstruktion wird versucht alle Luftströme nach unten abzuleiten. Dazu werden alle Innenwände des Klimaschranks, an welchen sich die Lüftungen befinden, mit dickem Backpapier verklebt, sodass der Luftstrom nur nach unten austreten kann. Die Temperaturfühler verbleiben wie schon im vorangegangenen Versuch in den Hartplastikkisten und sollen so vor den von unten kommenden Strömungen geschützt werden (Abbildung 11 Bild 4).

**Tabelle 9 Temperaturverteilung; Konstruktive Maßnahmen Variante 4**

Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7	Sensor 8
+5,0°C	+5,3°C	+5,3°C	+5,5°C	+5,4°C	+5,5°C	+5,0°C	+4,2°C

Mit dieser Variante werden allerdings die schlechtesten Ergebnisse erzielt, da die Ist-Temperatur sehr stark von der Solltemperatur abweicht.



**Abbildung 11 Konstruktive Maßnahmen zur Temperaturvergleichmäßigung**

#### 4.1.6 Praktischer Lösungsansatz

Nachdem keine der konstruktiven Maßnahmen zu einer Verbesserung der Situation beigetragen hat, wird versucht, Punkte im Klimaschrank zu finden, wo annähernd gleiche Temperaturverhältnisse vorherrschen. Nachdem mittlerweile bekannt ist, dass ein Temperaturgefälle von links nach rechts innerhalb des Klimaschranks vorherrscht, welches umso größer ist, je weiter außen man sich befindet, ist eine möglichst mittige Positionierung der Proben am zielführendsten, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Bei den Gefrierversuchen können die Flaschen einfach am oberen Brett so mittig wie

möglich positioniert werden. Für die Tauleistungsversuche muss die Waage in der Mitte des Klimaschranks positioniert werden, damit sie über die Handschuhe erreichbar und somit ein Abwiegen der Proben möglich ist. Die einzelnen Proben werden möglichst knapp rechts und links der Waage aufgestellt um die horizontale Ausbreitung auf ein Minimum zu beschränken.

Eine neuerliche Messung (Sensorpositionierung laut Abbildung 12) ergibt, dass die Temperatur entlang des benötigten Bereiches annähernd gleich bleibt und die Schwankungen auf circa 0,3 Grad beschränkt sind, unter Berücksichtigung, dass die Proben nur innerhalb der ersten sechs Sensoren (Sensor 1-4 Abbildung 13 und Sensor 1-2 Abbildung 14) positioniert werden, da die am weitesten rechts gelegenen Sensoren größere Abweichungen zeigen.

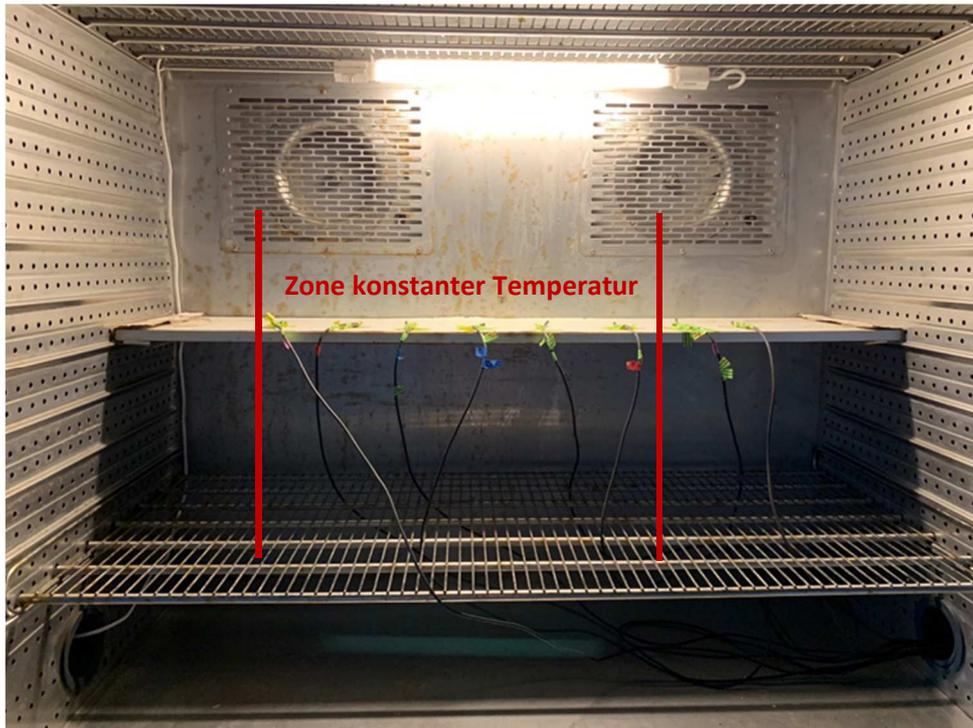


Abbildung 12 Positionierung Temperaturfühler praktischer Lösungsansatz

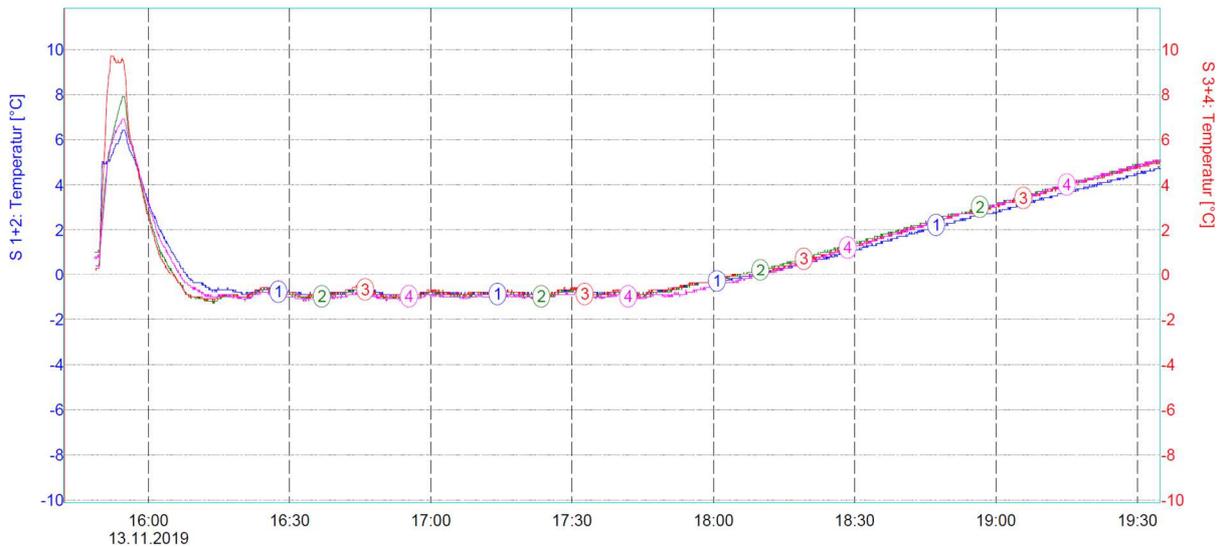


Abbildung 13 Temperaturverlauf praktischer Lösungsansatz-Datenlogger 85942

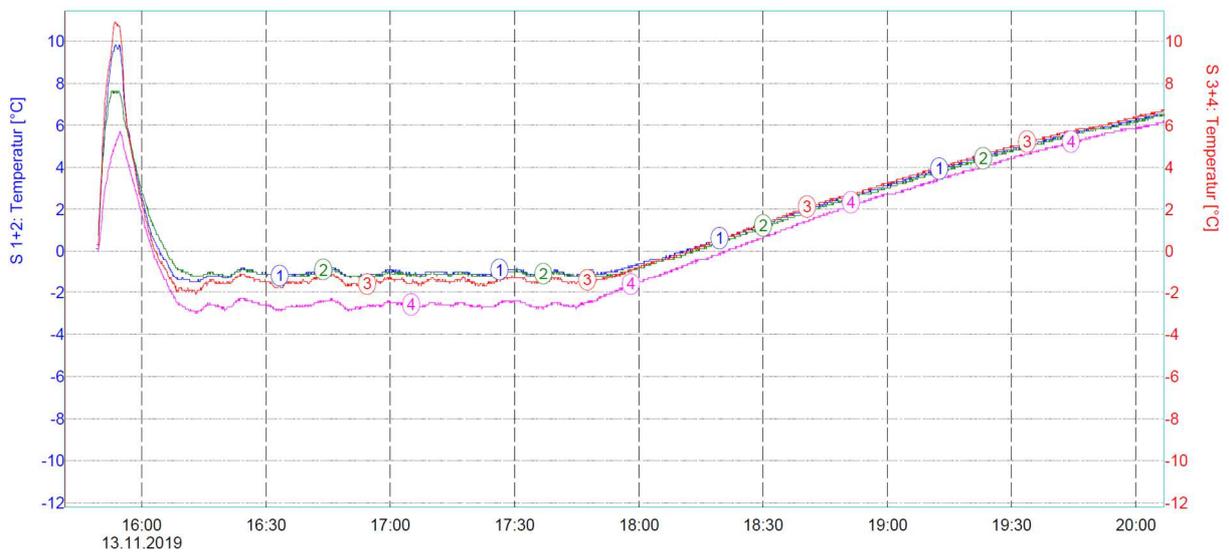


Abbildung 14 Temperaturverlauf praktischer Lösungsansatz-Datenlogger 85896

Der horizontale Bereich, in dem sich die ersten sechs Sensoren befinden, reicht um darin alle Probekörper zu positionieren. Die Randstellen werden markiert und die eigentlichen Versuche können somit begonnen werden

## 4.2 Verbesserung der Prüfmethoden

Die Tauleistungsversuche werden anhand der von der TU Wien zur Verfügung gestellten Arbeitsanweisung durchgeführt, für den genauen Ablauf wird auf Kapitel 6.2 verwiesen. Die Arbeitsanweisung sieht bei den Tauleistungsversuchen nach dem nächtlichen Gefriervorgang, dem anschließenden Öffnen des Klimaschranks und Abschrauben der Probendeckel ein erneutes Einfrieren der Proben für 2-3 Stunden vor. Dieses Vorgehen basiert auf der Annahme, dass die Deckel zum Öffnen der Proben abgeschraubt und die Proben dadurch rundum angegriffen werden müssen. Die Eiskörper werden so direkt der Körperwärme ausgesetzt und können eventuell geringfügig auftauen. Damit kein Einfluss auf die Versuchsergebnisse entsteht, werden sie nachträglich nochmals über mehrere Stunden eingefroren. Abbildung 15 zeigt eine noch nicht mit Wasser befüllte Probenschale [18].

In diesem Projekt wird die Vorgehensweise optimiert und eine erhebliche Zeiteinsparung herbeigeführt. Die Deckel werden beim Verschließen der Proben nicht fest auf die Dosen aufgeschraubt, sondern lediglich locker auf die Dosen aufgelegt. Die Dosen müssen ausreichend mit Wasser gefüllt sein. Dann entsteht beim Gefrierprozess wieder die gewünschte Einbuchtung an der Eiskörperoberfläche. Da die Deckel nur leicht aufgelegt werden, und Wasser zusätzlich bei der Änderung von einem flüssigen in einen festen Aggregatzustand eine Volumsvergrößerung von circa 1/11 erfährt, sind die Deckel nun nicht fest im Dosenverschluss verankert, sondern liegen auf dem Eiskörper auf. Sie können ohne die Probekörper zu berühren abgenommen werden. Sollten die Deckel am Probekörper angefroren sein, müssen die Proben eventuell kurz angegriffen werden, um den Deckel abzunehmen. Die Beeinflussung durch Körperwärme, wenn überhaupt vorhanden, ist verhältnismäßig gering im Vergleich zur vorher genannten Vorgehensweise. Es reicht somit aus, die Proben nach Abnahme der Deckel für nur eine Stunde zu frieren bevor die Versuche begonnen werden. Dadurch ergibt sich für jeden Versuchsdurchlauf mit 16 Proben eine Ersparnis der Vorlaufzeit von 1-2 Stunden. Unter der Annahme, dass 432 Proben getestet werden, wobei sich bei jedem Versuchsdurchlauf 16 Stück (und zwei in Reserve) im Klimaschrank befinden, und einer Zeiteinsparung von zwei Stunden je Versuchsdurchlauf, werden im Zuge des gesamten Projektes knapp über 50 Stunden Zeit eingespart. Es wird jedoch lediglich die Vorlaufzeit und nicht der Arbeitsaufwand der Versuche an sich reduziert.

### 4.3 Hinweis Arbeitsanweisung

Im Zuge der Tauleistungsversuche wird darüber hinaus folgende neue Erkenntnis gewonnen. Die in den Klimaschrank eingebauten Handschuhe (siehe Abbildung 16) beeinflussen die Temperatur. Dies lässt sich beim Einfrieren der Proben bei  $-2,5^{\circ}\text{C}$  feststellen.

Die Handschuhe können, wenn sie nicht gebraucht werden, von außen in die Durchgreiföffnungen gezogen oder gedrückt werden. Diese Möglichkeit wird beim Einfrieren der Probekörper ausgenutzt. Durch die im Klimaschrank vorherrschenden Strömungen kann es passieren, dass die Handschuhe wieder herausgezogen werden. Sie legen sich entweder über die Probekörper oder unter das Gitter unter die Probekörper. Nach dem nächtlichen Gefriervorgang bei  $-2,5^{\circ}\text{C}$  wird beim Öffnen des Klimaschranks festgestellt, dass all jene Proben, die von den Handschuhen bedeckt waren und jene, unter denen Handschuhe lagen, nicht vollständig gefroren oder im Extremfall flüssig sind. Folglich schirmen die Handschuhe die Proben vor niedrigen Temperaturen ab. Es ist also beim Probenfrieren, insbesondere bei Temperaturen nahe dem Nullpunkt, darauf zu achten, die Handschuhe fest in die Öffnungen zu drücken oder gegebenenfalls anderwärtig zu befestigen, dass sie sich nicht lösen können und ein Einfrieren von einzelnen Probekörpern verhindern.



Abbildung 15 Metallschale inklusive Deckel



Abbildung 16 Arbeitshandschuhe Klimaschrank

## 5 Gefrierversuche

### 5.1 Gefriervorgang

Der Gefriervorgang ist der Übergang vom flüssigen in den festen Zustand einer Flüssigkeit. Dazu sind zwei grundlegende Faktoren nötig: Zum einen benötigt jede Flüssigkeit zum Erstarren eine Clusterbildung<sup>5</sup>, zum anderen ist eine ausreichend tiefe Erstarrungstemperatur nötig.

Folgende Beschreibung eines Erstarrungsvorganges gilt nicht nur für Flüssigkeiten, wie zum Beispiel Wasser, sondern beispielsweise auch für Metalle, die von einem flüssigen in einen festen Aggregatzustand übergehen.

In jeder Flüssigkeit sind Teilchen vorhanden. Je geringer die Temperatur desto geringer wird auch die Bewegungsenergie der einzelnen Teilchen. Sinkt die Temperatur, wird im Laufe der Zeit die Anziehungskraft zwischen den einzelnen Teilchen größer als die Bewegungsenergie, die Teilchen wirken als Keime und beginnen Kristalle zu bilden, es entstehen sogenannte Cluster. Mehr und mehr Teile lagern sich am Kristallgitter an bis die gesamte Flüssigkeit erstarrt, also gefroren ist. Damit der gefrorene Zustand erhalten bleibt, und es zu keiner Verflüssigung kommt, muss auch die Temperatur unter der Erstarrungstemperatur gehalten werden [27].

Betrachtet man nun den Temperaturverlauf bei einem Gefriervorgang, lässt sich der Gefrierpunkt einfach ablesen. Dort wo in der Temperaturkurve ein Halteplateau zu erkennen ist, liegt der Gefrierpunkt der Lösung. Das Halteplateau entsteht auf Grund der Tatsache, dass sich ein physikalisch stabiler Zustand einstellt, die Flüssigkeit friert ein und geht in einen festen Aggregatzustand über. Siehe dazu Abbildung 17.

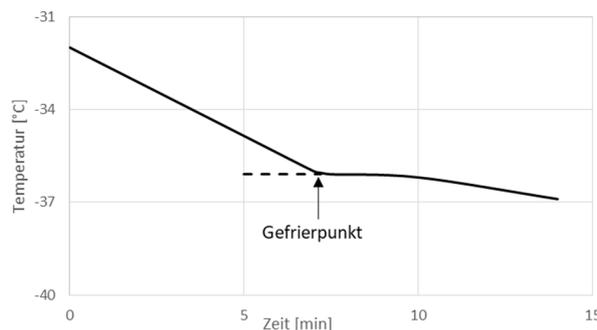


Abbildung 17 Gefrierpunkt ohne Supercooling

In den meisten Fällen stellt sich vor Erreichen des Halteplateaus kurzzeitig eine tiefere Temperatur ein. Dieser Effekt wird als Supercooling, Gefrierverzögerung oder unterkühlte Schmelze bezeichnet [10]. Dabei sinkt die Temperatur einer Flüssigkeit unter ihren Gefrierpunkt, erstarrt jedoch nicht. Die Flüssigkeit befindet sich in einem instabilen Zustand, im sogenannten Ostwald-Miers-Bereich. Wird die Flüssigkeit weiter abgekühlt, steigt ihre Viskosität kontinuierlich an, bis sich im Extremfall amorphes Eis<sup>6</sup> bildet. Ein einzelner Keim, beispielsweise ein Bewegungsimpuls, reicht allerdings schon aus, um einen Kristallisationsansatz zu erzeugen und die Flüssigkeit plötzlich erstarren zu lassen. Kurz gesagt, man könnte das Phänomen des Supercoolings auch als eine Energiespeicherung in Form von Wärme bezeichnen. Friert die Flüssigkeit schlussendlich ein, wird die gespeicherte Energie wieder frei [34], [33]. In diesem Fall definiert sich der Gefrierpunkt am lokalen Hochpunkt nach dem lokalen Tiefpunkt (Abbildung 18). Danach ist die Lösung gefroren, kann allerdings noch weiter abkühlen [10].

<sup>5</sup> Bei der Clusterbildung schließen sich mehrere Teilchen oder Atome zu einem viel größeren Teilchen oder Atom zusammen und die physikalischen Eigenschaften können sich dadurch ändern. Beispielsweise ist ein Übergang vom flüssigen zum festen Aggregatzustand möglich.

<sup>6</sup> Festes Wasser mit, wie in einem Glas, unregelmäßig angeordneten Wassermolekülen

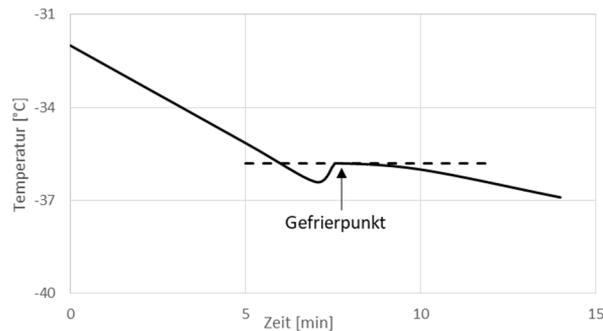


Abbildung 18 Gefrierpunkt mit Supercooling

An dieser Stelle sei des Weiteren auf das Phänomen des Blitzeises hingewiesen, welches sich in Anlehnung an den oben genannten Mechanismus bildet. Es entsteht durch gefrierenden Regen. Das Wasser, in Form von Regentropfen, ist auf Grund der vorherrschenden tiefen Temperaturen bereits unterkühlt. Trifft der Regentropfen auf der Erde auf, kommt er mit anderen Teilchen in Kontakt und die Keimbildung wird ausgelöst. Das Wasser friert schlagartig und es bildet sich Blitzeis. Folglich erhöht Blitzeis sehr plötzlich und in großem Maße die Fahrbahnglätte und muss durch auftauende Streumittel bekämpft werden [27].

Zurück zum gewöhnlichen Gefriervorgang: Mit Hilfe einer Gefrierkurve kann die Wirkung des Taumittels vorausgesagt werden. Die Gefrierkurve gibt zu jeder Konzentration den jeweiligen Gefrierpunkt an. Der Startwert ist eine Temperatur von 0°C und eine Konzentration von 0%. Das Verhältnis eutektische Temperatur zur eutektischen Konzentration, der eutektische Punkt, definiert das Ende der Gefrierkurve und somit die Einsatzgrenze des betrachteten Taumittels. Es gilt somit: Hat eine Lösung mit entsprechender Konzentration eine Temperatur über der Gefrierkurve, friert die Lösung selbst nicht ein und das Taumittel schmilzt bis zum Erreichen der Gefrierkurve Eis.

Die Gefrierkurve wird in einer Lösungskurve fortgesetzt. Mit dem eutektischen Punkt ist auch die Sättigung der Lösung erreicht. Sollte die Konzentration dennoch weiter gesteigert werden, fällt auf Grund der Übersättigung Salz aus und der Gefrierpunkt steigt in Richtung höhere Temperaturen an. Übersättigte Konzentrationen sind zu vermeiden, da diese nicht nur die Ablassvorrichtungen in Silos sondern auch die Aufbringvorrichtungen der Streufahrzeuge verstopfen können. Abbildung 19 zeigt exemplarisch den Verlauf einer möglichen Gefrier- bzw. Löslichkeitskurve und die entsprechenden Zustandsformen [7].

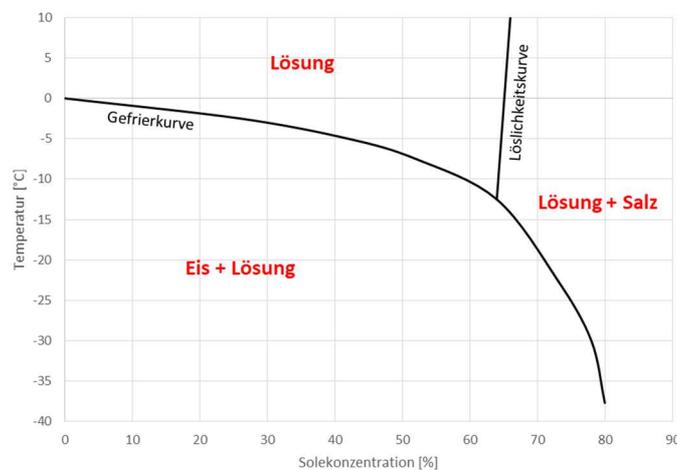


Abbildung 19 Exemplarische Gefrier-/Löslichkeitskurve

## 5.2 Versuchsablauf: Gefrierpunktbestimmung

Als erstes wird der Klimaschrank eingeschaltet und eine Temperatur von  $-45^{\circ}\text{C}$  (in diesem Fall  $-43^{\circ}\text{C}$ ) eingestellt. Während der Vorkühlphase, können die Proben vorbereitet werden, sie ist aber nicht zwingend notwendig, da sich die Proben ohnedies lange genug im Schrank befinden.

Zur Probenvorbereitung: Für nicht bereits flüssig gelieferte Lösungen lässt sich die Sollsalzmenge mit folgender Formel berechnen:

$$SM = \frac{\frac{SK}{100} \times WM}{1 - \frac{SK}{100}} \quad (6)$$

Nachdem die Sollsalzmenge bestimmt wurde, können die Flaschen befüllt werden. Dazu wird als erstes die leere Flasche gewogen, dann die Waage tariert, anschließend mit der entsprechenden Wassermenge befüllt. Danach muss die erforderliche Salzmenge abgewogen werden, um sie mit einem Trichter in die Flasche einzuschütten. Es muss dabei darauf geachtet werden, möglichst genau zu arbeiten, um die geforderte Menge an Sole von  $375 \pm 10$  g ohne Abweichungen zu erreichen. Nach Verschließen des Deckels wird der Finger auf die Öffnung für die Temperaturfühler gedrückt und die Flasche kräftig geschüttelt, damit sich das Streumittel vollständig mit dem Wasser vermischt. Gegeben falls kann dieser Vorgang vor dem Hineinstellen der Flaschen in den Klimaschrank wiederholt werden. Bei Lieferung fertig angemischter Lösungen können diese sofort in der geforderten Menge von  $375 \pm 10$  g abgefüllt werden. Es sei angemerkt, dass 375 g nicht immer dem gleichen Volumen entsprechen, da die einzelnen Taumittel unterschiedliche Dichten aufweisen. Abbildung 20 zeigt nicht nur den Versuchsaufbau, sondern auch diese Tatsache. Links wurde das Enteisungsmittel abgefüllt, rechts die Kaliumcarbonatsole. Die Dichte der Kaliumcarbonatsole ist weit höher als die des Enteisungsmittels, deshalb haben 375 g Flüssigkeit ein geringeres Volumen, der Flüssigkeitsstand ist niedriger.



Abbildung 20 Gefrierpunktbestimmung

Nach Platzieren der Proben müssen noch die Temperaturfühler angebracht werden. Diese sollten vollständig in die Sole eintauchen, vom Flaschenboden ungefähr  $5 \pm 1$  cm entfernt sein und die

Flaschenwände nicht berühren. Die Datenlogger werden wie schon bei den Versuchen zur Bestimmung der Temperaturverteilung programmiert und angeschlossen.

Die Proben werden über Nacht gefroren. Prinzipiell wären 9 Stunden ausreichend, nach 12 Stunden sind die Proben aber mit Sicherheit durchgefroren [19].

### 5.3 Prüfprogramm

Tabelle 10 Prüfprogramm Gefrierversuche

Streumittel	Konzentration	Versuchsanzahl
Natriumchlorid	20 %	3
	22 %	3
	25 %	3
Kaliumcarbonat	20 %	2
	30 %	2
	40 %	2
	48 %	3
	50 %	2
Viaform	flüssig geliefert	3
Auftaumittel 49 % 1:1	flüssig geliefert	3
Enteisungsmittel	flüssig geliefert	3
Propylenglykol	flüssig geliefert	3
Sno'n'Ice	10 %	1
	16 %	1
	22 %	1

### 5.4 Ergebnisse

#### 5.4.1 Natriumchlorid

Als erstes wird mit Gefrierpunktmessungen für NaCl-Sole mit unterschiedlichen Konzentrationen begonnen. Die MA 48 arbeitete zur Zeit im Winterdienst mit einer 22%igen NaCl-Sole, demnach ist diese Konzentration für die Gefrierversuche und auch alle nachfolgenden Versuche maßgebend. Die Winterdienste konnten allerdings keine flüssige Sole für dieses Projekt zur Verfügung stellen, sondern nur das reine Salz. Da die Solelösung somit ohnedies selbst hergestellt werden muss, werden auch Konzentrationen von 20 % und 25 % für die Gefrierpunktbestimmung herangezogen, um unter anderem die Änderung des Gefrierpunktes bei einer Änderung der Solekonzentration zu überprüfen und eventuelle Rückschlüsse auf die Wirksamkeit zu ziehen.

Da die Flaschen für die Gefrierpunktbestimmung mit 375 g Solelösung befüllt werden müssen, ergeben sich folgende Wasser- und Salzmenge je Testflasche:

Tabelle 11 Konzentrationen Natriumchlorid Gefrierversuche

Solekonzentration	Salzmenge	Wassermenge
20 %	75 g	300 g
22 %	82,5 g	292 g
25 %	93,75 g	281,75 g

Allgemein zeigt sich, dass sich das Salz, selbst bei einer Konzentration von 25%, sehr gut im Wasser lösen lässt. Nach Befüllen der Flaschen mit Wasser und Natriumchlorid reicht kurzzeitiges Schütteln vollkommen aus, um alle Kristalle vollständig aufzulösen.

Für jedes Taumittel wird eine Dreifachbestimmung durchgeführt.

Der Gefrierverlauf für eine 22%ige Sole ist in Abbildung 21 dargestellt.

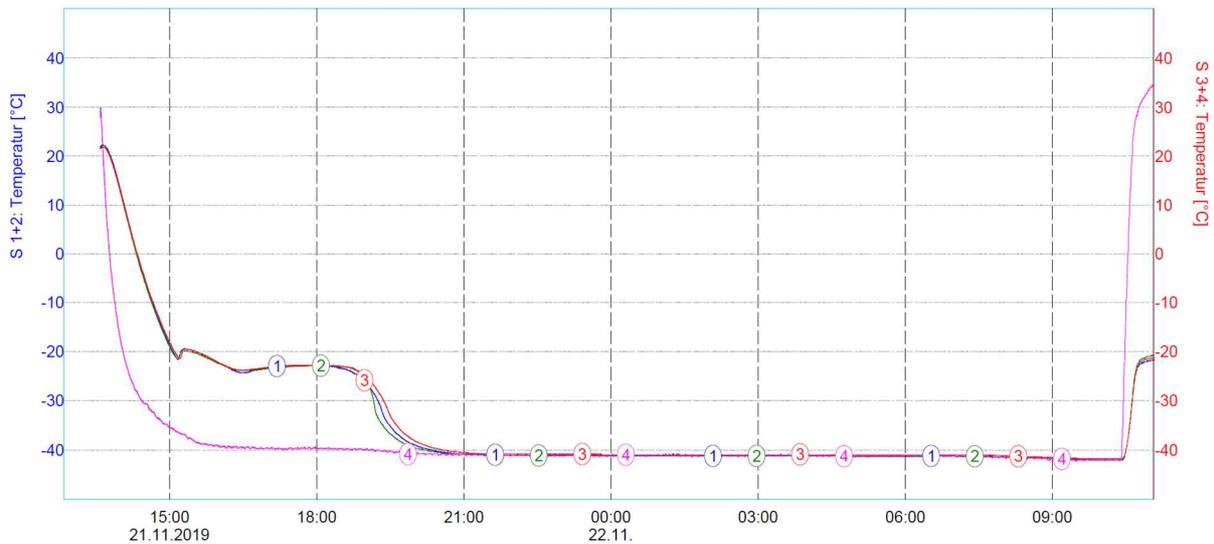


Abbildung 21 Gefrierkurve 22%ige Natriumchloridsole

Die Messsensoren 1-3 messen jeweils die Temperatur in einer Soleflasche, Messsensor 4 gibt die Lufttemperatur im Klimaschrank an. Für die drei Solelösungen ergeben sich folgende Gefrierpunkte:

Tabelle 12 Gefrierpunkt 22%ige Natriumchloridsole

Messsensor	Gefrierpunkt	Mittelwert	Standardabweichung
1	-19,90°C	-19,63°C	0,19°C
2	-19,50°C		
3	-19,50°C		

Es ergibt sich somit ein mittlerer Gefrierpunkt von  $-19,63 \pm 0,19^\circ\text{C}$ . Des Weiteren ist in Abbildung 21 zu erkennen, dass vor dem Erreichen des Gefrierpunktes „Supercooling“ eintritt. Dieser Effekt wird bereits in Kapitel 5.1 ausführlich beschrieben, deshalb bedarf es hier keiner näheren Ausführung. Für die Solekonzentrationen von 20 % und 25 % ergeben sich folgende Messwerte, die entsprechenden Diagramme können dem Anhang entnommen werden:

Tabelle 13 Gefrierpunkt 20%ige Natriumchloridsole

Messsensor	Gefrierpunkt	Mittelwert	Standardabweichung
1	-18,20°C	-17,50°C	0,51°C
2	-17,30°C		
3	-17,00°C		

Tabelle 14 Gefrierpunkt 25%ige Natriumchloridsole

Messsensor	Gefrierpunkt	Mittelwert	Standardabweichung
1	-22,00°C	-22,07°C	0,05°C
2	-22,10°C		
3	-22,10°C		

Der Gefrierpunkt der 20%igen Sole liegt somit bei  $-17,50 \pm 0,51^\circ\text{C}$ , die 25%ige Sole hat einen Gefrierpunkt von  $-22,07 \pm 0,05^\circ\text{C}$ .

### 5.4.2 Kaliumcarbonat

Auch bei Kaliumcarbonat ist eine selbstständige Anmischung notwendig. Da es anfänglich nicht klar war, welche Konzentration in den auf die Gefrierversuche folgenden Tauleistungsversuchen getestet werden soll, werden die Gefrierversuche im ersten Durchlauf für eine 20%ige, 30%ige, 40%ige und 50%ige Lösung durchgeführt. Die Gefrierläufe können dem Anhang entnommen werden, sind für das Projekt aber nicht weiter von Relevanz.

Nach Absprache mit dem Magistrat 48 der Stadt Wien wurde beschlossen, die Konzentration, genau wie bei Natriumchlorid, knapp unter der maximalen Löslichkeit zu wählen. Die maximale Löslichkeit von Kaliumcarbonat liegt bei 1120 g/l, das entspricht einer ungefähren Konzentration von 52 % [15]. Auf Basis dieser Information fiel die Entscheidung auf eine Solekonzentration auf 48 %. Bei einer Zielmenge von 375 g Sole sind je Flasche 180 g granuliertes  $K_2CO_3$  und 195 g Wasser abzufüllen. Die Reaktion von Kaliumcarbonat und Wasser ist ein exothermer Prozess, das heißt bei der Reaktion wird Wärme frei. Beim Vermischen der beiden Stoffe erhitzt sich die Lösung. Die gemessene Höchsttemperatur beträgt 56°C. Nach vollständiger Auflösung des Granulates erfolgt auch wieder eine Abkühlung auf Umgebungstemperatur. An dieser Stelle sei vermerkt, dass der Lösevorgang verhältnismäßig zeitaufwändiger im Vergleich zu Natriumchlorid ist. Über einen Zeitraum von circa einer halben Stunde muss die Lösung immer wieder umgerührt werden, um von einem heterogenen in einen homogenen Zustand zu gelangen. Das händische Umrühren kann durch einen Magnetrührer automatisiert werden. Beim Herstellen großer Solemengen im Labor ist darauf zu achten einen ausreichend leistungsfähigen Magnetrührer zu wählen, da die große Menge an  $K_2CO_3$  sonst nicht bewältigt werden kann und sich der Lösevorgang unnötig in die Länge zieht. Bei diesem Projekt wird die Sole ausschließlich per Hand angerührt, da sich diese Vorgehensweise im Test als zeitsparender erweist.

Die Gefrierkurve von Kaliumcarbonat zeigt folgenden Verlauf (Abbildung 22):

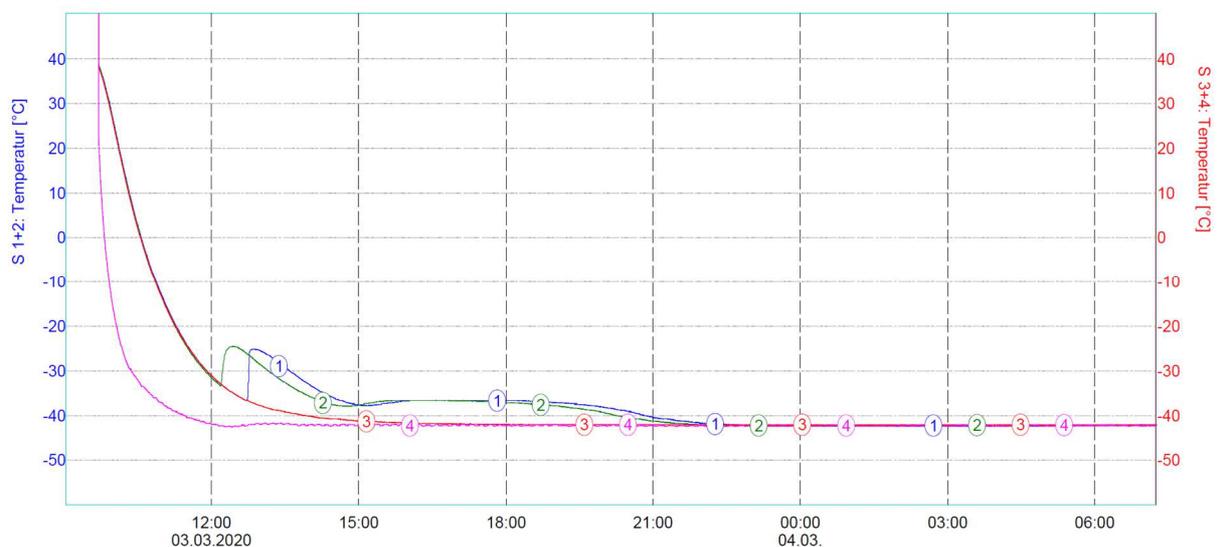


Abbildung 22 Gefrierkurve Kaliumcarbonat

Wie bei Natriumchlorid zeigen die ersten drei Sensoren den Temperaturverlauf der Lösungen, der vierte Sensor den Temperaturverlauf im Klimaschrank.

Die Ergebnisverläufe zeigen Abweichungen, die allerdings erklärt werden können. Das Anfangsverhalten aller drei Solelösungen ist gleich, der Unterschied liegt im Übergang vom flüssigen zum festen Zustand. Der Gefrierpunkt für Probe eins und zwei liegt bei  $\sim -25^\circ\text{C}$  liegt, nachdem zuerst Supercooling aufgetreten ist. Der Unterschied ist der Zeitpunkt des Einfrierens. Wie bereits in Kapitel 5.1 beim Phänomen des Supercoolings beschrieben, ist zum Einfrieren neben einer entsprechend tiefen Temperatur auch ein Keim nötig, der gefunden werden muss, um den Friervorgang auszulösen. Bei Lösung eins tritt die Keimfindung früher auf als bei Lösung zwei, bei Lösung drei wird der Keim

innerhalb des Beobachtungszeitraumes nicht gefunden. Hätte man die Probeflasche im unterkühlten Zustand angehoben und etwas kraftvoll wieder abgestellt, wäre der Bewegungsimpuls als auslösender Keim vermutlich ausreichend gewesen und die Probe wäre schlagartig gefroren. Da sich alle drei Lösungen unter Berücksichtigung des Supercoolings und der unterschiedlichen Keimfindung gleich verhalten, und Lösung eins und zwei auch den gleichen Gefrierpunkt aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass die Gefriertemperatur von  $-25^{\circ}\text{C}$  allgemein gültig ist.

### 5.4.3 Viaform

Da Viaform bereits flüssig geliefert wurde muss es nicht angemischt, sondern lediglich abgefüllt werden. Bei einer Dreifachbestimmung ergeben sich folgende Temperaturverläufe des Taumittels:

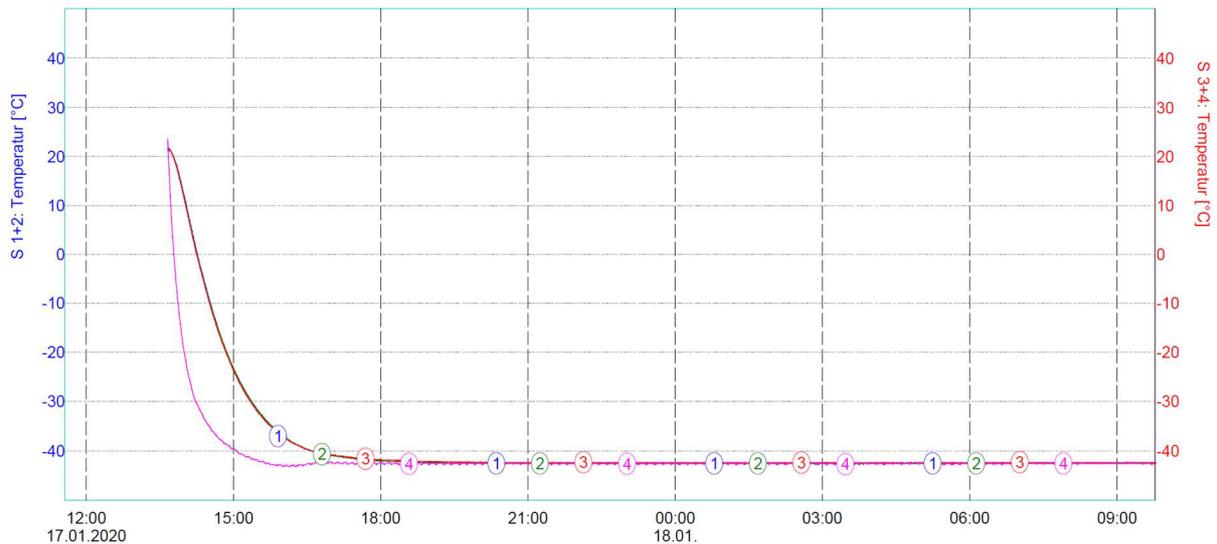


Abbildung 23 Gefrierkurve Viaform

Es ist sofort ersichtlich, dass Viaform bis zu einer Temperatur von  $-40^{\circ}\text{C}$  nicht friert, es kommt lediglich zu einer Absenkung der Temperatur der Lösung.

### 5.4.4 Auftaumittel 49 % 1:1

Auch dieses Flüssigtaumittel kann direkt abgefüllt und der Gefrierpunkt bestimmt werden.

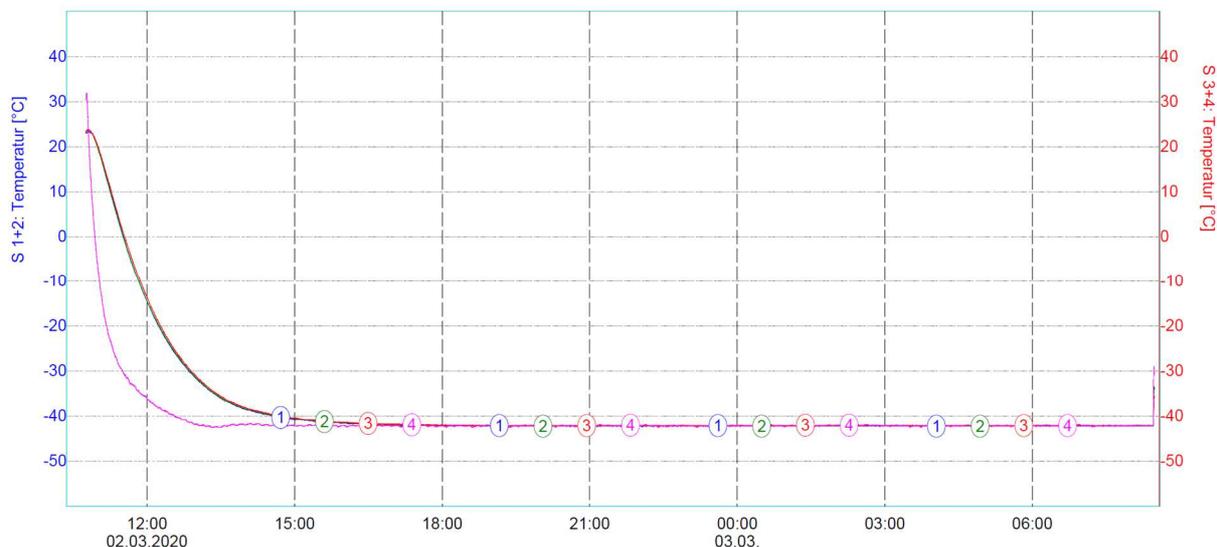


Abbildung 24 Gefrierkurve Auftaumittel 49 % 1:1

Das Auftaumittel 49 % 1:1 weist genauso wie Viaform im betrachteten Temperaturbereich keinen Gefrierpunkt auf, es ist kein wesentlicher Unterschied zum vorangegangenen Diagramm zu erkennen.

### 5.4.5 Enteisungsmittel

Das Enteisungsmittel soll einen Vergleichswert zu Viaform und dem Auftaumittel liefern.

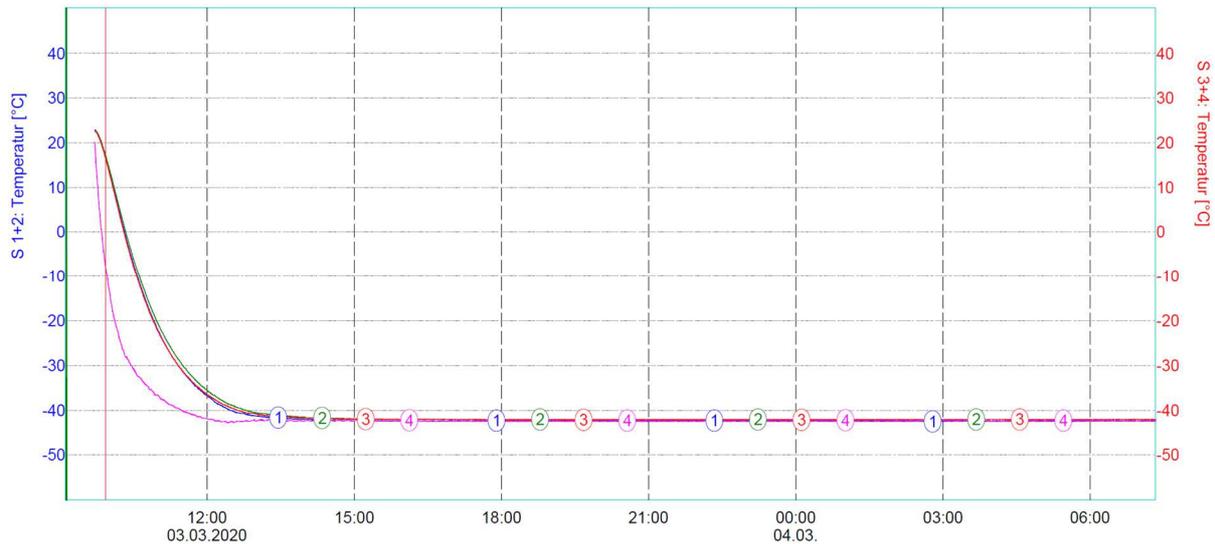


Abbildung 25 Gefrierkurve Enteisungsmittel

Man sieht auch hier, dass es zu keinem Einfrieren der Lösung kommt.

### 5.4.6 Propylenglykol

Als zweiter Vergleichswert wird Propylenglykol auf seinen Gefrierpunkt getestet.

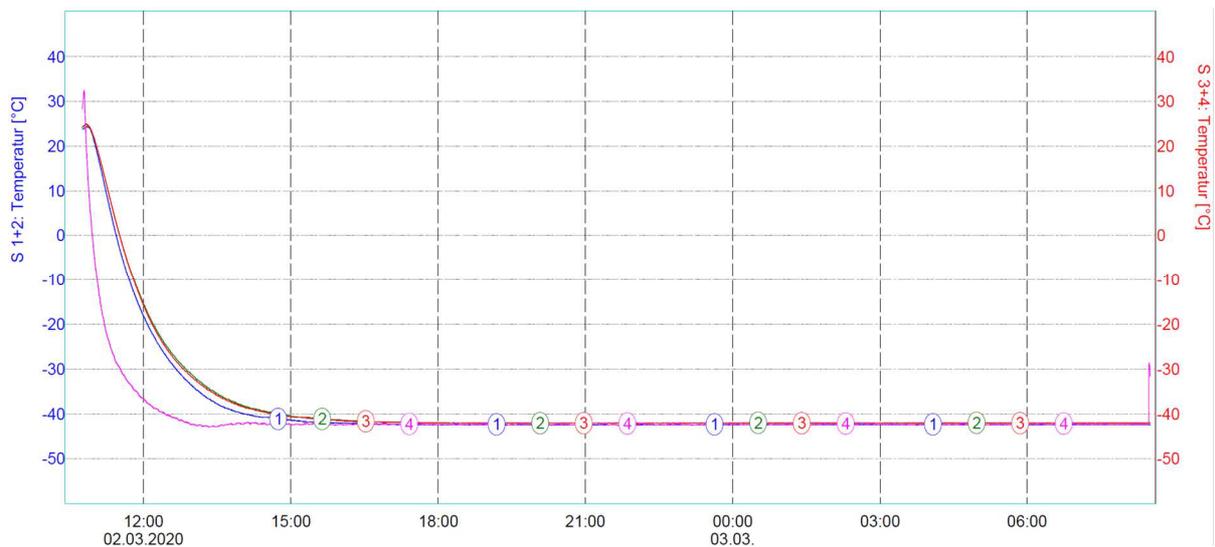


Abbildung 26 Gefrierkurve Propylenglykol

Man sieht auch für diesen Alkohol, dass 375 g Lösung bis zu einer Temperatur von -40°C nicht frieren.

### 5.4.7 Sno'n'Ice

Bei Sno'n'Ice handelte es sich wiederum um ein Taumittel in granuliert Form. Da keine Angaben über die zu verwendende Konzentration in einer Solelösung vorliegen, wird die Konzentration in

Abhängigkeit der maximalen Löslichkeit und in Orientierung an die bei Natriumchlorid verwendeten Solekonzentrationen frei gewählt:

Tabelle 15 Konzentrationen Sno'n'Ice Gefrierversuche

Solekonzentration	Salzmenge	Wassermenge
10 %	37,5 g	337,5 g
16 %	60 g	315 g
22 %	82,5 g	292 g

Bei diesen Konzentrationen ist eine Auflösung zwar nicht problematisch, doch genau wie bei Kaliumcarbonat nur unter Rühren möglich. Die Gefrierverläufe zeigen folgendes Aussehen (Abbildung 27):

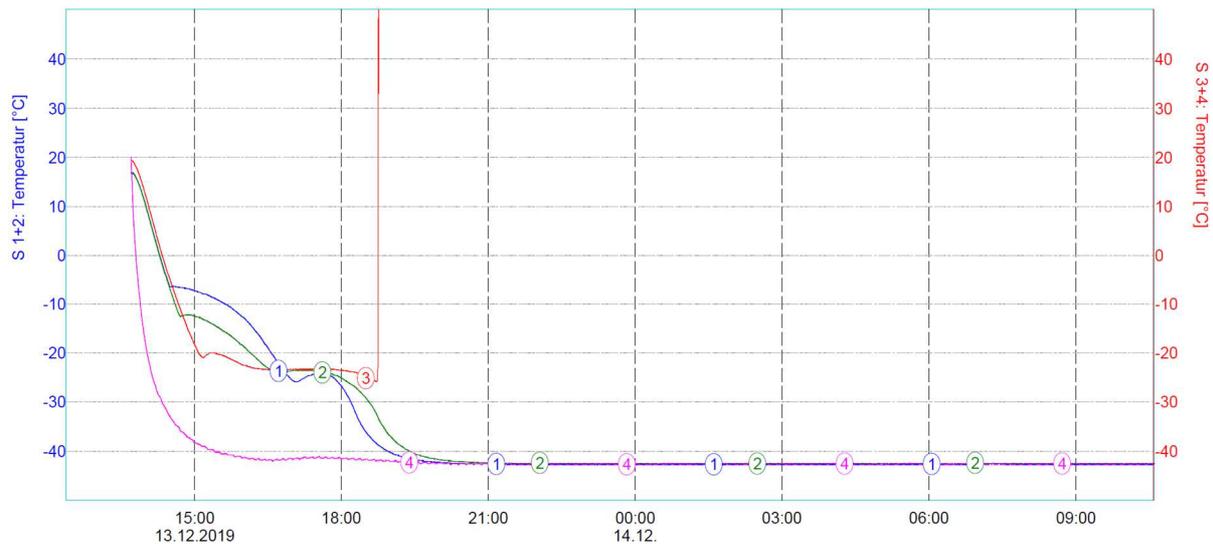


Abbildung 27 Gefrierkurve Sno'n'Ice

Im Laufe der Versuchszeit ist die Verbindung von Sensor 3 verloren gegangen. Da alle wichtigen Bereiche vor der Übertragungsunterbrechung liegen, können die Daten trotzdem verwendet werden. Sensor 1 zeigt die 10%ige, Sensor 2 die 16%ige und Sensor 3 die 22%ige Sole, Sensor 4 wie immer den Temperaturverlauf innerhalb des Klimaschranks.

Für eine 10%ige Sole liegt der Gefrierpunkt bei  $-6,5^{\circ}\text{C}$ , für eine 16%ige Sole bei  $-12,5^{\circ}\text{C}$ , in beiden Fällen tritt vor Erreichen des Gefrierpunktes „Supercooling“ ein. Da auch in Wien in Ausnahmefällen Temperaturen von  $-10^{\circ}\text{C}$  erreicht werden können, liegen die Gefrierpunkte bei geringer Konzentration zu hoch.

Der Gefrierpunkt der 22%igen Sole liegt mit  $-20^{\circ}\text{C}$  im Bereich von Natriumchlorid. Hinsichtlich des Gefrierpunktes wäre der Einsatz von Sno'n'Ice somit denkbar. Unter Berücksichtigung des Preises wäre ein Einsatz allerdings nur wirtschaftlich, wenn eine Konzentration deutlich unter jener von Natriumchlorid gewählt werden könnte. Da dies auf Grund des frühzeitigen Gefrierens jedoch nicht möglich ist, stellt Sno'n'Ice keine mögliche Alternative für Kaliumcarbonat als Ersatz für Natriumchlorid dar, und wird in der Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

#### 5.4.8 Schlussfolgerung

Die Gefrierversuche haben gezeigt, dass sowohl Viaform als auch das Auftaumittel 49 % 1:1 ein deutlich besseres Verhalten hinsichtlich des Gefrierpunktes aufweisen als Natriumchlorid oder Kaliumcarbonat. Gleiches gilt für die beiden auf Alkohol basierenden Referenzmittel (Enteisungsmittel und Propylenglykol). Keine der 4 Lösungen friert bei Temperaturen bis zu  $-40^{\circ}\text{C}$  ein, dem zur Folge ist

für die nachfolgenden Tauleistungsversuche eine höhere Leistungsfähigkeit zu erwarten. Diese Annahme bestätigt sich bei Versuchsdurchführung, detaillierte Ergebnisse folgen in Kapitel 6.4.

Um den genauen Gefrierpunkt, und somit die Unterschiede zwischen den einzelnen Mittel zu bestimmen, müsste Messungen bei tieferen Temperaturen durchgeführt werden. Da in Österreich im städtischen Gebiet seit Beginn der Messungen ohnedies noch nie Temperaturen unter  $-40^{\circ}\text{C}$  festgestellt wurden, benötigt dieses Szenario keinerlei weiterer Überprüfung.

Allgemein lässt sich anhand der Ergebnisse jedoch feststellen, dass sowohl Viaform als auch das Auftaumittel 49 % 1:1 hinsichtlich des Gefrierpunktes bessere Ergebnisse liefern als Natriumchlorid und Kaliumcarbonat und diese somit problemlos im Winterdienst ersetzen könnten.

Ergänzend sei für NaCl noch angemerkt, dass die Gefrierversuche mit einer stärker konzentrierten Sole bessere Ergebnisse in Hinblick auf den Gefrierpunkt geliefert haben. Der Gefrierpunkt der derzeit verwendeten 22%igen Sole liegt bei  $-19,63 \pm 0,19^{\circ}\text{C}$ . Steigert man die Konzentration auf 25 % liegt der Gefrierpunkt bei  $-22,07 \pm 0,05^{\circ}\text{C}$ . Das entspricht einer Absenkung von rund  $2,5^{\circ}\text{C}$ . Auf Grund dieser Absenkung ist auch eine Verbesserung des Tauleistungsverhaltens zu erwarten. Da in diesem Konzentrationsbereich eine schädliche Hydrohalitbildung theoretisch möglich wäre, ist der Einsatz einer 25%igen Sole nicht zielführend.

## 5.5 Referenzstudie für Natriumchlorid

Um zu überprüfen, ob es sich bei den Ergebnissen um plausible Ergebnisse handelt, werden die ermittelten Werte für NaCl mit einer Referenzstudie verglichen.

Die ermittelten Gefrierpunktverläufe werden mit den Daten aus [10], *Eignungskriterien für auftauende Streumittel*, verglichen. In dieser Referenzarbeit wurden andere, und ein größeres Spektrum an Konzentrationen von NaCl getestet. Für dieses Projekt wurde von der MA 48 eine Solekonzentration von 22 % vorgegeben, da diese derzeit im Wiener Winterdienst verwendet wird. Dem zu Folge wurde nur eine Konzentration von 22 %, sowie, aus Gründen der Vergleichbarkeit 20 % und 25 %, getestet. Die Ergebnisse der beiden Studien zeigen jedoch einen kausalen Zusammenhang. In [10] wurden Dreifachbestimmungen zur Gefrierpunktermittlung durchgeführt, Mittelwerte und Standardabweichungen der Daten bestimmt und auf dieser Datengrundlage ein Diagramm über die Entwicklung der Gefrierpunkttemperatur bei unterschiedlichen Konzentrationen angelegt (Abbildung 28). Bei einer Konzentration von 21 % ergab sich ein Gefrierpunkt von  $-16,5 \pm 1,2^{\circ}\text{C}$ , bei einer Konzentration von 23,4 % ein Gefrierpunkt von  $-22,7 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$ . Die genannten Konzentrationen sind jenen dieser Studie am nächsten. Auch in dieser Arbeit werden Dreifachbestimmungen durchgeführt, Mittelwerte und Standardabweichungen gebildet. Setzt man die beiden Studien in Vergleich zueinander, erhält man folgendes Ergebnis:

Bei einer Konzentration der Solelösung von 20 % beträgt die Abweichung von dem interpolierten Wert der Referenzstudie circa  $2,5^{\circ}\text{C}$  in negativer Richtung, wohingegen für die Konzentration von 22 % die Ergebnisse dieser Arbeit nahezu mit der Referenzstudie übereinstimmen. Da die maximale Konzentration des Forschungsprojektes des Verkehrssicherheitsfonds nur bis zu 23,4 % reicht, können über die 25%ige Solelösungen nur spekulative Aussagen getroffen werden. Das der Gefrierpunkt der 25%igen NaCl-Sole dieses Projekts höher liegt als jener der 23,4%igen Sole der Referenzstudie lässt darauf schließen, dass sich Hydrohalit bildet, die Lösung übersättigt ist und der Gefrierpunkt dem zu Folge wieder in höhere Bereich ansteigt, ein typisches Verhalten für NaCl. Der Vergleich von Abbildung 28 mit dem eutektischen Diagramm (Abbildung 5) bestätigt diese Aussage. Unter Annahme, dass die vorhandenen Abweichungen durch die händische Anmischung durch unterschiedliche Personen mit unterschiedlichen Geräten, eventuellen unvermeidbaren Verunreinigungen und Mengendifferenzen des in den Flaschen abgefüllten Solegemisches zustande kommen, liefern die beiden Studien plausible Ergebnisse. Die Ergebnisse der für diese Studie relevanten 22 % gleichen sich in ausreichender Weise und werden somit als richtig und allgemein gültig angenommen [10].

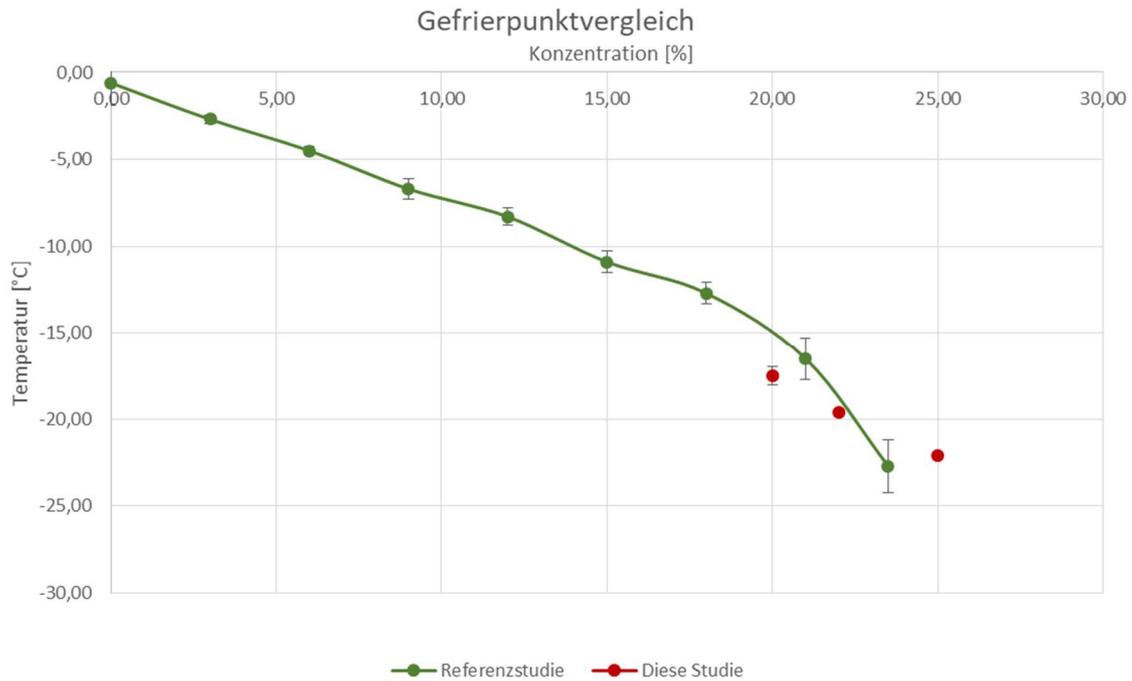


Abbildung 28 Gefrierpunktvergleich Referenzstudie

Tabelle 16 Gefrierpunktvergleich Referenzstudie

<b>Diese Studie</b>		
Konzentration Sole	Gefrierpunkt Mittelwert [°C]	Standardabweichung [°C]
20,0 %	-17,50°C	0,51°C
22,0 %	-19,63°C	0,19°C
25,0 %	-22,07°C	0,05°C
<b>Referenzprojekt</b>		
Konzentration Sole	Gefrierpunkt Mittelwert [°C]	Standardabweichung [°C]
0,0 %	-0,60°C	1,30°C
3,0 %	-2,70°C	0,25°C
6,0 %	-4,50°C	0,25°C
9,0 %	-6,70°C	0,60°C
12,0 %	-8,30°C	0,50°C
15,0 %	-10,90°C	0,60°C
18,0 %	-12,70°C	0,60°C
21,0 %	-16,50°C	1,20°C
23,5 %	-22,70°C	1,50°C

## 6 Tauleistungsversuche

### 6.1 Tauvorgang

Beim Tauvorgang muss das auf der Straße befindliche Eis geschmolzen, das heißt von einem festen in einen flüssigen Aggregatzustand übergeführt werden.

Damit Eis verflüssigt, also geschmolzen werden kann, ist Energie nötig, auch bezeichnet als Schmelzwärme oder Schmelzenthalpie. Für Wasser liegt sie bei 334 kJ/kg. Für den Tauvorgang ist von Interesse wie viel Energie pro Zeiteinheit zum Schmelzen benötigt wird. Energie pro Zeiteinheit ist Leistung, das heißt die Masse an Eis die pro Zeit geschmolzen wird ist laut Physik, die so genannte Tauleistung [10].

Unter Tauwirksamkeit versteht man jene Menge an Eis, die bei bestimmter Temperatur in einer bestimmten Zeit mit einer vorgegebenen Taumittelmenge aufgetaut werden kann. Beim eutektischen Punkt handelt es sich um jene Taumittelkonzentration, bei der das Taumittel die größte Wirksamkeit aufweist, das heißt den Gefrierpunkt der Lösung am weitesten absenkt. Mit der Tauwirksamkeit und dem eutektischen Punkt lässt sich bestimmen, ab wann das Taumittel nicht mehr wirksam aufgebracht werden kann, wann somit die Grenztemperatur erreicht ist [15].

### 6.2 Versuchsablauf: Tauleistung flüssiger Taumittel

Zur allgemeinen Bestimmung der Tauleistung wird folgende Vorgehensweise angewendet: Als erstes werden die Eis-Probekörper hergestellt. Dazu werden Metall Dosen mit einem ungefähren Fassungsvermögen von 200 ml bis zum oberen Rand mit Wasser befüllt und anschließend mit einem Deckel verschlossen. Am Deckel ist eine weitere Metallhalbschale befestigt. Diese sorgt dafür, dass der Eiskörper nach dem Gefriervorgang eine Vertiefung aufweist, auf welche das flüssige Taumittel aufgebracht werden kann ohne auszulaufen (Abbildung 15). Beim Verschließen ist des Weiteren darauf zu achten die Deckel nicht zu fest aufzuschrauben, da sich die Dosen eventuell später nicht mehr öffnen lassen. Ein Hinweis auf das Vorgehen befindet sich in Kapitel 4.2. Der Deckel verfügt über ein bis zwei kleine Löcher. Über diese kann mit Hilfe einer Spritze noch zusätzliches Wasser hinzugefügt werden, sollte beim Verschließen zu viel Wasser überlaufen und die Dose nicht mehr vollständig gefüllt sein. Die befüllten und verschlossenen Dosen werden im Klimaschrank auf dem Gitter in mittlerer Ebene, rechts und links der in der Mitte des Gitters befindlichen Waage angeordnet. Unterhalb des Gitters wird eine Plastikkiste gestellt, in welcher in späterer Folge die Deckel und verwendeten Dosen abgelegt werden können (Abbildung 29).

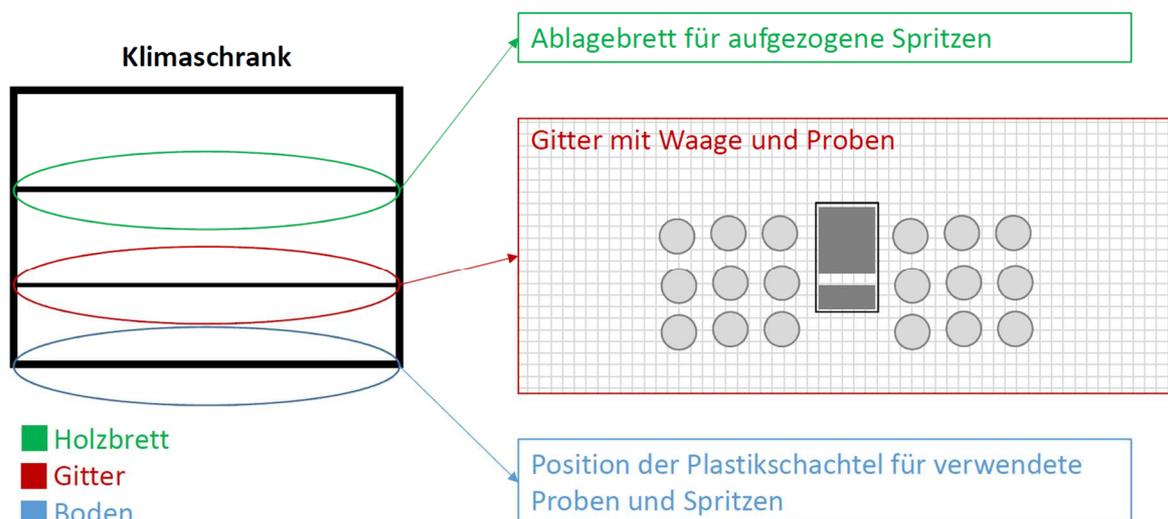


Abbildung 29 Versuchsaufbau Tauleistungsversuche

Anschließend werden 10 ml Spritzen mit dem zu testenden Taumittel aufgezogen. Beim gleichzeitigen Testen von mehreren verschiedenen Taumitteln, müssen die Spritzen entsprechend beschriftet werden, um Verwechslungen vorzubeugen, im einfachsten Fall über Nummerierung oder Beschriftung. Die aufgezogenen Spritzen werden mittig auf dem oberen Holzbrett abgelegt. Es ist ratsam einige Spritzen in Reserve aufgezogen zu haben.

Danach kann der Klimaschrank verschlossen und eingeschaltet werden. Eine Luftfeuchtigkeit von 65 % und die entsprechende Temperatur wird eingestellt und die Proben über Nacht eingefroren. Die Deckel der durchgefrorenen Dosen müssen vor Versuchsbeginn abgeschraubt werden. Danach wird der Schrank wieder verschlossen. Beim Aufschrauben sind die Proben eventuell für kurze Zeit der Körperwärme der Hände ausgesetzt, wodurch geringfügige Abtaugungen des Eiskörpers entstehen könnten. Deshalb müssen die Proben nochmals für eine weitere Stunde eingefroren werden, um das Risiko einer Beeinflussung zu verhindern. Danach beginnen die eigentlichen Versuche. Mittels eigens in den Klimaschrank eingebauten Handschuhen kann im geschlossenen Schrank hantiert werden (Abbildung 16).

Um die Tauleistung berechnen zu können müssen folgende Gewichte bestimmt werden: Als erstes wird der Eiskörper inklusive Metallschale gewogen und das Gewicht notiert. Danach werden 10 ml Taumittel in die Einbuchtung des Eises gespritzt und das Gewicht von Eis plus Schale plus Taumittel ebenfalls gewogen und notiert. Nach Ablauf der Einwirkzeit können Taumittel und das durch den Tauvorgang entstandene Wasser abgegossen werden. Danach erfolgt die letzte Wiegung des verbleibenden Eiskörper inklusive Dose. Aus der Gewichts Differenz lässt sich die Tauleistung ermitteln. Der Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle Eiskörper verwendet wurden, danach ist die Versuchsreihe beendet. Die Eiskörper könne aufgetaut und die Spritzen gereinigt, der Klimaschrank abgetaut und das Kondenswasser ausgewischt werden. Danach kann mit der nächsten Versuchsreihe gestartet werden.

Um die Tauleistung und die Taurate zu berechnen, müssen zuerst einige Abkürzungen definiert werden:

$M_{v,E+D}$	<i>Gewicht Eiskörper + Dose vor Tauvorgang [g]</i>
$M_{v,E+D+T}$	<i>Gewicht Eiskörper + Dose + Taumittel vor Tauvorgang [g]</i>
$M_{n,E+D}$	<i>Gewicht Eiskörper + Dose nach Tauvorgang [g]</i>
$M_{gE}$	<i>Menge an getautem Eis [g]</i>
$M_T$	<i>Menge an aufgebrachtem Taumittel [g]</i>

Bei der Berechnung wird wie folgt vorgegangen [18]:

Zuerst muss die Menge des getauten Eises

$$M_{gE} = M_{n,E+D} - M_{v,E+D} \quad [g] \quad (7)$$

und des aufgebrauchten Taumittels

$$M_T = M_{v,E+D+T} - M_{v,E+D} \quad [g] \quad (8)$$

berechnet werden.

Die Tauleistung ergibt sich zu

$$TL = \frac{M_{gE}}{M_T} \quad [g/g] \quad (9)$$

Und daraus die Taurate

$$TR = \frac{TL}{dt} \quad [g/g/min] \quad (10)$$

### 6.3 Prüfprogramm

Neben dem derzeit verwendeten Taumittel Natriumchlorid werden fünf Alternativen getestet, Kaliumcarbonat, Viaform, das Auftaumittel 49 % 1:1, das Enteisungsmittel und Propylenglykol. Gerade in Österreich sind in der Winterperiode Temperaturen auf der Straße knapp unter dem Nullpunkt laut MA 48 der häufigste Fall, wohingegen Temperaturen von  $-10^{\circ}\text{C}$  oder weniger nur in seltenen Fällen auftreten, aber durchaus möglich sind. Um aussagekräftige Ergebnisse zur Leistungsfähigkeit der Taumittel, sowohl im Normaltemperaturbereich als auch bei Extremereignissen, zu erhalten, werden im Zuge dieses Projekts die Tauleistungen bei  $-2,5^{\circ}\text{C}$ ,  $-5^{\circ}\text{C}$ , und  $-10^{\circ}\text{C}$  bestimmt. Es ist nicht nur interessant wie sich das mit Taumittel beaufschlagte Eis auf der Straße in den ersten Minuten nach Aufbringung verhält, sondern auch die Wirkungsweise über einen längeren Zeitraum. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen ist ein breites Spektrum an Einwirkzeiten zu wählen. In dieser Arbeit werden folgend Zeitspannen in den Versuchen angewendet: 2, 10, 30, 60, 120 und 240 Minuten. Für jedes Taumittel erfolgt bei jedem Temperaturniveau und jeder Einwirkzeit eine Vierfachbestimmung, somit ergeben sich bei sechs Taumitteln, drei Temperaturniveaus und sechs Einwirkzeiten 432 Proben.

Tabelle 17 Prüfprogramm Tauleistungsversuche

Streumittel	Einwirkdauer [min]	Temperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Versuchsanzahl
Natriumchlorid (22 %)	2, 10, 30, 60, 120, 240	$-2,5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-10^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
Kaliumcarbonat (48 %)	2, 10, 30, 60, 120, 240	$-2,5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-10^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
Viaform	2, 10, 30, 60, 120, 240	$-2,5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-10^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
Auftaumittel 49 % 1:1	2, 10, 30, 60, 120, 240	$-2,5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-10^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
Enteisungsmittel	2, 10, 30, 60, 120, 240	$-2,5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-10^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
Propylenglykol	2, 10, 30, 60, 120, 240	$-2,5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-5^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit
		$-10^{\circ}\text{C}$	Je 4/Einwirkzeit

## 6.4 Ergebnisse

### 6.4.1 Natriumchlorid

Tabelle 18 Tauleistung Natriumchlorid

Natriumchlorid						
Einwirkungsdauer [min]	-2,5°C [g/g]		-5°C [g/g]		-10°C [g/g]	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
2	0,148	0,015	0,104	0,009	0,002	0,004
10	0,337	0,011	0,273	0,030	0,034	0,027
30	0,607	0,025	0,409	0,017	0,132	0,082
60	0,927	0,126	0,621	0,092	0,191	0,059
120	1,128	0,046	0,983	0,159	0,249	0,058
240	1,410	0,063	1,001	0,150	0,386	0,070

Aus den Ergebnissen lässt sich erkennen, dass mit längerer Einwirkungszeit auch ein Anstieg der Tauleistung für NaCl vorliegt. Unmittelbar nach dem Aufbringen ist die Wirkung allerdings sehr gering bis nicht vorhanden. Es empfiehlt sich zusätzlich zur auftauenden auch eine abstumpfende Streuung, um die Griffigkeit auch zu Glättebeginn zu gewährleisten. Des Weiteren ist aus den Ergebnissen deutlich erkennbar, dass Natriumchlorid bei Temperaturen von -10°C nicht mehr wirksam eingesetzt werden kann. Die Werte für die Temperaturniveaus -2,5°C und -5°C übersteigen jene von -10°C stark.

### 6.4.2 Kaliumcarbonat

Tabelle 19 Tauleistung Kaliumcarbonat

Kaliumcarbonat						
Einwirkungsdauer [min]	-2,5°C [g/g]		-5°C [g/g]		-10°C [g/g]	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
2	0,190	0,060	0,121	0,026	0,029	0,007
10	0,421	0,055	0,375	0,021	0,210	0,055
30	0,788	0,021	0,647	0,072	0,447	0,121
60	1,139	0,031	1,001	0,050	0,637	0,049
120	1,580	0,036	1,579	0,096	0,833	0,141
240	1,834	0,260	1,832	0,111	0,850	0,090

Auch Kaliumcarbonat weist ein ähnliches Ergebnisbild auf. Bei geringen Einwirkzeiten ist die Tauleistung relativ gering, je länger die Liegedauer desto besser die Ergebnisse. Wie bei Natriumchlorid ist die Wirksamkeit für -10°C eingeschränkt im Vergleich zu -2,5°C und -5°C. Überdies sei angemerkt, dass sich die Werte für -2,5°C und -5°C nicht wesentlich unterscheiden.

### 6.4.3 Viaform

Tabelle 20 Tauleistung Viaform

Viaform						
Einwirkungsdauer [min]	-2,5°C [g/g]		-5°C [g/g]		-10°C [g/g]	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
2	0,390	0,035	0,300	0,032	0,217	0,060
10	0,761	0,036	0,633	0,041	0,424	0,040
30	1,167	0,045	1,051	0,043	0,821	0,019
60	1,911	0,124	1,697	0,114	1,080	0,052
120	2,383	0,357	1,816	0,048	1,115	0,075
240	2,876	0,083	2,477	0,185	1,178	0,134

Auch das neu zu untersuchende Mittel Viaform weist einen Anstieg der Tauleistung mit der Einwirkzeit auf. Aber auch schon bei sehr kurzen Einwirkungszeiten ist Viaform sehr wirkungsvoll und eignet sich somit gut um rasch Eis zu tauen und die Anfangsglätte zu verhindern. Bei langen Einwirkungszeiten, 60 Minuten oder mehr, ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Tauleistung auf den einzelnen Temperaturniveaus zu erkennen. Bei -2,5°C und -5°C ist Viaform deutlich wirkungsvoller als bei -10°C.

### 6.4.4 Auftaumittel 49 % 1:1

Tabelle 21 Tauleistung Auftaumittel 49 % 1:1

Auftaumittel 49% 1:1						
Einwirkungsdauer [min]	-2,5°C [g/g]		-5°C [g/g]		-10°C [g/g]	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
2	0,383	0,068	0,284	0,047	0,162	0,030
10	0,639	0,022	0,557	0,066	0,345	0,037
30	1,037	0,036	0,937	0,041	0,804	0,049
60	1,469	0,092	1,392	0,086	0,934	0,192
120	2,047	0,079	1,417	0,119	1,094	0,062
240	2,230	0,471	1,925	0,081	1,301	0,034

Auch für die zweite Alternative der MA 48 ist die Anfangstauleistung relativ gut und steigt mit zunehmender Einwirkzeit. Mit fallender Temperatur wird auch die Tauleistung geringer, allerdings sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Temperaturniveaus nicht so gravierend wie bei anderen Streumitteln. Auch zwischen -10°C und den beiden anderen Temperaturstufen -2,5°C und -5°C ist ein weniger starker Abfall zu erkennen als bei dem vorher beschriebenen Mittel Viaform.

### 6.4.5 Enteisungsmittel

Tabelle 22 Tauleistung Enteisungsmittel

Enteisungsmittel						
Einwirkungsdauer [min]	-2,5°C [g/g]		-5°C [g/g]		-10°C [g/g]	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
2	0,271	0,092	0,136	0,030	0,019	0,019
10	0,551	0,134	0,419	0,045	0,208	0,037
30	1,262	0,194	0,796	0,177	0,531	0,049
60	1,445	0,086	1,287	0,046	0,791	0,046
120	2,106	0,135	1,609	0,284	1,026	0,095
240	2,838	0,330	1,995	0,045	1,036	0,195

Je länger die Einwirkungszeit und je höher die Temperatur desto besser die Tauleistung. Bezüglich der Größenordnung liegen die Werte ungefähr zwischen jenen von Kaliumcarbonat und Viaform.

### 6.4.6 Propylenglykol

Tabelle 23 Tauleistung Propylenglykol

Propylenglykol						
Einwirkungsdauer [min]	-2,5°C [g/g]		-5°C [g/g]		-10°C [g/g]	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
2	0,191	0,032	0,002	0,004	0,003	0,005
10	0,422	0,029	0,231	0,043	0,007	0,004
30	1,175	0,118	0,757	0,095	0,652	0,025
60	1,771	0,029	1,462	0,145	1,064	0,119
120	2,582	0,095	2,065	0,040	1,195	0,039
240	3,412	0,036	2,797	0,133	1,739	0,099

Der Alkohol als zweiter Referenzwert hat bei kurzen Einwirkungszeiten so gut wie keine Tauwirkung. Bei längerer Wirkung steigt die Tauleistung aber verhältnismäßig stark an und übertrifft schlussendlich nach 240 Minuten alle anderen Taumittel. Folglich benötigt Propylenglykol eine gewisse Vorlaufzeit bis die tauende Wirkung einsetzt, was sich im Straßenverkehr als relativ ungünstig erweisen würde, da beim Aufbringen die Glätte nicht sofort bekämpft wird, sondern durch das aufgebrachte Mittel die Griffigkeit weiter herabgesetzt wird, ohne dass ein Tauvorgang stattfindet. Es handelt sie hierbei aber ohnedies nur um einen Referenzwert.

### 6.4.7 Vergleich

Das für Wien und somit für die MA 48 relevanteste Temperaturniveau liegt bei -2,5°C, da Witterungsbedingungen um den Nullpunkt in der Winterperiode der häufigste Fall sind. Die beiden folgenden Grafiken, Abbildung 30 und Abbildung 31, stellen die Tauleistung aller in dieser Arbeit getesteten Auftaumittel gegenüber. Auf der Abszissenachse wird jeweils die Einwirkdauer in Minuten, auf der Ordinatenachse die Tauleistung in g/g aufgetragen.

Abbildung 31, ein Säulendiagramm, beinhaltet die Mittelwerte der Tauleistung der 4-fach-Bestimmung sowie die Fehlerabweichung in Form der Standardabweichung der 4-fach-Bestimmung. Abbildung 30 dient zur Ergänzung von Abbildung 31. Es werden dieselben Ergebnisse in anderer Darstellungsform gezeigt, um die zeitliche Entwicklung besser einzusehen und die Vergleichbarkeit zwischen den

einzelnen Taumitteln zu erhöhen. Bei den Messpunkten handelt es sich wie in Abbildung 31 um die Mittelwerte der 4-fach-Bestimmung. Zwischen den einzelnen Messwerten wird linear interpoliert.

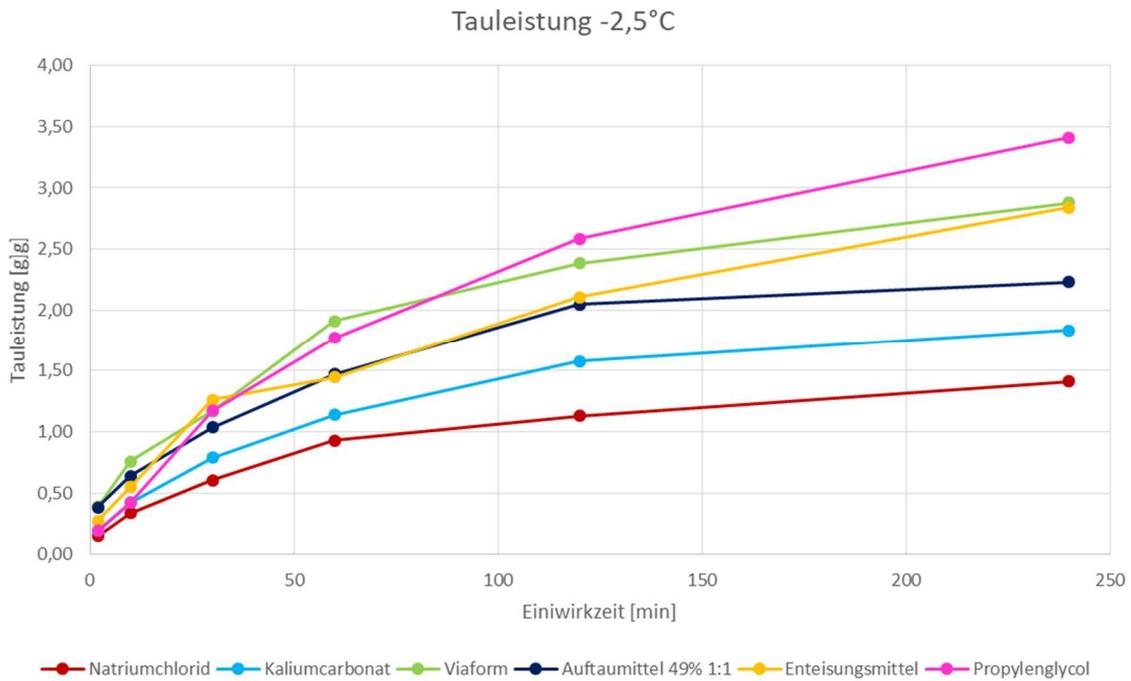


Abbildung 30 Tauleistungsvergleich -2,5°C (Punktdiagramm)

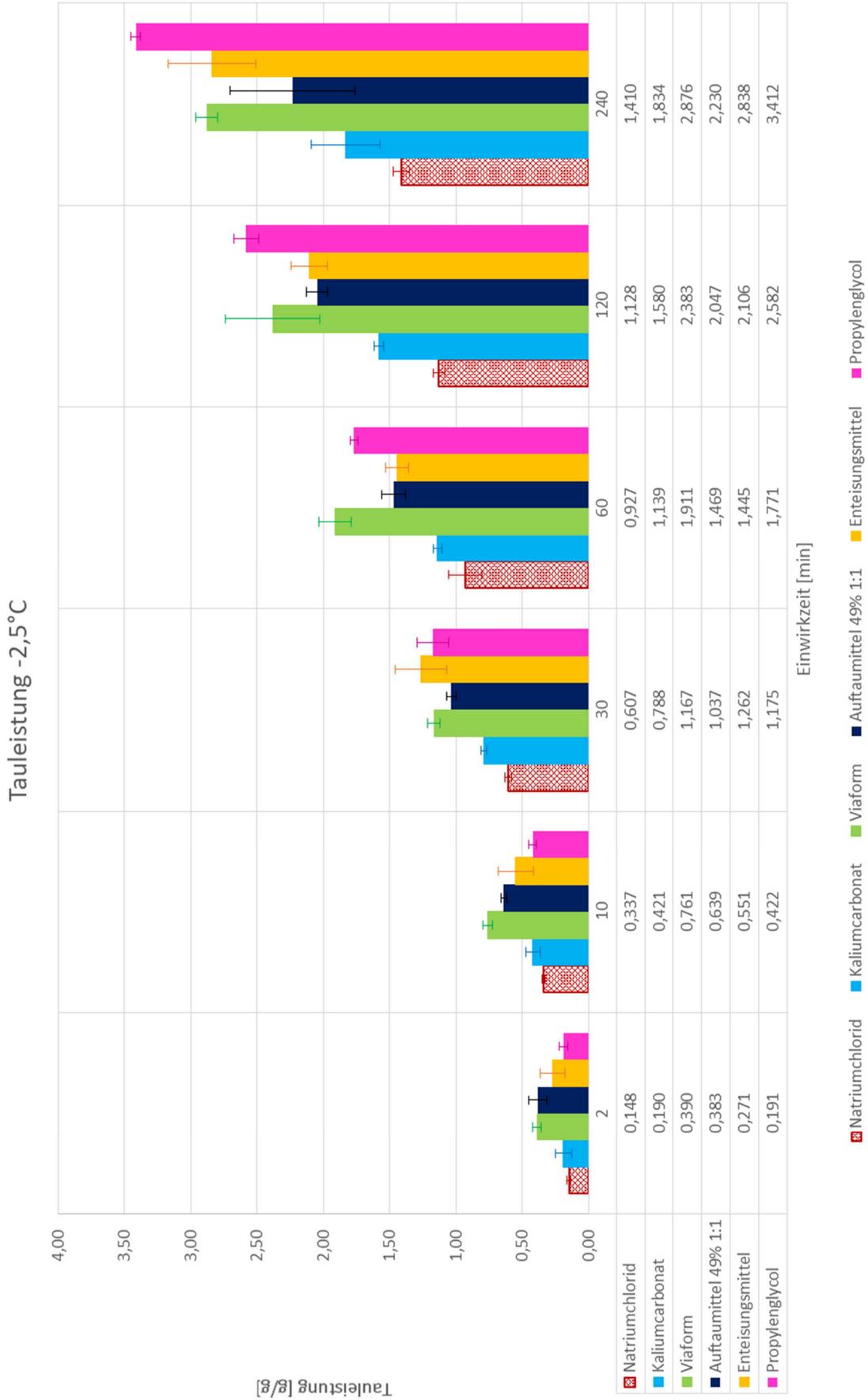


Abbildung 31 Tauleistungsvergleich -2,5°C (Säulendiagramm)

Natriumchlorid und Kaliumcarbonat verhalten sich bei kurzen Einwirkungszeiten sehr ähnlich, je länger allerdings die Liegedauer des Salzes ist, desto besser wirkt  $K_2CO_3$  im Vergleich zu  $NaCl$ . Das Referenzmittel Propylenglykol verhält sich bei kurzen Einwirkungszeiten wie Natriumchlorid und Kaliumcarbonat, ab einer Liegedauer von 30 Minuten beginnen sich die Werte allerdings deutlich abzuheben. Nach 240 Minuten erreicht Propylenglykol mit 3,4 g/g sogar die höchste aller Tauleistungen (~2,4-fache im Vergleich zu  $NaCl$ ). Der zweite Referenzwert, das auf Alkoholen basierende Enteisungsmittel, weist kontinuierlich höhere Tauleistungen als Natriumchlorid und Kaliumcarbonat auf. In Hinblick auf Propylenglykol ist die Tauleistung anfänglich besser, wird im Laufe der Zeit jedoch schlechter.

Betrachtet man nun die Ergebnisse der beiden angestrebten Alternativen, lässt sich auf den ersten Blick erkennen, dass die Anfangstauleistungen sowohl von Viaform als auch des Auftaumittels 49 % 1:1, Maximalwerte darstellen. Mit rund 0,4 g/g Tauleistung liegen die Werte doppelt so hoch im Vergleich zu Natriumchlorid, Kaliumcarbonat und Propylenglykol, auch das Enteisungsmittel kann, obwohl es bessere Werte als die eben genannten drei Taumittel liefert, nicht an diesen Werte herankommen. Auch nach 10 Minuten bringen Viaform und das Auftaumittel die besten Ergebnisse. Die anfänglich so starke Tauwirkung pendelt sich mit der Zeit allerdings ein. Im Vergleich mit den zurzeit angewendeten Taumitteln Natriumchlorid und Kaliumcarbonat schneiden sowohl Viaform als auch das Auftaumittel bei jeder Einwirkungszeit bedeutend besser ab. In Bezug auf die anderen beiden Referenzmittel weisen sie bei längeren Einwirkungszeiten etwas schlechtere Werte auf.

Vergleicht man Viaform und das Auftaumittel, lässt sich feststellen, dass sich die Ergebnisse bis zu einer Einwirkungszeit von 30 Minuten kaum merklich unterscheiden. Danach steigt die Tauleistung von Viaform stetig schneller an als jene des Auftaumittels. Nach 240 Minuten liegt die Differenz in der Tauleistung bei 0,7 g/g, unter Berücksichtigung einer maximalen Tauleistung von Viaform von 2,9 g/g und der des Auftaumittels von 2,2 g/g.

Abbildung 32 soll veranschaulichen wie sich die Tauleistung der einzelnen Taumittel zu jener von Natriumchlorid verhält. Dazu werden alle Werte auf Natriumchlorid bezogen. Die schwarze, horizontale Linie kennzeichnet Natriumchlorid und somit einen Multiplikationsfaktor von 1,0. Die Abszisse stellt wiederum die Einwirkungsdauer dar, auf der Ordinate werden die Multiplikationsfaktoren verzeichnet, mit welchen man den Wert der Tauleistung von Natriumchlorid multiplizieren müsste, um jenen für das jeweilige Taumittel zu erhalten.

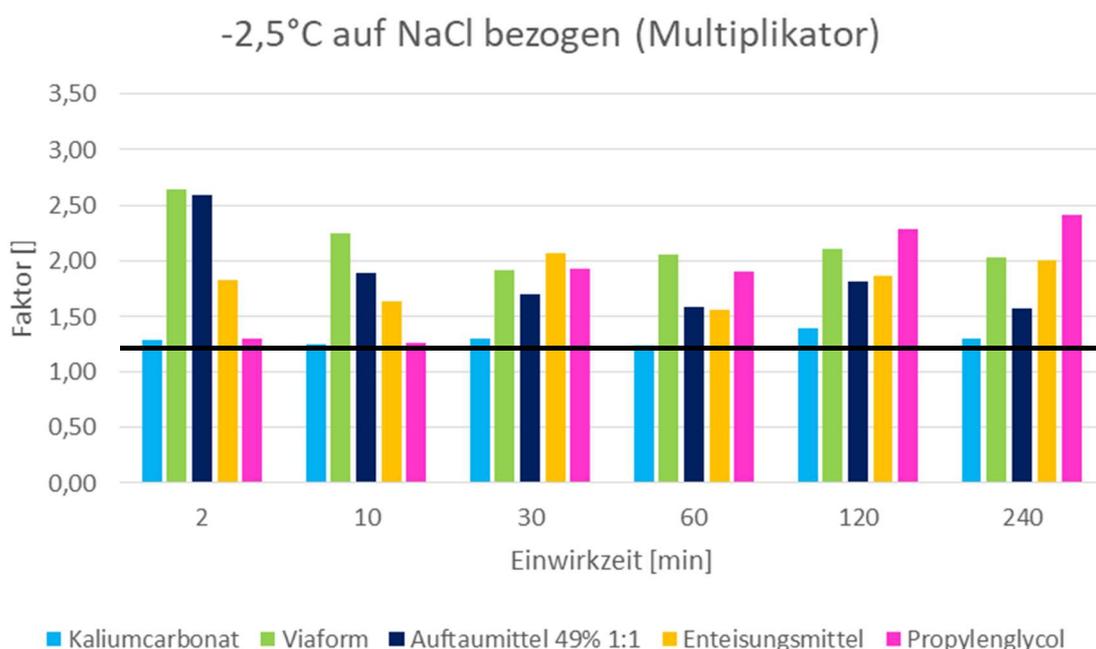


Abbildung 32 Tauleistung -2,5°C auf Natriumchlorid bezogen

Neben der Tauleistung kann auch noch die Taurate verglichen werden. Dazu wird die Tauleistung durch die Einwirkdauer dividiert. Folglich wird sich bei jenen Auftaumittel, die über eine hohe Tauleistung verfügen, auch eine höhere Taurate ergeben als bei Stoffen mit geringerer Tauleistung. Im Laufe der Zeit wird die Taurate allgemein geringer, da die Zeit im Verhältnis zur Tauleistung überproportional schnell ansteigt. In Abbildung 33 werden die Tauraten aller getesteten Mittel gegenübergestellt. Die Abszisse bleibt die Zeitachse, auf der Ordinate wird die Taurate in g/g/min dargestellt. Auf einen genauen Vergleich der Ergebnisse wird verzichtet, da sie sich wie jene der Tauleistung verhalten.

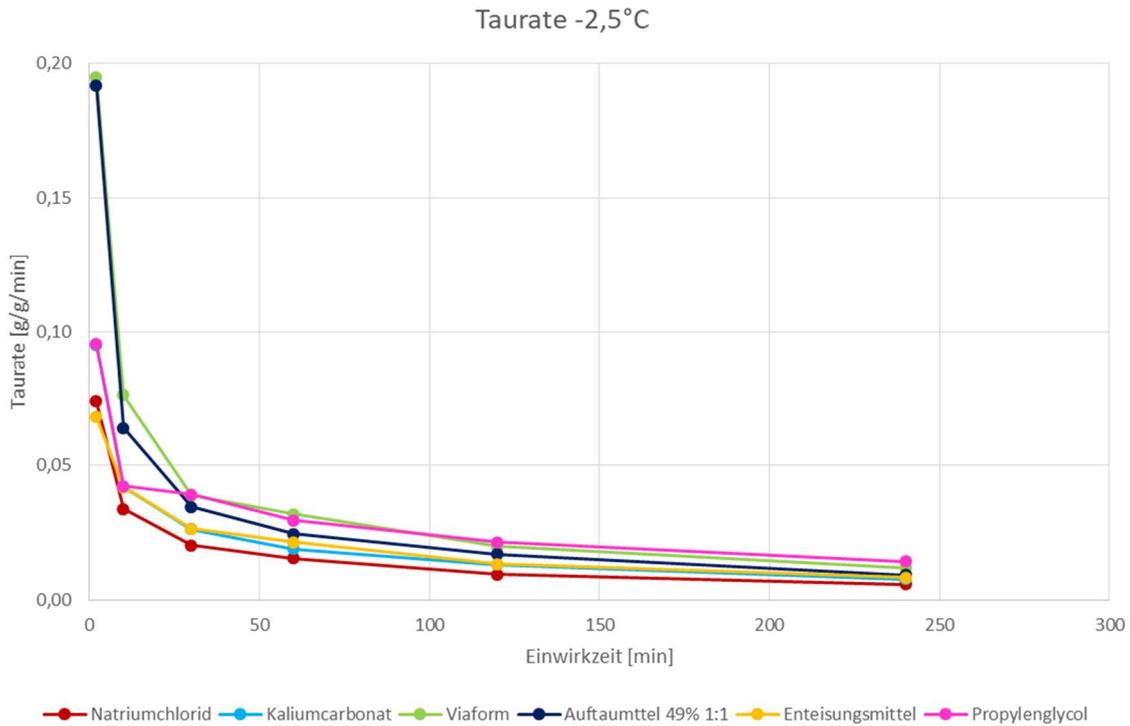


Abbildung 33 Taurate -2,5°C

Da die wesentlichen Unterschiede hauptsächlich in der Anfangsperiode zu erkennen sind, wird die Taurate für die ersten 30 Minuten nochmals getrennt betrachtet (Abbildung 34):

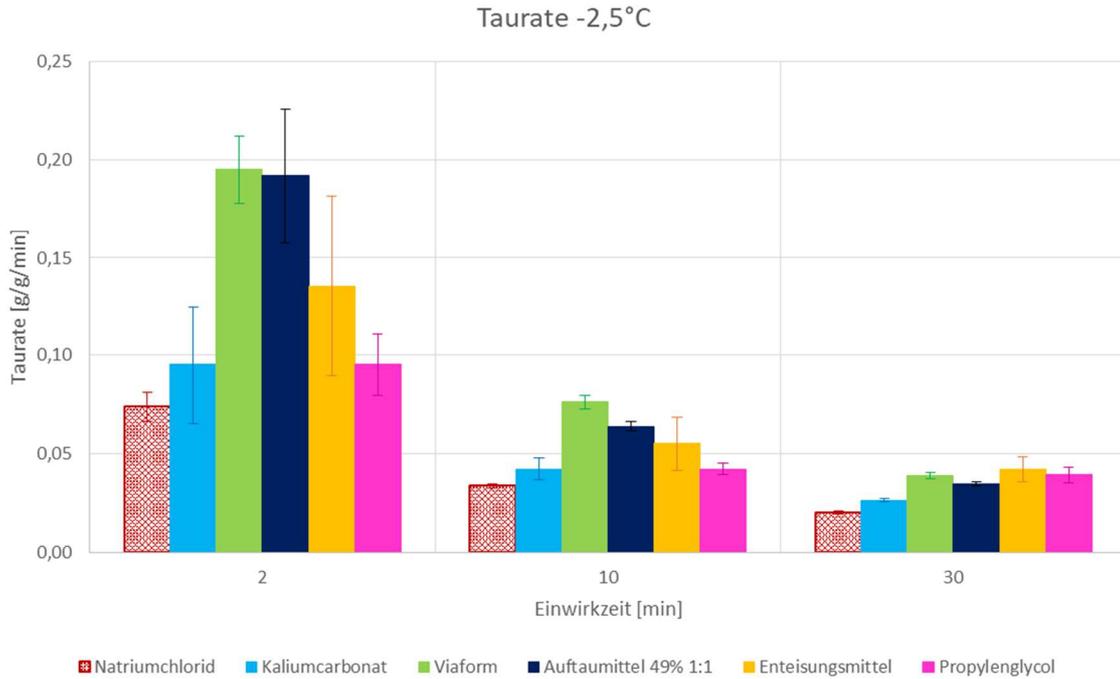


Abbildung 34 Taurate < 30 Minuten -2,5°C

Neben -2,5°C wurden Versuche bei -5°C und -10°C durchgeführt. Die einzelnen Taumittel verhalten sich sehr ähnlich zueinander wie bei -2,5°C jedoch mit geringerer Tauleistung je tiefer die Temperatur. In den beiden nachfolgenden Diagrammen, Abbildung 35 und Abbildung 36, wird die Tauleistung für -5°C und -10°C dargestellt. Für ausführlichere Ergebnisse wird auf den Anhang verwiesen.

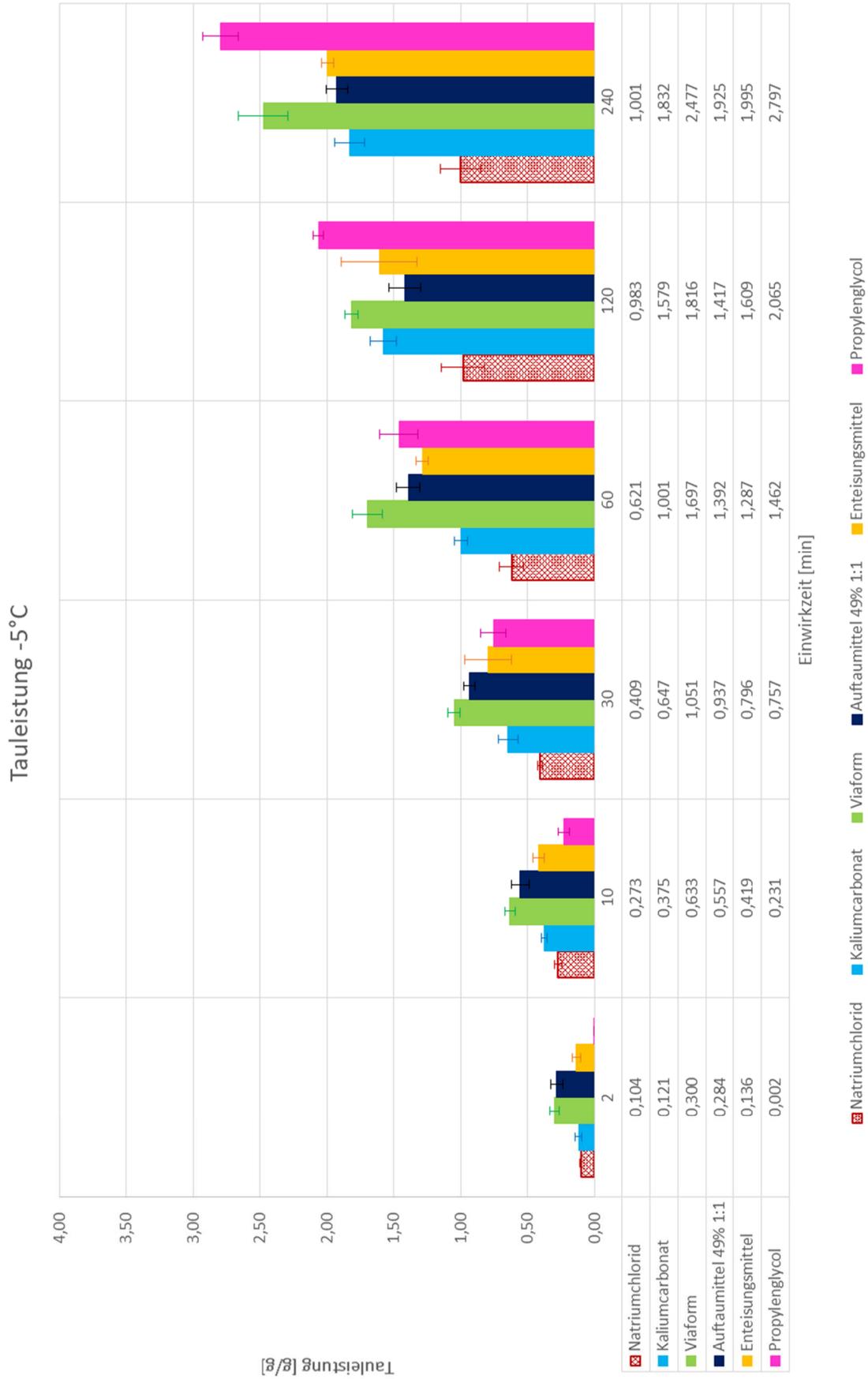


Abbildung 35 Tauleistungsvergleich -5°C (Säulendiagramm)

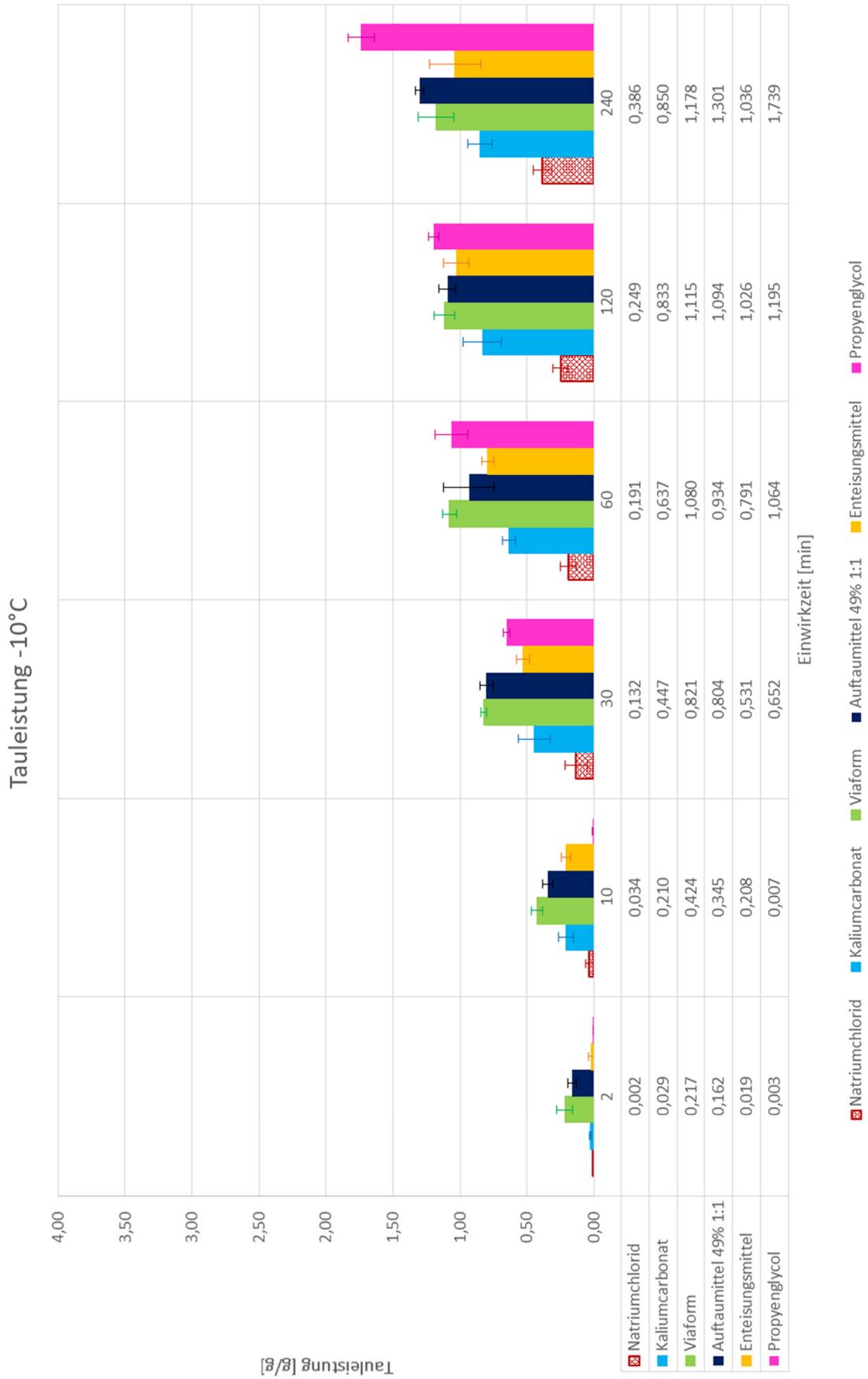
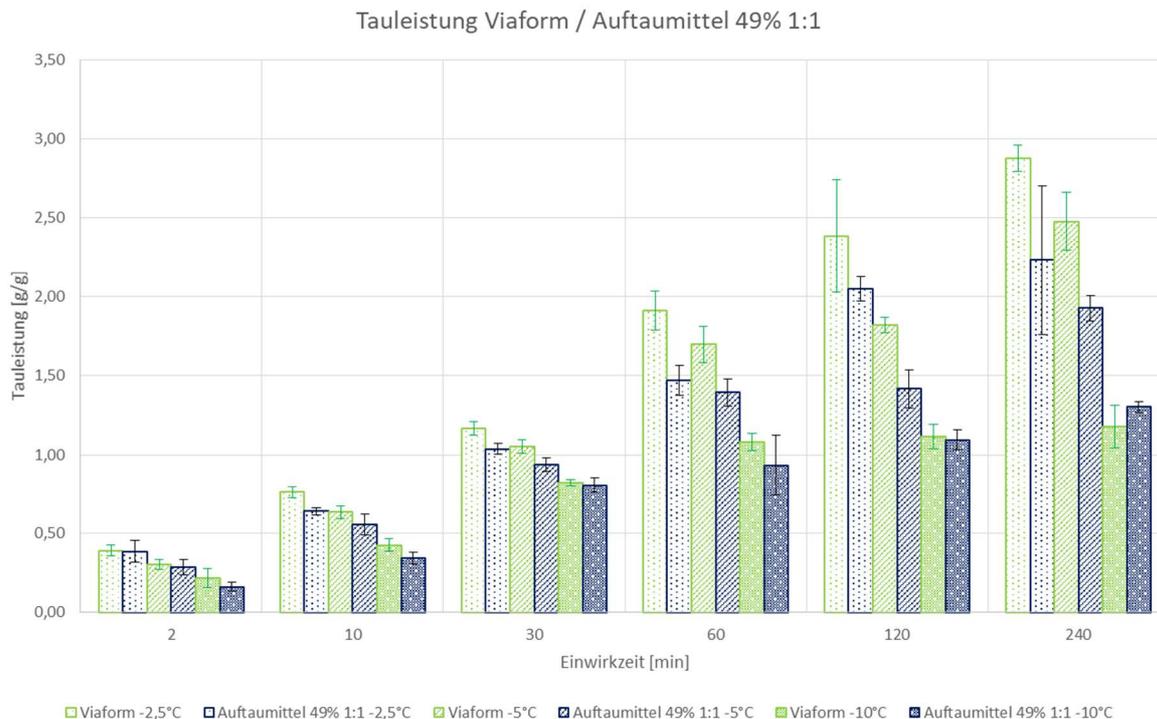


Abbildung 36 Tauleistungsvergleich -10°C (Säulendiagramm)

### 6.4.8 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen ganz deutlich, dass, unter ausschließlicher Berücksichtigung der Tauleistung, sowohl Viaform als auch das Auftaumittel 49 % 1:1 eine mögliche Alternative zu Kaliumcarbonat als Ersatzmittel zu Natriumchlorid wäre, für Einsatzgebiete, in denen aufgrund umwelttechnischer Aspekte der Einsatz von NaCl nicht möglich ist. Diese Behauptung wird dadurch begründet, dass die Tauleistung der beiden betrachteten Alternativen bei jedem Temperaturniveau besser ist als die der derzeitigen Alternative Kaliumcarbonat, aber auch als die des Ausgangstaumittels Natriumchlorid. Vergleicht man die beiden Alternativen erhält man folgendes Bild (Abbildung 37):



**Abbildung 37 Tauleistungsvergleich Viaform / Auftaumittel 49 % 1:1**

Bei kurzen Einwirkzeiten, beispielsweise zwei Minuten, ist die Tauleistung von Viaform und des Auftaumittels 49 % 1:1 annähernd gleich. Je länger die Einwirkzeit, desto größer wird die Differenz in der Tauleistung zu Gunsten von Viaform. Dies gilt allerdings nur für Temperaturen bis  $-5^{\circ}\text{C}$ . Die Ergebnisse für  $-10^{\circ}\text{C}$  zeigen, dass es bei sehr tiefen Temperaturen unerheblich ist, welches der beiden Taumittel eingesetzt wird, da die Unterschiede relativ klein sind. Müsste die Entscheidung auf ein Taumittel beschränkt werden, wäre trotzdem Viaform die leistungsfähigere Alternative, da sie in Summe besserer Ergebnisse liefert.

Um das gleiche Tauergebnis wie bei einer NaCl-Streuung zu erhalten, sind bedeutend geringere Streumengen notwendig. Unter Beibehaltung der Streumenge wären weitaus besserer Tauleistungen möglich. Gerade bei Extremwetterereignissen könnte dadurch die relativ schwache Tauleistung, die momentan mit NaCl erzielt wird, kaschiert werden.

Es sei angemerkt, dass sowohl das Enteisungsmittel als auch Propylenglykol hinsichtlich der Tauleistung rein theoretisch das Potential hätten NaCl in ausgewählten Bereichen zu ersetzen, obwohl sie in diesem Projekt nur als Referenzmittel angeführt werden.

Aspekte wie Umweltverträglichkeit, Aufbringbarkeit oder Kosten werden in all den eben genannten Aussagen nicht berücksichtigt.

## 6.5 Monetäre Tauleistung

Unter monetärer Tauleistung versteht man die Tauleistung unter gleichzeitiger Berücksichtigung der benötigten Streumittelmenge zur Erreichung eines vorgegebenen Tauziels und der Kosten des verwendeten Taumittels.

$$TL_{\epsilon,i}(t) = \frac{TM_i(t)}{P_{TM,i}} \quad (11)$$

$TL_{\epsilon,i}$  Geldmittel zur Erreichung eines Tauziels in Abhängigkeit der Tauleistung und Einwirkdauer [€]

$TM_i(t)$  benötigte Taumittelmenge zur Erreichung eines Tauzieles in Abhängigkeit der Einwirkdauer [g]

$P_{TM,i}$  Einheitspreis des verwendeten Taumittels [€/g]

Je geringer der benötigte Geldbetrag ausfällt desto besser ist das Taumittel hinsichtlich der monetären Tauleistung zu bewerten [10].

Die MA 48 kann aus Datenschutzgründen keine aktuellen Preise für die einzelnen Taumittel zu Verfügung stellen, um laufende Ausschreibungen nicht zu beeinflussen. Das Preisverhältnis zwischen Natriumchlorid und allen anderen Taumitteln, beim Einkauf von einer Tonne, liegt ungefähr bei 1:15 [36].

Im Zuge der Recherche konnten folgende, überschlagsmäßige Kosten ermittelt werden.

- ◆ Natriumchlorid: 80-90 €/Tonne (Stand 2015) [15]
- ◆ Kaliumcarbonat 300-350 €/Tonne (Stand 2015) [15]

Für einen Vergleich der monetären Tauleistung sind nur die Streumittel Natriumchlorid, Kaliumcarbonat, Viaform und das Auftaumittel 49 % 1:1 von Interesse. Für einen überschlagsmäßigen Vergleich werden die Mittelwerte der eben angeführten Preise gebildet und der von der MA 48 bekanntgegebene Multiplikationsfaktor zur Schätzung der Preise für Viaform und des Auftaumittels 49 % 1:1 berücksichtigt. Es ergeben sich folgende, zur Vergleichbarkeitszwecken angenommene Preise:

- ◆ Natriumchlorid: 85 €/Tonne
- ◆ Kaliumcarbonat: 325 €/Tonne
- ◆ Viaform: 1275 €/Tonne
- ◆ Auftaumittel 49 % 1:1: 1275 €/Tonne

### 6.5.1 Exemplarisches Beispiel

Man gehe davon aus, es soll bei einer Temperatur von -2,5°C, -5°C und -10°C in 120 Minuten 50 g Eis geschmolzen werden. Die dafür benötigte Taumittelmenge je Taumittel werden berechnet und die Kosten gegenübergestellt:

Tabelle 24 Monetäre Tauleistung

Temperatur [°C]	Taumittel	Tauleistung [g/g]	Taumittelmenge [g/100g Eis]	Kaufpreis [€/Tonne]	Kosten [€/100g Eis]
-2,5	Natriumchlorid	1,13	44,33	85,00	3,77
	Kaliumcarbonat	1,58	31,65	325,00	10,29
	Viaform	2,38	20,98	1275,00	26,75
	Auftaumittel 49% 1:1	2,05	24,43	1275,00	31,15
-5	Natriumchlorid	0,98	50,85	85,00	4,32
	Kaliumcarbonat	1,58	31,68	325,00	10,29
	Viaform	1,82	27,53	1275,00	35,11
	Auftaumittel 49% 1:1	1,42	35,29	1275,00	44,99
-10	Natriumchlorid	0,25	200,54	85,00	17,05
	Kaliumcarbonat	0,83	60,05	325,00	19,52
	Viaform	1,11	44,84	1275,00	57,18
	Auftaumittel 49% 1:1	1,09	45,69	1275,00	58,25

Tabelle 24 zeigt, dass um die gleiche Menge Eis zu tauen, bei Viaform und dem Auftaumittel eine viel geringere Taumittelmenge notwendig ist als bei Natriumchlorid (oder Kaliumcarbonat). Trotzdem sind die Kosten bei weitem höher als für Natriumchlorid. Folglich sollten Viaform und das Auftaumittel 49 % 1:1 sehr sparsam und nur an Stellen, an denen es unbedingt notwendig ist, eingesetzt werden, da sonst die Wirtschaftlichkeit sinkt. Des Weiteren bestätigt Tabelle 24 die aus der Literatur bereits bekannte Annahme, dass NaCl bis zu einer Temperatur von -5°C sehr gut wirtschaftlich einsetzbar ist. Bei tieferen Temperaturen ist eine weitaus größere Taumittelmenge nötig um die gleiche Menge Eis zu tauen. Die Kosten steigen demzufolge unverhältnismäßig schnell an.

## 6.6 Referenzstudie für Natriumchlorid

Auch die ermittelten Tauleistungen und Tauraten dieses Projekts werden mit [10], *Eignungskriterien für auftauende Streumittel*, verglichen. Die Vergleichbarkeit ist aber insofern eingeschränkt, als dass weder die gleichen Solekonzentrationen, noch die gleichen Temperaturniveaus, noch die gleichen Einwirkungszeiten getestet wurden. Es können somit nur die Werte für -2,5°C und -5°C verglichen werden. Da kältere Witterungsverhältnisse in Wien ohnedies eher selten der Fall sind, sind diese beiden Temperaturniveaus für eine gute Vergleichbarkeit ausreichend. Da in der bereits vorhandenen Studie Solekonzentrationen von 20 % und 24 % untersucht wurden (Tabelle 26), und die für dieses Projekt von der MA 48 zu Verfügung gestellte Sole eine Konzentration von 22 % hat (Tabelle 25), sollten die durch Kurven linear genäherten Werte genau zwischen denen des Referenzprojektes liegen.

Tabelle 25 Tauleistung und Taurate Natriumchlorid

		Diese Studie			
		Tauleistung		Taurate	
Konzentration [%]	Einwirkungsdauer [min]	-5°C [g/g]	-2,5°C [g/g]	-5°C [g/g/min]	-2,5°C [g/g/min]
22 %	2	0,104	0,148	0,052	0,074
	10	0,273	0,337	0,027	0,034
	30	0,409	0,607	0,014	0,020
	60	0,621	0,927	0,010	0,015
	120	0,983	1,128	0,008	0,009
	240	1,001	1,410	0,004	0,006

Tabelle 26 Tauleistung und Taurate Natriumchlorid der Referenzstudie

Referenzprojekt (Tauleistung und Taurate übernommen)					
Konzentration [%]	Einwirkungsdauer [min]	Tauleistung		Taurate	
		-5°C [g/g]	-2,5°C [g/g]	-5°C [g/g/min]	-2,5°C [g/g/min]
20 %	5	0,100	0,200	0,019	0,027
	30	0,400	0,500	0,005	0,008
	240	0,600	1,100	0,000	0,002
24 %	5	0,200	0,300	0,028	0,035
	30	0,600	0,800	0,008	0,012
	240	1,100	1,600	0,001	0,002

Betrachtet man die Tauleistung, ist dies auch annähernd der Fall. In Hinblick auf die Taurate weist die Funktion der 22%igen Lösung entgegen der Erwartung die höchsten Werte auf, und liegt nicht wie anzunehmen in der Mitte. Daraufhin wurde die Taurate des Referenzprojektes nachgerechnet, indem die Tauleistung durch die angegebene Einwirkungszeit dividiert wurde. Es ergeben sich demnach folgende Werte, die im Falle einer Abweichung größer 0,01 g/g/min rot markiert sind, Abweichungen zwischen 0,00-0,01 g/g/min sind blau, Übereinstimmungen grün (Tabelle 27):

Tabelle 27 Tauleistung und berechnete Taurate der Referenzstudie

Referenzprojekt (Tauleistung übernommen / Taurate berechnet)					
Konzentration [%]	Einwirkungsdauer [min]	Tauleistung		Taurate	
		-5°C [g/g]	-2,5°C [g/g]	-5°C [g/g/min]	-2,5°C [g/g/min]
20 %	5	0,100	0,200	0,020	0,040
	30	0,400	0,500	0,013	0,017
	240	0,600	1,100	0,003	0,005
24 %	5	0,200	0,300	0,040	0,060
	30	0,600	0,800	0,020	0,027
	240	1,100	1,600	0,005	0,007

Da diese Vorgehensweise jedenfalls laut Definition der Taurate korrekt ist, beziehen sich die folgenden Grafiken, Abbildung 38 bis Abbildung 41, auf die Ergebnisse aus Tabelle 25 und Tabelle 27.

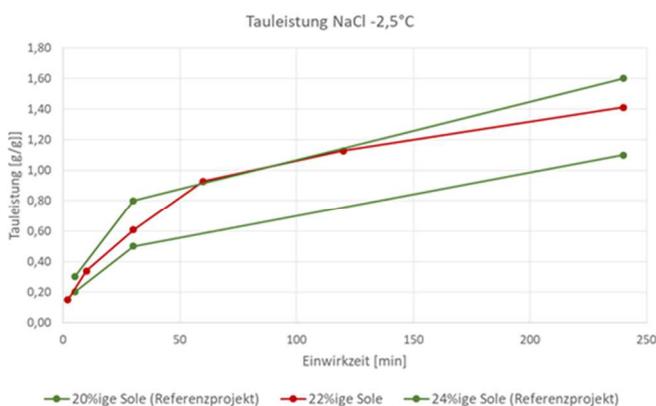


Abbildung 38 Referenzstudienvergleich: Tauleistung NaCl -2,5°C

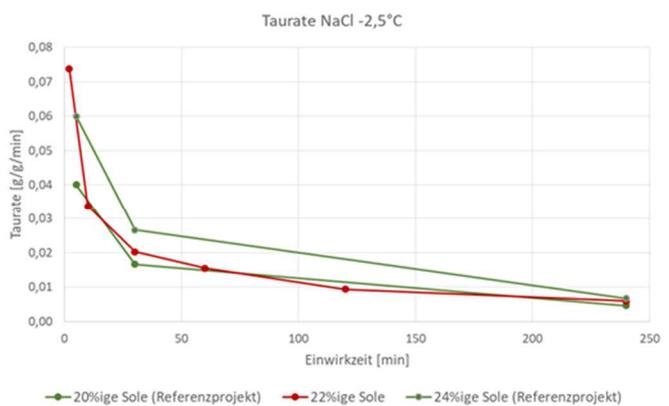
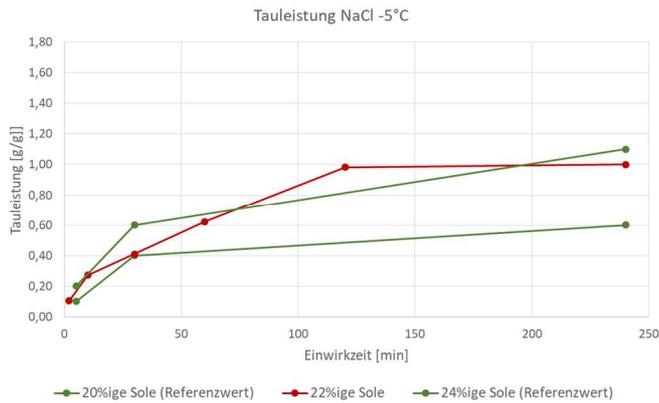
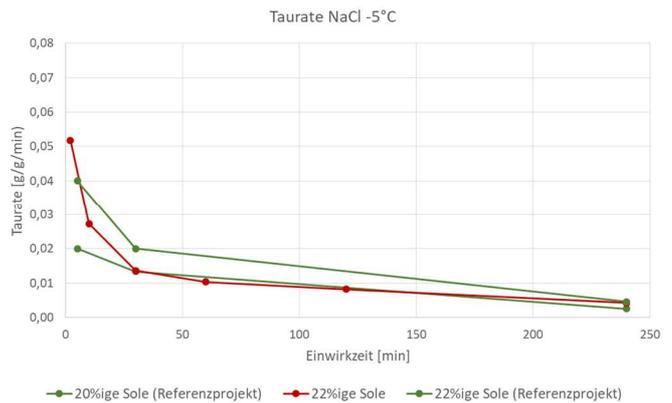


Abbildung 39 Referenzstudienvergleich: Taurate NaCl -2,5°C



**Abbildung 40 Referenzstudienvergleich:  
Taufleistung NaCl -5°C**



**Abbildung 41 Referenzstudienvergleich:  
Taurate NaCl -5°C**

Die Ergebnisse dieser Arbeit liegen, wie in der ursprünglichen Annahme vermutet, zwischen jenen des Referenzprojektes. Das gilt sowohl für ein Temperaturniveau von  $-2,5^{\circ}\text{C}$  als auch für  $-5^{\circ}\text{C}$ . Demnach sind die Ergebnisse für Natriumchlorid nicht nur wie in Kapitel 5.5 bereits festgestellt in Hinblick auf die Gefrierpunkte, sondern auch in Bezug auf die Taufleistung bzw. Taurate plausibel [10].

## 7 Griffigkeitsversuche

### 7.1 Allgemein

Die Griffigkeit einer Oberfläche definiert sich durch den Reibungsbeiwert  $\mu$ , der sich aus dem Verhältnis der Horizontal- zu den Vertikalkräften ergibt.

$$\mu = \frac{F_h}{F_v} \quad (12)$$

Die Griffigkeit ist also von der Anpresskraft abhängig und beschreibt die übertragbaren Reibungskräfte in horizontaler Richtung zwischen der Fahrbahnoberfläche und dem Fahrzeugreifen. Sie ist für die maximale Kurvengeschwindigkeit und den Bremsweg von entscheidender Bedeutung.

Generell hängt die Griffigkeit von folgenden Faktoren ab:

- ◆ Fahrbahntextur
- ◆ Verunreinigungen auf der Fahrbahnoberfläche
- ◆ Reifentyp, Reifenprofil und Reifendruck
- ◆ Witterungsverhältnisse

Besonders die vorherrschenden Witterungsverhältnisse haben erheblichen Einfluss auf die Fahrbahngriffigkeit. Prinzipiell ist die Griffigkeit relativ konstant. Feuchte, Regen, Schnee und Eis können die Griffigkeit innerhalb kurzer Zeit stark reduzieren [8].

Füllt sich das Fahrprofil mit Schnee oder Eis geht nach und nach die Griffigkeit verloren. Dementsprechend reduzieren sich auch die Reibungsbeiwerte. Während bei einer nassen Fahrbahn der Reibbeiwert  $\mu$  noch zwischen  $\mu=0,4$  und  $\mu=0,8$  liegt, reduziert er sich bei Schneefahrbahn auf  $\mu=0,1$ , bei Eis sogar bis auf  $\mu=0,05$ . Durch das Aufbringen eines Taumittels soll sowohl Schneeglätte als auch Eisglätte vermieden und  $\mu$  möglichst hoch gehalten werden, indem das Straßenprofil erhalten bleibt.

Bei der Verwendung von Taumitteln ist aber darauf zu achten, dass die Fahrbahngriffigkeit auch durch die Taumittel selbst herabgesetzt werden kann, da sich schmierige Schichten bilden [15].

Um die Auswirkung des aufgebracht Taumittels in Hinblick auf die Änderung der Fahrbahngriffigkeit zu messen, werden Griffigkeitsversuche mit dem Grip Tester auf einem Probegelande der MA 48 durchgeführt.

### 7.2 Versuchsablauf

Entweder erfolgen die Messungen im Schiebetrieb bei Schrittgeschwindigkeit oder im Zugbetrieb, welcher bei diesen Versuchen angewendet wird. Dazu wird ein Dreiradanhänger an einen PKW-Bus oder ein anderes, entsprechend ausgerüstetes Fahrzeug angehängt (Abbildung 42) und mit einem Computer verbunden. Ein auf und ab bewegbares Messrad zeichnet die  $\mu$ -Werte entlang der Messstrecke auf und gibt sie an den Computer weiter, sodass die Daten ausgewertet werden können. Es ist darauf zu achten, dass das Messrad bei Fahrten im Trockenen immer angehoben ist, da der Verschleiß sonst zu hoch wäre, und nur bei den Messungen immer in Kontakt mit der Fahrbahn steht. Die Regelung erfolgt mittels Zuggabel und Wheelift. Sollten trockenen Fahrbahnbedingungen vorherrschen, muss auch das Beschleunigungsstück vorgehängt oder mit Sole beaufschlagt werden, um das Messrad des Grip Testers zu schonen. Üblicherweise wird bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h oder 60 km/h gemessen, höhere Geschwindigkeiten sind möglich, die 40 km/h sollten allerdings nicht unterschritten werden. Ist diese Geschwindigkeit, beispielsweise auf Grund der Platzverhältnisse nicht erreichbar, ist der Schiebetrieb dem Zugbetrieb vorzuziehen [20].



Abbildung 42 Grip Tester

Die Messstrecke am Gelände der MA 48 erstreckt sich circa über eine Länge von 75 Metern und verläuft annähernd gerade. Der darüber hinaus benötigte Vorlaufbereich zum Anfahren und der Nachlaufbereich zum Bremsen sind zusätzlich zur Messstreckenlänge vorhanden. Nach jedem Meter misst der Grip Tester den Reibungsbeiwert und zeichnet ihn auf. Die Messung startet beim Erreichen einer Geschwindigkeit von 40 km/h (der Beginn der Messstrecke wurde entsprechend positioniert) und endet am Ende der markierten Messstrecke.

Der Tank des Streufahrzeuges wird mit dem entsprechenden Auftaumittel gefüllt. Für die Aufbringung der Natriumchloridsole wird ein konventionelles Streufahrzeug, für alle anderen ein Kleintraktor mit Solesprühanlage verwendet (Abbildung 43). Das Streumittel wird mit einer Intensität von 40 g/m<sup>2</sup> auf der Messstrecke aufgebracht, direkt danach wird drei Mal mit dem Grip Tester gemessen (Abbildung 44). Danach erfolgt eine zweite Streufahrt, ebenfalls mit einer Intensität von 40 g/m<sup>2</sup>, und drei weiteren Messungen. Diese Prozedere wird für alle Streumittel in der gleichen Weise durchgeführt.



Abbildung 43 Streufahrzeuge



Abbildung 44 Griptester Messfahrt

Es ergibt sich somit eine sehr große Zahl an Messwerten. Alle aufgezeichneten Griffigkeitswerte, die innerhalb der drei Messungen mit gleichen Bedingungen durchgeführt wurden, werden gemittelt und die Standardabweichung bestimmt. Mit diesem Vorgehen kann die zu erwartende Fahrbahngriffigkeit sehr gut und genau abgeschätzt werden, da eventuelle Ausreißer nicht so stark ins Gewicht fallen, aber durch die Standardabweichung berücksichtigt und angezeigt werden.

### 7.3 Prüfprogramm

Folgende Auftaumittel werden auf der Fahrbahn getestet: Natriumchlorid, Viaform und die Lösung aus Kaliumcarbonat und Kaliumformiat, also das Auftaumittel 49 % 1:1. Ursprünglich waren auch Griffigkeitsmessungen mit Kaliumcarbonat geplant. Auf Grund technischer Probleme bei der Soleherstellung konnte Kaliumcarbonat nicht getestet werden.

Die anderen drei Taumittel werden an zwei verschiedenen Tagen mit unterschiedlichen Witterungsbedingungen getestet. Am ersten Tag, an dem alle drei Mittel getestet werden, liegt die Temperatur bei rund  $+10^{\circ}\text{C}$  die Fahrbahnverhältnisse sind trocken, wohingegen am zweiten Testtag, lediglich eine Temperatur von  $+3^{\circ}\text{C}$  gemessen wird und nach einem nächtlichen Regen die Fahrbahnoberfläche durchgehend feucht bis nass ist. Am zweiten Tag wird Natriumchlorid nicht nochmals getestet, dafür werden zusätzlich Nullmessungen auf feuchter Fahrbahn ohne Streumittel durchgeführt. Für eine höchstmögliche Vergleichbarkeit der Streumittel bei unterschiedlichen Witterungsverhältnissen an den beiden Tagen wird darauf geachtet, am zweiten Testtag die Streumittel in derselben Spur aufzubringen wie am Vortag.

Darüber hinaus wird das Auftaumittel 49 % 1:1 auch über  $\text{NaCl}$  aufgebracht, da die MA 48 in Vergangenheit die Erfahrung gemacht hat, dass es bei Überlagerung der beiden Streumittel zu einer glitschigen Fahrbahnoberfläche kommen kann.

Für alle Versuche wird nach jedem Aufbringen des Streumittels drei Mal mit dem Grip Tester gemessen. Bei der Doppelbeaufschlagung mit Natriumchlorid und dem Auftaumittel erfolgen lediglich zwei Messungen nach jeder Streufahrt.

Tabelle 28 Prüfprogramm Grip Tester

Streumittel	Fahrbahnverhältnisse	Streumenge [g/m <sup>2</sup> ]	Anzahl d. Messfahrten
Nullmessung	nass	-	3
Natriumchlorid	trocken	40	3
		80	3
Auftaumittel 49 % 1:1	trocken	40	3
		80	3
	nass	40	3
		80	3
Viaform	trocken	40	3
		80	3
	nass	40	3
80		3	
Natriumchlorid+ Auftaumittel 49 % 1:1	trocken	80+40	2
		80+80	2

## 7.4 Ergebnisse

Als erstes werden die Ergebnisse der Nullmessung dargestellt (Abbildung 45):

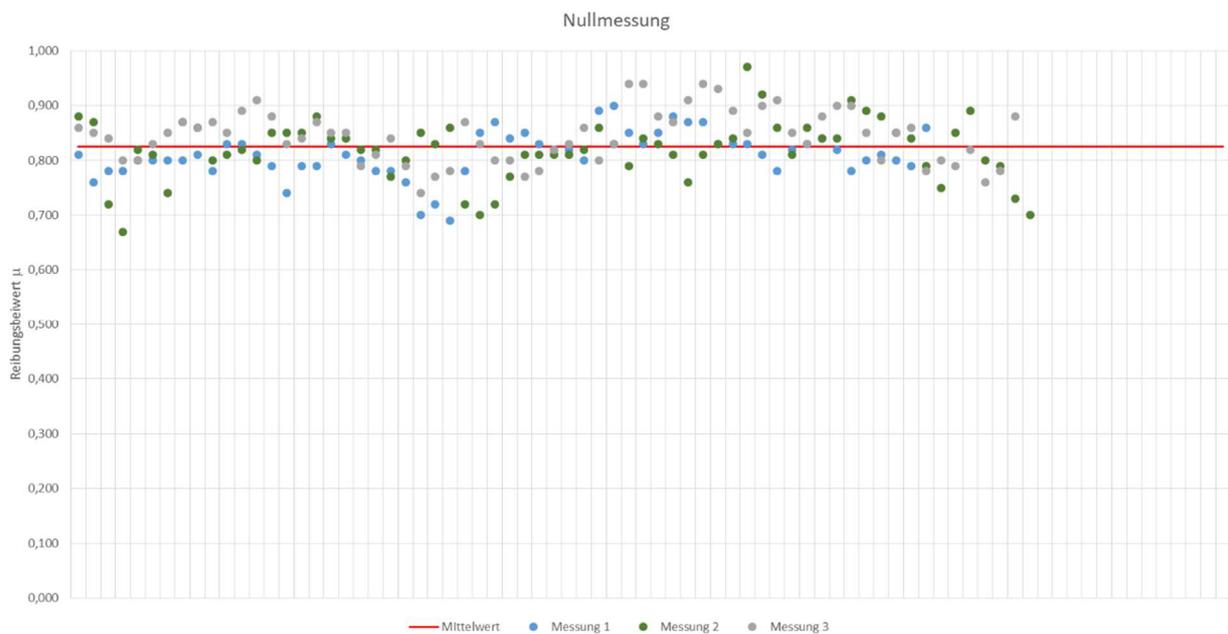


Abbildung 45 Nullmessung Grip Tester

Bei nassen Fahrbahnverhältnissen, welche vorwiegend durch Niederschlag entstehen und eine alltägliche Situation sind, liegt eine Griffbarkeit von  $\mu=0,825$  vor. Dieser Wert bildet einen guten Vergleichswert für die verschiedenen Taumittel.

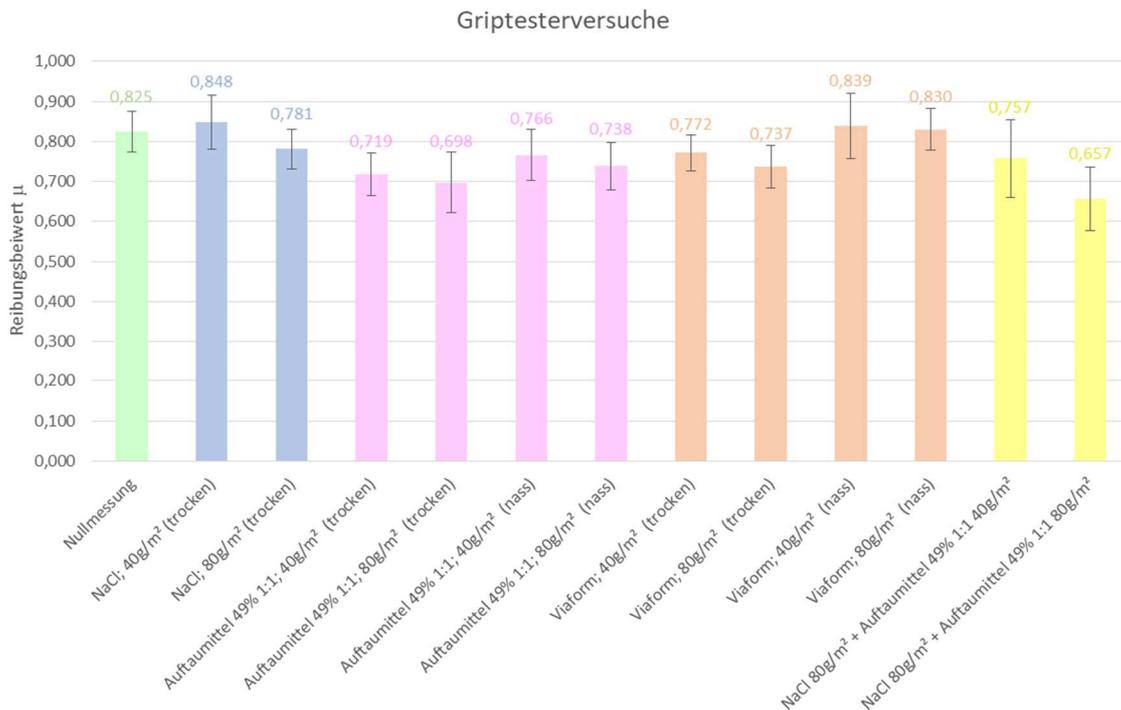


Abbildung 46 Grip Tester Messungen

Abbildung 46 bildet die Ergebnisse aller Griffigkeitsmessungen ab. Die Griffigkeitswerte auf nasser Fahrbahn sind höher als auf trockener. Dieses Phänomen resultiert aus folgender Annahme: Nicht das Wasser sondern die in der Sole gelösten Teilchen reduzieren die Griffigkeit. Ist die Fahrbahn nun nass, ist mehr Wasser vorhanden. Durch das auf der Fahrbahn vorhandene Wasser erfolgt eine Verdünnung der Sole beim Aufbringen und die Wirkung der Teilchen zur Minderung der Griffigkeit wird geschwächt. Auf trockener Fahrbahn verursacht NaCl, im Gegensatz zu den anderen Lösungen, einen deutlich geringeren Abfall der Griffigkeit. Nach dem Aufspritzen von 40 g/m<sup>2</sup> liegen sogar höhere Griffigkeitswerte als auf nasser Fahrbahn vor. Nach doppelter Beaufschlagung der Fahrbahn mit NaCl-Sole (80 g/m<sup>2</sup>) liegt die Griffigkeit mit  $\mu=0,781$  über jenen Werten der anderen Taumittel bei Einfachbeaufschlagung (40 g/m<sup>2</sup>).

Viaform hat im Vergleich zum Aufbaumittel 49 % 1:1 sowohl bei trockener als auch bei nasser Fahrbahn höhere Griffigkeitswerte.

Zusätzlich wird wie bereits erwähnt in einer weiteren Versuchsreihe über NaCl das Aufbaumittel 49 % 1:1 aufgebracht. Über die 80g/m<sup>2</sup> NaCl-Sole werden 40 g/m<sup>2</sup> Aufbaumittel 49 % 1:1 aufgebracht, zweimal mit dem Grip Tester gemessen, wiederum 40 g/m<sup>2</sup> aufgebracht und noch zweimal gemessen. Man sieht einen deutlichen Abfall der Griffigkeit im Vergleich zu allen anderen Messungen. Das liegt vor allem daran, dass sich eine größere Menge an Streumittel auf der Fahrbahnoberfläche befindet als bei den anderen Messungen, da ja über das bereits aufgebrachte NaCl eine beziehungsweise in weiterer Folge eine zweite Schicht Aufbaumittel 49 % 1:1 aufgebracht wurde, und somit die Gesamtstreumenge, nicht wie bei allen anderen Versuchen bei 40 g/m<sup>2</sup> und 80 g/m<sup>2</sup> sondern bei 120 g/m<sup>2</sup> und 160 g/m<sup>2</sup> liegt.

Des Weiteren bestätigt sich die Annahme der MA 48, dass sich eine schmierige Schicht durch die Vermischung der beiden Tausubstanzen bildet. Die Schicht kann zwar nicht explizit nachgewiesen werden, der Nachweis ist aber nicht zwingend nötig, da lediglich die Tatsache, ob sich die Griffigkeit beim Übereinanderaufbringen der beiden Taumittel reduziert, festzustellen war. Ein Übereinanderaufbringen sollte demnach vermieden werden.

## 7.5 Schlussfolgerung

Für die Bewertung der Griffigkeit wurden folgende Annahmen geschätzt:

**Tabelle 29 Griffigkeitsbewertung**

Griffigkeit	$\mu$
Sehr hoch	1,0 - 0,7
Hoch	0,6 - 0,7
Mittel	0,6 - 0,4
Gering	0,4 - 0,2
Sehr Gering	0,2 - 0,0

Somit liegen alle Taumittel, selbst bei einer Streumenge von 80 g/m<sup>2</sup>, im Bereich „Sehr hohe Griffigkeit“ und stellen somit kein Problem für die Verkehrssicherheit dar. Der Wert des Auftaumittels 49 % 1:1 auf trockener Fahrbahn und einer Streumenge von 80g/m<sup>2</sup> liegt sehr knapp darunter, der Fehlbetrag ist allerdings vernachlässigbar klein.

Wie bereits im vorangegangenen Punkt erwähnt reduziert sich die Griffigkeit beim Über-einanderbringen von NaCl und dem Auftaumittel 49 % 1:1 stärker als in den anderen Fällen und sollte somit vermieden werden. Da das Auftaumittel 49 % 1:1 in erster Linie für Gebiete, in denen kein Natriumchlorid gestreut werden darf, eingesetzt werden soll und nicht in Kombination mit NaCl, ist die Wahrscheinlichkeit des Eintritts dieses Szenarios in der Realität ohnedies gering.

Soll nun unter alleiniger Berücksichtigung der Griffigkeitsverluste eine Auswahl eines alternativen Streumittels getroffen werden, ist Viaform dem Auftaumittel vorzuziehen. In Abbildung 46 ist zu erkennen, dass die Griffigkeit durch Viaform weniger beeinflusst wird als durch das Auftaumittel. Dies gilt sowohl für trockene als auch für nasse Fahrbahnverhältnisse. Auch sind bis dato keine negativen Reaktionen von Viaform beim Inkontaktkommen mit anderen Streusubstanzen bekannt.

Es sei jedoch ergänzend angemerkt, dass auf Basis der Griffigkeitsversuche die alternative Anwendung des Auftaumittels nicht ausgeschlossen ist, da auch diese Ergebnisse in einem guten Bereich liegen.

**Tabelle 30 Ergebnisse Grip Tester**

Streumittel	Fahrbahnverhältnisse	Streumenge [g/m <sup>2</sup> ]	$\mu$	Bewertung
Nullmessung	nass	-	0,825	Sehr hoch
Natriumchlorid	trocken	40	0,848	Sehr hoch
		80	0,781	Sehr hoch
Auftaumittel 49 % 1:1	trocken	40	0,719	Sehr hoch
		80	0,698	Hoch
	nass	40	0,776	Sehr hoch
		80	0,738	Sehr hoch
Viaform	trocken	40	0,772	Sehr hoch
		80	0,737	Sehr hoch
	nass	40	0,839	Sehr hoch
		80	0,830	Sehr hoch
Natriumchlorid+ Auftaumittel 49 % 1:1	trocken	80+40	0,757	Sehr hoch
		80+80	0,657	Hoch

## 8 Abschließende Bewertung

Unter Berücksichtigung von Gefrierpunkt, Tauleistung, Griffigkeitsverluste, Kosten und Umweltauswirkung kann nun eine abschließende Bewertung aufgestellt werden.

Wie bereits am Anfang der Studie erwähnt, wird zur Zeit in größerem Umfang Natriumchlorid im Straßenwinterdienst von Wien als auftauendes Streumittel gestreut. In Zonen, in denen es aus umweltschutztechnischen Gründen nicht möglich ist, wird Kaliumcarbonat zur Glättevermeidung angewandt. Ziel der MA 48 ist es, Kaliumcarbonat wirksam zu ersetzen. Durch einen einfachen Scheibenentfroster, hierbei handelt es sich um das Enteisungsmittel, oder den Alkohol Propylenglykol soll dies wie anfangs festgestellt, nicht gestehen. Es handelt sich lediglich um Referenzwerte.

Als mögliche Alternative bleiben somit Viaform und das Auftaumittel 49 % 1:1, deren Ergebnisse aus der gesamten Studie nun gegenübergestellt werden.

Gleich am Anfang des Vergleiches sei vermerkt, dass es nicht zielführend ist, die beiden Auftaumittel hinsichtlich ihres Gefrierpunktes zu vergleichen, da beide Lösungen bis zu einem Temperaturniveau von -40°C nicht einfrieren und somit gleichwertig sind. Auch ein Kostenvergleich ist in diesem Fall nicht zweckmäßig, da keine genauen Angaben über die Preise vorliegen und sie laut MA 48 ungefähr auf dem gleichen Niveau liegen. Als Entscheidungsgrundlage werden somit Tauleistung, Griffigkeit und Umweltauswirkungen herangezogen.

Tabelle 31 vergleicht die Tauleistung der beiden Streumittel anhand der getauten Menge Eis in Gramm pro aufgebrachtem Streumittel, ebenfalls in Gramm.

**Tabelle 31 Vergleich: Tauleistung Viaform / Auftaumittel 49 % 1:1**

Einwirkungsdauer [min]	-2,5°C [g/g]			-5°C [g/g]			-10°C [g/g]		
	Viaform	Auftaumittel	Verhältnis	Viaform	Auftaumittel	Verhältnis	Viaform	Auftaumittel	Verhältnis
2	0,390	0,383	+1,64 %	0,300	0,284	+5,68 %	0,217	0,162	+33,97 %
10	0,761	0,639	+19,06 %	0,633	0,557	+13,64 %	0,424	0,345	+23,05 %
30	1,167	1,037	+12,46 %	1,051	0,937	+12,18 %	0,821	0,804	+2,13 %
60	1,911	1,469	+30,07 %	1,697	1,392	+21,88 %	1,080	0,934	+15,62 %
120	2,383	2,047	+16,43 %	1,816	1,417	+28,15 %	1,115	1,094	+1,88 %
240	2,876	2,230	+28,97 %	2,477	1,925	+28,65 %	1,178	1,301	-9,48 %

Bei jedem Temperaturniveau und jeder Einwirkungsdauer zeigt Viaform eine größere Tauleistung im Ausmaß von 1%-30%. Lediglich bei einer Temperatur von -10°C und einer Einwirkungsdauer von 240 min übersteigt die Tauleistung des Auftaumittels jene von Viaform. Die Standardabweichung der einzelnen Werte wird hier nicht erneut angeführt, es wird auf Kapitel 6.4.3 und Kapitel 6.4.4 verwiesen. Da sich die Standardabweichung in einem annehmbaren Bereich befindet, haben die Werte in Tabelle 31 hinreichende Aussagekraft und sprechen für eine Bevorzugung von Viaform gegenüber dem Auftaumittel 49 % 1:1.

**Tabelle 32 Grip Tester Viaform / Auftaumittel 49 % 1:1**

Bedingungen	Viaform	Auftaumittel	Verhältnis
40 g/m <sup>2</sup> trocken	0,772	0,719	+7,39 %
80 g/m <sup>2</sup> trocken	0,737	0,698	+5,66 %
40 g/m <sup>2</sup> nass	0,839	0,766	+9,52 %
80 g/m <sup>2</sup> nass	0,830	0,738	+12,37 %

Auch in Hinblick auf die Griffigkeit überzeugt Viaform (siehe dazu Tabelle 32). Egal bei welchen Witterungsverhältnissen und bei welchem Streumittel, Viaform reduziert die Fahrbahngriffigkeit, beschrieben durch den Reibungsbeiwert  $\mu$ , weniger als das Auftaumittel.

In Tabelle 33 werden abschließend die Umweltauswirkungen unter Berücksichtigung der Ökotoxizität, Persistenz, Abbaubarkeit, Bioakkumulationspotenzial, Mobilität im Boden und den PBT- sowie vPvB-Beurteilungen gegenübergestellt. Folgende Begriffe werden daher vorher definiert:

- ◆ Ökotoxizität: Auswirkung auf die Mortalität im Ökosystem
- ◆ Persistenz: Beständigkeit gegenüber chemischem, physikalischem und biologischem Abbau
- ◆ Bioakkumulationspotential: Aufspeicherung einer Substanz in einen Organismus durch den Eintrag aus der Umgebung
- ◆ Mobilität im Boden: Verbreitungspotenzial und Versickerungspotenzial ins Grundwasser
- ◆ PBT-Beurteilung: Komponenten die als persistent, bioakkumulierbar und toxisch bewertet werden
- ◆ vPvB-Beurteilung: Komponenten die als sehr persistent und sehr bioakkumulierbar bewertet werden

Tabelle 33 Umweltauswirkungen Viaform 7 Auftaumittel 49 % 1:1

Wirkung	Viaform	Auftaumittel
Ökotoxizität	Keine	Toxisch für Fische, Daphnien und andere wirbellose Wassertiere
Persistenz, Abbaubarkeit	Keine umweltgefährlichen Stoffe; Leicht biologisch abbaubar	Anorganisch → nicht biologisch abbaubar
Bioakkumulationspotenzial	Keine	Keine
Mobilität im Boden	Keine Daten verfügbar	Wasserlöslich; In der Luft nicht flüchtig
PBT- und vPvB-Beurteilung	Keine Daten verfügbar	Max. Konzentration dieser Stoffe liegt bei 0,1%
Andere schädliche Wirkungen	Keine Daten verfügbar	Nicht in Kanalisation und Oberflächengewässer bringen; Eindringen in Untergrund vermeiden; pH-Verschiebung → schädlich für Wasserorganismen

Die Auflistung zeigt, dass vom Auftaumittel 49 % 1:1 mehr und größerer Gefahren für die Umwelt ausgehen. Das Auftaumittel hat nicht nur einen Einfluss auf die Toxizität gewisser Lebewesen, sondern ist auf Grund seiner Anorganik auch nicht biologisch abbaubar. Darüber hinaus sind PBT- sowie vPvB-Stoffe, wenn auch nur in sehr kleinen Mengen, enthalten. Auf dieser Basis sollte eine Grundwasser- und Untergrundeinleitung vermieden werden. Viaform hingegen ist leicht biologisch abbaubar, umweltschädliche Auswirkungen sind bis dato nicht bekannt [3], [11].

Anhand der Tauleistung, der Griffigkeitsminderung und der Umweltauswirkungen kann folgender einfacher Schluss gezogen werden: Viaform (Addcon) eignet sich voraussichtlich besser als Taumittel als das Auftaumittel 49 % 1:1 der Firma Brenntag.

Um die Eignung von Viaform als Ersatz zu Kaliumcarbonat sicherzustellen, werden auch die Eigenschaften dieser beiden Taumittel verglichen:

**Tabelle 34 Vergleich: Tauleistung Viaform / Kaliumcarbonat**

Einwirkungsdauer [min]	-2,5°C [g/g]			-5°C [g/g]			-10°C [g/g]		
	Viaform	Kaliumcarbonat	Verhältnis	Viaform	Kaliumcarbonat	Verhältnis	Viaform	Kaliumcarbonat	Verhältnis
2	0,390	0,190	+104,68 %	0,300	0,121	+148,92 %	0,217	0,029	+657,58 %
10	0,761	0,421	+80,51 %	0,633	0,375	+68,74 %	0,424	0,210	+102,07 %
30	1,167	0,788	+47,98 %	1,051	0,647	+62,47 %	0,821	0,447	+83,93 %
60	1,911	1,139	+67,77 %	1,697	1,001	+69,58 %	1,080	0,637	+69,69 %
120	2,383	1,580	+50,87 %	1,816	1,579	+15,04 %	1,115	0,833	+33,90 %
240	2,876	1,834	+56,88 %	2,477	1,832	+35,19 %	1,178	0,850	+38,51 %

Tabelle 34 zeigt, dass die Tauleistung von Viaform mehr als nur ausreichend ist um Kaliumcarbonat zu substituieren, vielmehr eignet sich Viaform auf Grund der Leistungsfähigkeit deutlich besser als Kaliumcarbonat für den Winterdienst. Die deutlich bessere Tauleistung resultiert unter anderem aus dem Unterschied in den Gefrierverläufen. Bei Kaliumcarbonat liegt der Gefrierpunkt bei ~-25°C wohingegen Viaform bis zu Temperaturen von -40°C keine Anzeichen einer Eisbildung aufweist. Dadurch kann es nicht nur im Tieftemperaturbereich besser eingesetzt werden, sondern wirkt bei Temperaturen um den Nullpunkt effizienter und schneller.

Hinsichtlich der Griffbarkeit können die beiden Substanzen nicht verglichen werden, da mit K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> keine Grip Tester Versuche durchgeführt wurden. Eigentlich waren die Grip Tester Versuche mit Kaliumcarbonat geplant, da sich Löslichkeitsprobleme beim Anmischen der K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>-Sole ergeben haben, konnten sie nicht durchgeführt werden. Es konnte jedoch folgende Erkenntnis gewonnen werden: Es wäre weitaus günstiger Viaform anstelle von Kaliumcarbonat einzusetzen da es nicht eigens angemischt werden muss, der Arbeitsaufwand somit geringer ist, und auch nicht verklumpen und somit auch nicht die Düsen der Streufahrzeuge verstopfen kann.

Ein kostentechnischer Vergleich ist nicht zweckmäßig, da keine genauen Preisangaben vorliegen. Zusammenfassend ist anhand dieser kurzen Gegenüberstellung jedenfalls ersichtlich, dass Kaliumcarbonat ohne Probleme durch Viaform abgelöst werden kann. Der Umstieg wäre auf Basis der Ergebnisse dieser Studie sogar empfehlenswert.

## 9 Zusammenfassung

Die vorangegangenen 8 Kapitel beschäftigen sich mit der Suche eines alternativen Streumittels als Ersatz für Kaliumcarbonat für Gebiete in Wien, in denen ein Einsatz von Natriumchlorid aus umweltschutztechnischen Gründen laut RVS 12.04.12, RVS 12.04.16 und der Winterdienstverordnung Wien nicht zulässig ist.

Um die bestmögliche Alternative zu finden, wurden im Anschluss an eine ausführliche Recherche, eine Vielzahl an Versuchen mit sechs ausgewählten Streumitteln durchgeführt. Im Fokus der Betrachtung standen „Viaform“ (Addcon, Deutschland), hierbei handelt es sich um eine Lösung aus 50% Kaliumformiat, und das „Auftaumittel 49 % 1:1“ (Brenntag, Österreich), eine Lösung aus 20-30% Kaliumcarbonat. Die Referenzwerte stellten neben den beiden derzeit verwendeten Auftaumitteln Natriumchlorid und Kaliumcarbonat ein Enteisungsmittel (Winkler, Deutschland) und Propylenglycol. Alle Streumittel wurden im Klimaschrank hinsichtlich Gefrierpunkt und Tauleistung und am Feld auf Griffigkeitsminderung untersucht, und die Ergebnisse verglichen.

Sowohl Viaform als auch das Auftaumittel 49 % 1:1 frieren bei Temperaturen bis zu  $-40^{\circ}\text{C}$  nicht ein. Die genauen Tauleistungsergebnisse für Viaform und die des Auftaumittels 49 % 1:1 können Kapitel 6.4.3 beziehungsweise Kapitel 6.4.4 entnommen werden. Im Vergleich zu den derzeit verwendeten Substanzen Natriumchlorid und Kaliumcarbonat weisen die beiden Alternativen eine weit höhere Tauleistung bei gleichen Temperaturen und Betrachtungszeiträumen auf (siehe Kapitel 6). Auch bei den Griffigkeitsversuchen (Kapitel 7) zeigt sich weder für Viaform noch für das Auftaumittel 49 % 1:1 eine Abminderung der Fahrbahngriffigkeit in einen sicherheitstechnisch bedenklichen Bereich.

Trotz des guten Gefrierverhaltens, der bedeutend besseren Tauleistung und des akzeptablen Griffigkeitsverhaltens ist ein flächendeckender Einsatz, sowohl von Viaform als auch des Auftaumittels 49 % 1:1, aus heutiger Sicht auf Grund der vorherrschenden Preisdifferenz zu Natriumchlorid und Kaliumcarbonat nicht wirtschaftlich vertretbar. Ein punktueller Einsatz in ausgewählten Gebieten wäre jedoch denkbar. Technisch gesehen hat sowohl „Viaform“ als auch das Auftaumittel 49 % 1:1 das Potential, Kaliumcarbonat als Ersatz für Natriumchlorid in Gebieten, in denen keine Natriumchloridstreuung zulässig ist, abzulösen. Müsste die Entscheidung zu Gunsten eines der beiden Mittel getroffen werden, wäre auf Basis der Ergebnisse dieser Studie Viaform als Alternativstreumittel vorzuziehen.

## Literaturverzeichnis

### Literatur:

- [1] **Addcon.** *Brochure Viaform.* Bitterfeld-Wolfen.
- [2] **Blab, Ronald et all..** *FSV-Schriftenreihe 014: Winterdienst Effektive Salz- und Solestreueung.* Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV). 2014
- [3] **Brenntag.** *Sicherheitsdatenblatt Auftaumittel 49 % 1:1.* Wien: 2017.
- [4] **CP Industries.** *Superior SNONICE Melters. Questions and Answers:* Salt Lake City.
- [5] **Dultinger, Josef.** *Straßenwinterdienst.* Rum: Verlag Dr. Rudolf Erhard, 1976.
- [6] **Emberger, Günter.** *Skriptum aus Verkehrsträger und Mobilitätsmanagement.* Wien: TU Wien – Institut für Verkehrswissenschaften, 2019.
- [7] **Hausmann, Günter (Hrsg.).** *Kommunal Handbuch Winterdienst. 3. Auflage.* Lehrte: Beckmann Verlag GmbH & Co. KG. 2019.
- [8] **Hoffmann, Markus; Blab, Roland; Nutz, Peter.** Forschungsbericht. Optimierung der Feutsalzstreueung. Wien: TU Wien – Institut für Verkehrswissenschaften, 2011.
- [9] **Hoffmann, Markus; Nutz, Peter ; Blab, Roland.** Forschungsbericht. Technische und wirtschaftliche Optimierung von Streumitteln und Streustrategien im Winterdienst. Wien: TU Wien – Institut für Verkehrswissenschaften, 2012.
- [10] **Hofko, Bernhard; Steiner, Daniel; Hoffmann, Markus.** *Eignungskriterien für auftauende Streumittel.* Wien: Österreichischer Verkehrssicherheitsfond, 2015.
- [11] **Landor.** *Sicherheitsdatenblatt Viaform liquid.* Bern: 2018.
- [12] **Lautenschläger, Karl-Heinz; Weber, Wolfgang.** *Taschenbuch der Chemie. 22., vollständig überarbeitete Auflage.* Haan-Gruiten: Verlag Europa Lehrmittel, 2018.
- [13] **Leitfaden Winterdienst für Bundes- und Landesstraßen:**  
[http://fs000014.host.inode.at/astrad/ASTRAD2011\\_v32-HOFFMANN.pdf](http://fs000014.host.inode.at/astrad/ASTRAD2011_v32-HOFFMANN.pdf) [Stand: 15.04.2020]
- [14] **Müller, Hans-Joachim (Hrsg.); Hüttl, Helmuth (Hrsg.).** *Kommunaler Winterdienst. 4., neubearbeitete Auflage.* Köln: Deutscher Gemeindeverlag GmbH/Verlag W.Kohlhammer,1996.
- [15] **Nutz, Peter.** *Entwicklung eines Straßenzustandsmodelles beim Einsatz auftauender Streumittel im Winterdienst.* Wien: TU Wien – Institut für Verkehrswissenschaften, 2019.
- [16] **Popper, Alfred (Hrsg.) et all..** *Schneeräumung und Streueung.* Wien: Verlag Österreich. 1998.
- [17] **Rune Lysbakken, Kai.** *Salting of winter Roads. The Quantity of Salt on Road Surfaces after Application.* Trondheim: NTUT – Norwegian University of Science and Technology, 2013.
- [18] **TU Wien.** *Bestimmung der Tauleistung von flüssigen Taumittel.* Wien: TU Wien – Institut für Verkehrswissenschaften, 2015.
- [19] **TU Wien.** *Bestimmung des Gefrierpunktverlaufes von Lösungen in Abhängigkeit der Konzentration.* Wien: TU Wien – Institut für Verkehrswissenschaften, 2015.
- [20] **TU Wien.** *Griffigkeitsmessungen mit dem Grip Tester MK2.* Wien: TU Wien – Institut für Verkehrswissenschaften, 2014.

[21] **Winkler**. *Sicherheitsdatenblatt Scheibenfrostschutz 1 I*. Ulm: 2018.

Rechtsquellen:

[22] **Magistrat der Stadt Wien**. *Winterdienst-Verordnung*. Wien: 2003.

[23] **Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV)**. *RVS 12.04.12 Schneesäumung und Streuung*. 2010.

[24] **Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr FSV**. *RVS 12.04.16 Streumittel*. 2017.

[25] **RIS**: *Allgemeines Bürgerliches Gesetzbuch (AGGB) § 1319a*. 1976.

Web-Quellen:

[26] **Chemielexikon:**

<https://www.chemie.de/lexikon/Kaliumcarbonat.html> [Stand: 02.06.2020]

[27] **Erstarrungsbedingungen Tec-science:**

<https://www.tec-science.com/de/werkstofftechnik/erstarrung-von-metallen/erstarrungsbedingungen/> [Stand: 02.06.2020]

[28] **Meltium Sicherheitsdatenblatt:**

<https://productcatalog.eastman.com/tds/ProdDatasheet.aspx?product=71103980&pn=Meltium> [Stand: 02.06.2020]

[30] **Sno'n'Ice Produktdatenblatt:**

[https://www.sno-n-ice.ch/fileadmin/Dateien/PDF/2040\\_SDB\\_Sno-N-Ice\\_d.pdf](https://www.sno-n-ice.ch/fileadmin/Dateien/PDF/2040_SDB_Sno-N-Ice_d.pdf) [Stand: 02.06.2020]

[29] **Sno'n'Ice Flyer:**

[https://www.sno-n-ice.ch/fileadmin/Dateien/PDF/SNO-N-ICE\\_Flyer\\_Steinmann\\_deutsch.pdf](https://www.sno-n-ice.ch/fileadmin/Dateien/PDF/SNO-N-ICE_Flyer_Steinmann_deutsch.pdf) [Stand: 02.06.2020]

[31] **Sno'n'Ice Produktdetails Firma Steinmann:**

<https://www.sno-n-ice.ch/de/taumittel/produktdetails.html> [Stand: 02.06.2020]

[32] **Statista:**

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/317867/umfrage/prognose-zur-bevoelkerungsentwicklung-in-wien/> [Stand: 02.06.2020]

[33] **Thermodynamik Uni-Graz:**

<https://physik.uni-graz.at/~uxh/teaching/presentations14/publication/staehle.pdf> [Stand: 02.06.2020]

[34] **Thermodynamik Wikipedia:**

[https://de.wikipedia.org/wiki/Unterkühlung\\_\(Thermodynamik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Unterkühlung_(Thermodynamik)) [Stand: 02.06.2020]

[35] **ZAMG:**

<https://www.zamg.ac.at/cms/de/produkte/wetter/spezialprognosen/strassenwetter> [Stand: 02.06.2020]

Mündliche-Quellen:

[36] **Nutz Peter**. Leitung Planung und Winterdienst – Stadt Wien, Magistratsabteilung 48.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Anforderungen an den Winterdienst [13] .....	8
Abbildung 2 Solestreuer .....	14
Abbildung 3 Solestreuer-Düsen.....	14
Abbildung 4 Streumittelverluste durch den Straßenverkehr [5] .....	15
Abbildung 5 Zustandsdiagramm Natriumchlorid [9].....	18
Abbildung 6 Klimaschrank .....	24
Abbildung 7 Datenlogger.....	24
Abbildung 8 Temperaturverlauf Kalibrierung Messung 2-Datenlogger 85942.....	26
Abbildung 9 Temperaturverlauf Kalibrierung Messung 2-Datenlogger 85896.....	26
Abbildung 10 Sensorenverteilung Temperaturverteilungsmessung.....	27
Abbildung 11 Konstruktive Maßnahmen zur Temperaturvergleichmäßigung .....	30
Abbildung 12 Positionierung Temperaturfühler praktischer Lösungsansatz.....	31
Abbildung 13 Temperaturverlauf praktischer Lösungsansatz-Datenlogger 85942 .....	32
Abbildung 14 Temperaturverlauf praktischer Lösungsansatz-Datenlogger 85896 .....	32
Abbildung 15 Metallschale inklusive Deckel .....	33
Abbildung 16 Arbeitshandschuhe Klimaschrank.....	33
Abbildung 17 Gefrierpunkt ohne Supercooling.....	34
Abbildung 18 Gefrierpunkt mit Supercooling .....	35
Abbildung 19 Exemplarische Gefrier-/Löslichkeitskurve .....	35
Abbildung 20 Gefrierpunktbestimmung .....	36
Abbildung 21 Gefrierkurve 22%ige Natriumchloridsole .....	38
Abbildung 22 Gefrierkurve Kaliumcarbonat.....	39
Abbildung 23 Gefrierkurve Viaform .....	40
Abbildung 24 Gefrierkurve Auftaumittel 49 % 1:1.....	40
Abbildung 25 Gefrierkurve Enteisungsmittel .....	41
Abbildung 26 Gefrierkurve Propylenglycol .....	41
Abbildung 27 Gefrierkurve Sno'n'ice .....	42
Abbildung 28 Gefrierpunktvergleich Referenzstudie.....	44
Abbildung 29 Versuchsaufbau Tauleistungsversuche.....	45
Abbildung 30 Tauleistungsvergleich -2,5°C (Punktdiagramm).....	51
Abbildung 31 Tauleistungsvergleich -2,5°C (Säulendiagramm) .....	52
Abbildung 32 Tauleistung -2,5°C auf Natriumchlorid bezogen.....	53
Abbildung 33 Taurate -2,5°C .....	54
Abbildung 34 Taurate < 30 Minuten -2,5°C.....	55
Abbildung 35 Tauleistungsvergleich -5°C (Säulendiagramm) .....	56
Abbildung 36 Tauleistungsvergleich -10°C (Säulendiagramm) .....	57
Abbildung 37 Tauleistungsvergleich Viaform / Auftaumittel 49 % 1:1 .....	58
Abbildung 38 Referenzstudienvergleich: Tauleistung NaCl -2,5°C.....	61
Abbildung 39 Referenzstudienvergleich: Taurate NaCl -2,5°C.....	61
Abbildung 40 Referenzstudienvergleich: Tauleistung NaCl -5°C.....	62
Abbildung 41 Referenzstudienvergleich: Taurate NaCl -5°C.....	62
Abbildung 42 Grip Tester .....	64
Abbildung 43 Streufahrzeuge.....	64
Abbildung 44 Griptester Messfahrt.....	65
Abbildung 45 Nullmessung Grip Tester.....	66
Abbildung 46 Grip Tester Messungen .....	67

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Streuempfehlung Viaform laut Hersteller .....	21
Tabelle 2 Prüfprogramm Kalibrierung Messung 1 .....	24
Tabelle 3 Prüfprogramm Kalibrierung Messung 2 .....	25
Tabelle 4 Ergebnisse Kalibrierung Messung 2 .....	26
Tabelle 5 Temperaturverteilung im Klimaschrank .....	28
Tabelle 6 Temperaturverteilung; Konstruktive Maßnahmen Variante 1 .....	29
Tabelle 7 Temperaturverteilung; Konstruktive Maßnahmen Variante 2 .....	29
Tabelle 8 Temperaturverteilung; Konstruktive Maßnahmen Variante 3 .....	29
Tabelle 9 Temperaturverteilung; Konstruktive Maßnahmen Variante 4 .....	30
Tabelle 10 Prüfprogramm Gefrierversuche .....	37
Tabelle 11 Konzentrationen Natriumchlorid Gefrierversuche .....	37
Tabelle 12 Gefrierpunkt 22%ige Natriumchloridsole .....	38
Tabelle 13 Gefrierpunkt 20%ige Natriumchloridsole .....	38
Tabelle 14 Gefrierpunkt 25%ige Natriumchloridsole .....	38
Tabelle 15 Konzentrationen Sno'n'ice Gefrierversuche .....	42
Tabelle 16 Gefrierpunktvergleich Referenzstudie .....	44
Tabelle 17 Prüfprogramm Tauleistungsversuche .....	47
Tabelle 18 Tauleistung Natriumchlorid .....	48
Tabelle 19 Tauleistung Kaliumcarbonat .....	48
Tabelle 20 Tauleistung Viaform .....	49
Tabelle 21 Tauleistung Auftaumittel 49 % 1:1 .....	49
Tabelle 22 Tauleistung Enteisungsmittel .....	50
Tabelle 23 Tauleistung Propylenglykol .....	50
Tabelle 24 Monetäre Tauleistung .....	60
Tabelle 25 Tauleistung und Taurate Natriumchlorid .....	60
Tabelle 26 Tauleistung und Taurate Natriumchlorid der Referenzstudie .....	61
Tabelle 27 Tauleistung und berechnete Taurate der Referenzstudie .....	61
Tabelle 28 Prüfprogramm Grip Tester .....	66
Tabelle 29 Griffigkeitsbewertung .....	68
Tabelle 30 Ergebnisse Grip Tester .....	68
Tabelle 31 Vergleich: Tauleistung Viaform / Auftaumittel 49 % 1:1 .....	69
Tabelle 32 Grip Tester Viaform / Auftaumittel 49 % 1:1 .....	69
Tabelle 33 Umweltauswirkungen Viaform 7 Auftaumittel 49 % 1:1 .....	70
Tabelle 34 Vergleich: Tauleistung Viaform / Kaliumcarbonat .....	71

## Formelverzeichnis

(1) Submilation Natriumchlorid .....	17
(2) Solvatisierung Natriumchlorid .....	17
(3) Kaliumcarbonatherstellung mittels Einleiten von Kohlendioxid und Eindampfen .....	20
(4) Kaliumcarbonatherstellung mittels Formiat-Pottasche-Verfahren (Formel 1) .....	20
(5) Kaliumcarbonatherstellung mittels Formiat-Pottasche-Verfahren (Formel 2) .....	20
(6) Sollsalzmenge; Gefrierversuche .....	36
(7) Menge getautes Eis; Tauleistungsversuche .....	46
(8) Menge aufgebracht Taumittel; Tauleistungsversuche .....	46
(9) Tauleistung .....	46
(10) Taurate .....	46
(11) Monetäre Tauleistung .....	59
(12) Reibungsbeiwert $\mu$ .....	63

## Anhang

### Inhaltsverzeichnis Anhang

Taumittelvergleich.....	79
Gefrierkurven Natriumchlorid.....	81
Gefrierkurven Kaliumcarbonat.....	82
Tauleistung aller Taumittel bei -5°C.....	82
Taurate aller Taumittel bei -5°C.....	83
Tauleistung aller Taumittel bei -10°C.....	84
Taurate aller Taumittel bei -10°C.....	86

### Abbildungsverzeichnis Anhang

Abbildung A 1 Gefrierkurve 20%ige Natriumchloridsole .....	81
Abbildung A 2 Gefrierkurve 25%ige Natriumchloridsole .....	81
Abbildung A 3 Gefrierkurve 20/30/40/50%ige Kaliumcarbonatsole .....	82
Abbildung A 4 Tauleistung -5°C (Punktdiagramm).....	82
Abbildung A 5 Tauleistung bezogen auf NaCl -5°C.....	83
Abbildung A 6 Taurate -5°C.....	83
Abbildung A 7 Taurate <30 Minuten -5°C.....	84
Abbildung A 8 Tauleistung -10°C (Punktdiagramm).....	84
Abbildung A 9 Tauleistung bezogen auf NaCl -10°C.....	85
Abbildung A 10 Tauleistung bezogen auf NaCl -10°C (verbesserte Darstellung).....	86
Abbildung A 11 Taurate -10°C.....	86
Abbildung A 12 Taurate <30 Minuten -10°C.....	87

### Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle A 1 Taumittelvergleich Teil 1 .....	79
Tabelle A 2 Taumittelvergleich Teil 2 .....	80

**Taamittelvergleich**

Tabella A 1 Taamittelvergleich Teil 1

	Chemische Formeln	Agregatzustand	Farbe	Geruch	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	wasserlöslich [g/l]	Schmelzpunkt/Gefrierpunkt [°C]	Siedebeginn [°C]	PH-Wert	hygroskopisch
<b>Natriumchlorid</b>	NaCl	fest (kristallin)	farblos	geruchlos	2,17	359	800	1450	5,0-7,0	nein; zieht Feuchtigkeit an
<b>Caliumcarbonat</b>	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	fest (Pulver)	weiß	geruchlos	2,43	1120	891	k.A.	11,5-12,5	chemisch stabil
<b>Viaform</b>	50% KHCO <sub>2</sub>	flüssig	farblos	geruchlos	1,33-1,37	vollständig löslich	k.A.	116	<11,5	chemisch stabil
<b>Auftaamittel 49% 1:1</b>	20-30% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	flüssig	farblos, klar	geruchlos	1,43	vollkommen mischbar	-48,9	k.A.	1,17	chemisch stabil
<b>Enteisungsmittel</b>	50-60% C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH und 0-10% C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	flüssig	farblos oder blau	alkoholisch	0,91	k.A.	k.A.	78	k.A.	chemisch stabil
<b>Propylenglycol=1,2-Propandiol</b>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	flüssig	farblos	charakteristisch	1,04	in jedem Verhältnis	-59	188	6,0-8,0	chemisch stabil
<b>Sno'n'Ice</b>	NaCl und Na <sub>3</sub> O <sub>2</sub> Si	fest	rosa	geruchlos	k.A.	löslich	k.A.	k.A.	k.A.	keine Zersetzung
<b>Natriumformiat</b>	CHO <sub>2</sub> Na	fest (kristallin)	weiß	geruchlos	1,92	550	253	411	7,0-8,5	chemisch stabil
<b>Ethylenglycol = Monoethylenglycol</b>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	flüssig	farblos-hellgelb	geruchlos	1,11	1000	-14 bis-12	k.A.	6,0-7,5	chemisch stabil; hygroskopisch
<b>Diethylenglykol</b>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	flüssig (viskos)	farblos	geruchlos	1,11-1,12	in jedem Verhältnis	-6,5	242-252	6,0-8,0	chemisch stabil; hygroskopisch
<b>Natriumacetat</b>	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> Na	fest (Pulver)	farblos	geruchlos	1,53	365	328	>400	7,5-9,2	hygroskopischer Feststoff
<b>Kaliumacetat</b>	CH <sub>3</sub> CO <sub>2</sub> K	fest	weiß	Essiggeruch	1,57	2530	292	392,4	7,5-9,0	chemisch stabil
<b>Calcium-Magnesium-Acetat</b>	C <sub>8</sub> H <sub>12</sub> CaMgO <sub>8</sub>	fest	weiß bis grau	k.A.	k.A.	k.A.	400	k.A.	8,0-10,0	k.A.
<b>Magnesiumchlorid</b>	MgCl <sub>2</sub>	fest (kristallin)	weiß	geruchlos	2,32	540	708-712	1412	7,0	chemisch stabil
<b>Calciumchlorid</b>	CaCl <sub>2</sub>	fest	weiß	geruchlos	2,15	745	775	1935	8,0-10,0	chemisch stabil
<b>Harnstoff</b>	CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	fest	weiß	schwacher Amoniakgeruch	1,33	624	134	k.A.	9,0	chemisch stabil
<b>Amoniumsulfat</b>	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	fest (kristallin)	farblos bis weißlich	geruchlos	1,77	750	230	k.A.	5,0-6,0	chemisch stabil
<b>Bellow Zero</b>	chem. Präparat	flüssig	farblos	geruchlos	1,2	vollständig gelöst	-50	110	7,5-9,0	k.A.
<b>Iche Breaker</b>	CaCl <sub>2</sub> -Lösung	flüssig	farblos	fast geruchlos	1,33	vollständih mischba	<15	>100	5,0-11,0	chemisch stabil

Tabelle A 2 Traummittelvergleich Teil 2

	toxisch	Materialunverträglichkeit	Abbaubarkeit	Bioakkumulationspotenzial; n-Oktanol/Wasser	Mobilität im Boden; Organic Carbon	PBT- und vPvB-Beurteilung	zulässig lt. Winterdienstverordnung
<b>Natriumchlorid</b>	nicht akut toxisch	Eisen	nein; anorganisch	k.A.	k.A.	k.A.	ja (Ausnahmeregelung)
<b>Caliumcarbonat</b>	nicht akut toxisch	keine	nein; anorganisch	k.A.	k.A.	k.A.	ja
<b>Viaform</b>	kein Gesundheitsrisiko	stark oxidierende Materialien	k.A.	keine Bioak.	wasserlöslich	k.A.	ja
<b>Auftaumittel 49% 1:1</b>	k.A.	starke Säuren	nein; anorganisch	keine Bioak.	wasserlöslich; nicht flüchtig	nur Stoffe <0,1%	ja
<b>Enteisungsmittel</b>	k.A.	andere Chemikalien und Oxidationsmittel	k.A.	-1,36	k.A.	k.A.	ja
<b>Propylenglycol=1,2-Propandiol</b>	nicht akut toxisch	nein	leicht biolog. abbaubar	-1,07	k.A.	k.A.	ja
<b>Sno'n'Ice</b>	k.A.	keine	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	ja
<b>Natriumformiat</b>	nicht akut toxisch	keine	leicht biolog. Abbaubar	-2,1	1,492	k.A.	ja
<b>Ethylenglycol = Monoethylenglycol</b>	akut (Maus und Ratte)	keine	leicht biolog. Abbaubar	-1,36	0	k.A.	ja
<b>Diethylenglykol</b>	akut (Kanninchen und Mensch)	nein	leicht biolog. Abbaubar	-1,98	k.A.	k.A.	ja
<b>Natriumacetat</b>	nicht akut toxisch	keine	leicht biolog. Abbaubar	-3,72	0	k.A.	ja
<b>Kaliumacetat</b>	nicht akut toxisch	keine	ja (leicht)	-3,72	0	k.A.	ja
<b>Calcium-Magnesium-Acetat</b>	nicht toxisch	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	ja
<b>Magnesiumchlorid</b>	nicht akut toxisch	keine	nein; anorganisch	k.A.	k.A.	k.A.	nein
<b>Calciumchlorid</b>	nicht akut toxisch	keine	nein; anorganisch	k.A.	k.A.	k.A.	nein
<b>Harnstoff</b>	nicht akut toxisch	keine	keine	<-1,73	-1,431 bis -1,193	k.A.	nein
<b>Amoniumsulfat</b>	nicht akut toxisch	keine	nein; anorganisch	k.A.	k.A.	k.A.	nein
<b>Bellow Zero</b>	k.A.	keine	biologisch abbaubar	k.A.	k.A.	k.A.	nein
<b>Iche Breaker</b>	k.A.	keine	nein; anorganisch	k.A.	k.A.	k.A.	nein

### Gefrierkurven Natriumchlorid

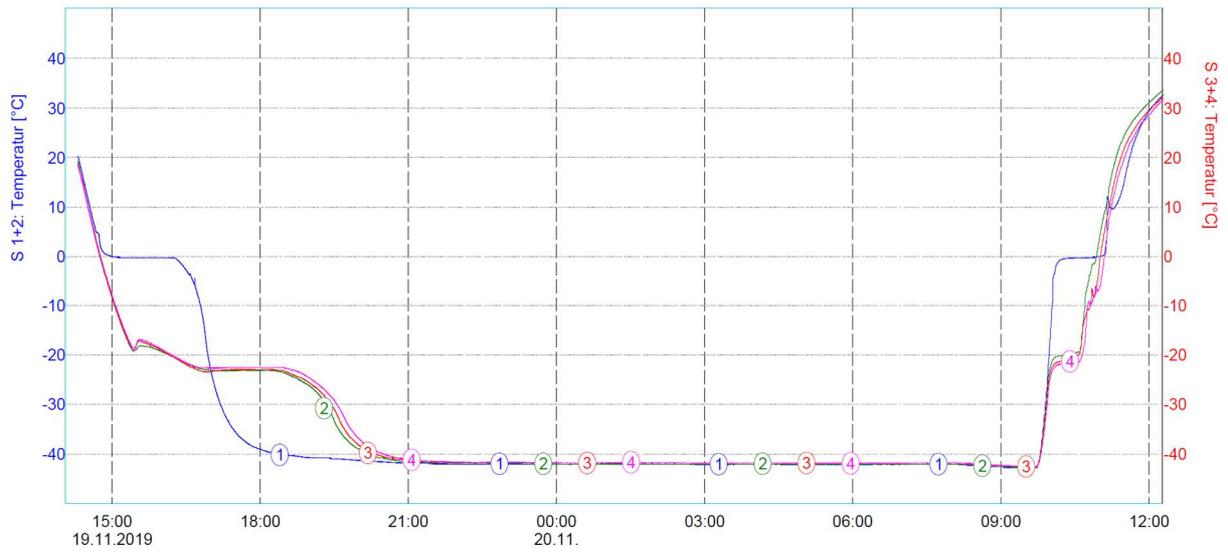


Abbildung A 1 Gefrierkurve 20%ige Natriumchloridsole

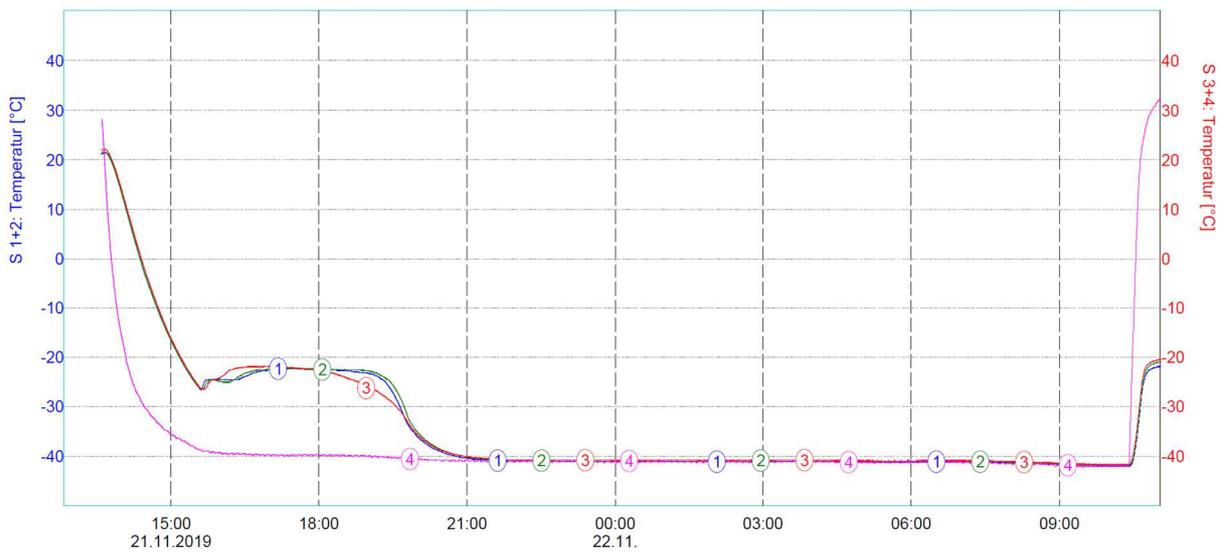


Abbildung A 2 Gefrierkurve 25%ige Natriumchloridsole

## Gefrierkurven Kaliumcarbonat

Sensor 1: 20%ige Kaliumcarbonatsole

Sensor 2: 30%ige Kaliumcarbonatsole

Sensor 3: 40%ige Kaliumcarbonatsole

Sensor 4: 50%ige Kaliumcarbonatsole

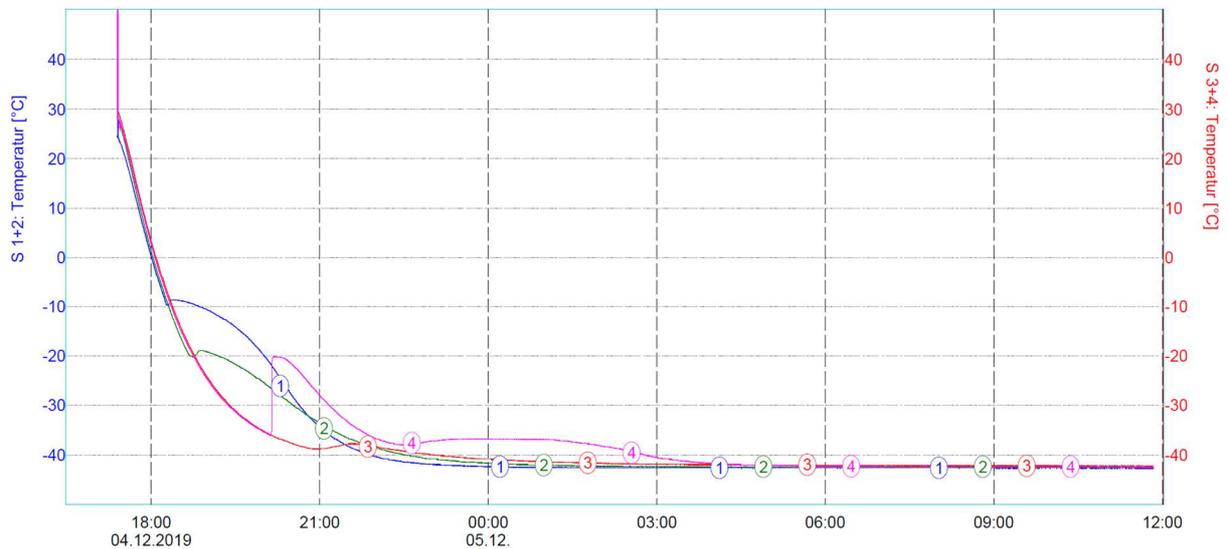


Abbildung A 3 Gefrierkurve 20/30/40/50%ige Kaliumcarbonatsole

## Tauleistungen aller Taumittel bei -5°C

Tauleistung -5°C

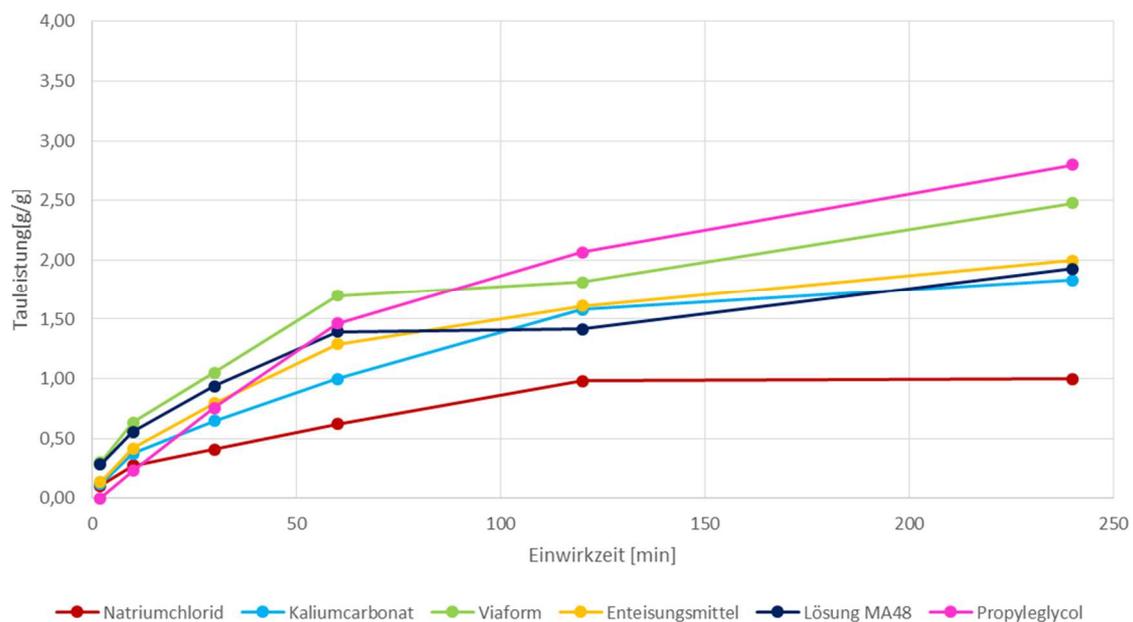


Abbildung A 4 Tauleistung -5°C (Punktdiagramm)

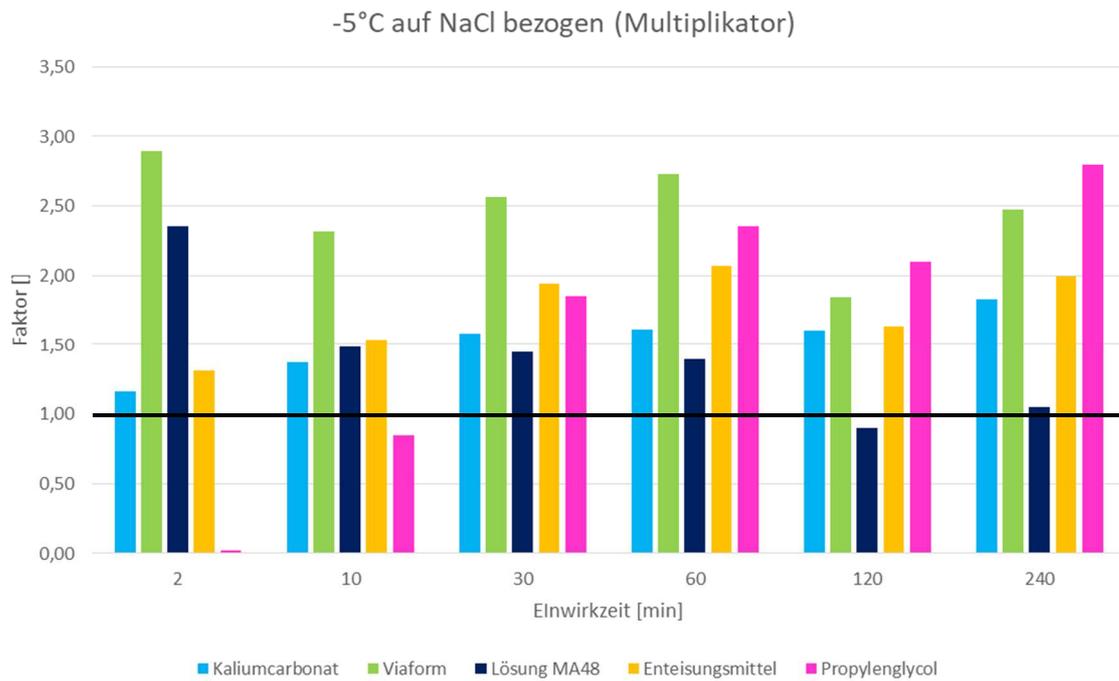


Abbildung A 5 Tauleistung bezogen auf NaCl -5°C

**Tauraten aller Taumittel bei -5°C**

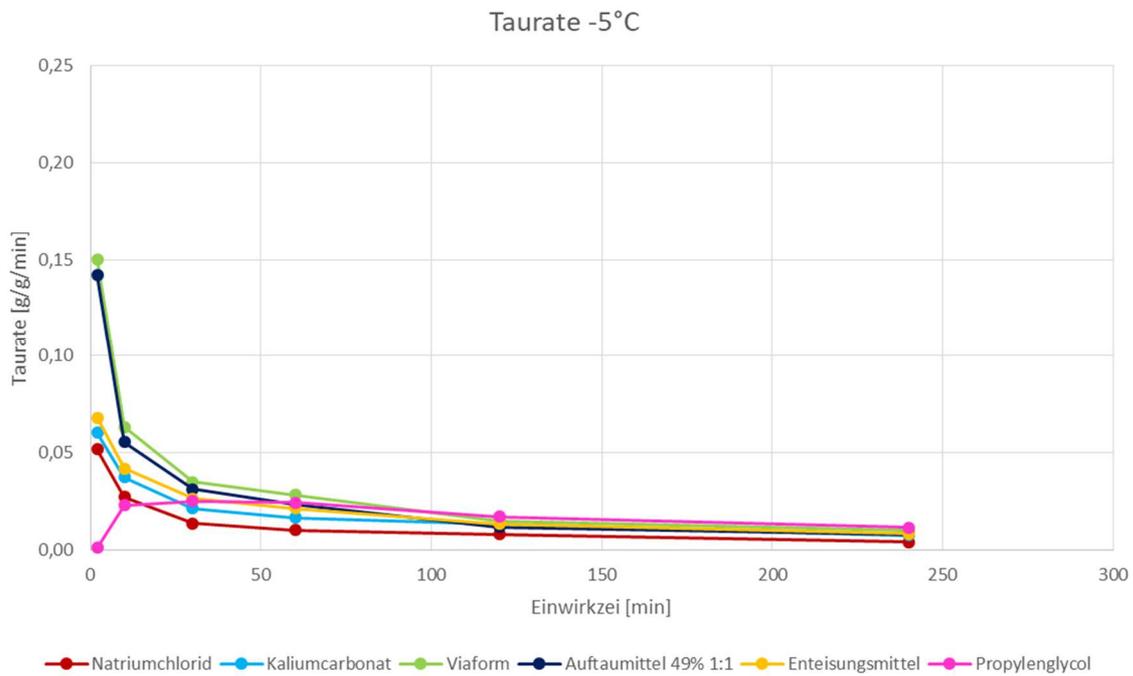


Abbildung A 6 Taurate -5°C

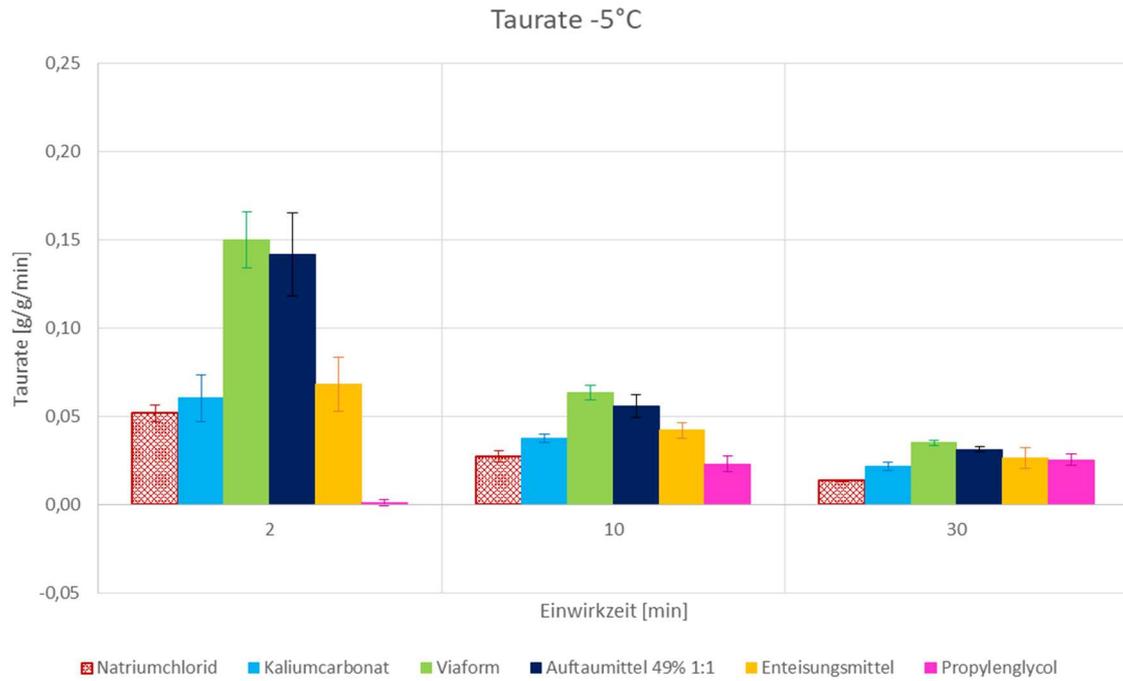


Abbildung A 7 Taurate &lt;30 Minuten -5°C

### Tauleistungen aller Taumittel bei -10°C

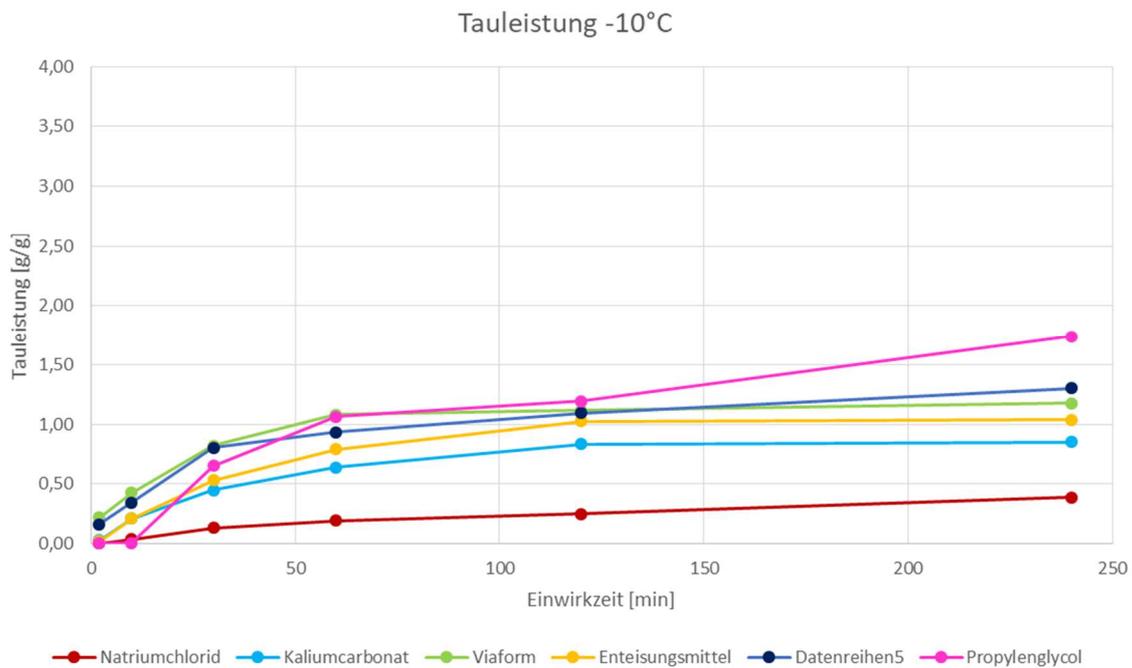


Abbildung A 8 Tauleistung -10°C (Punktdiagramm)

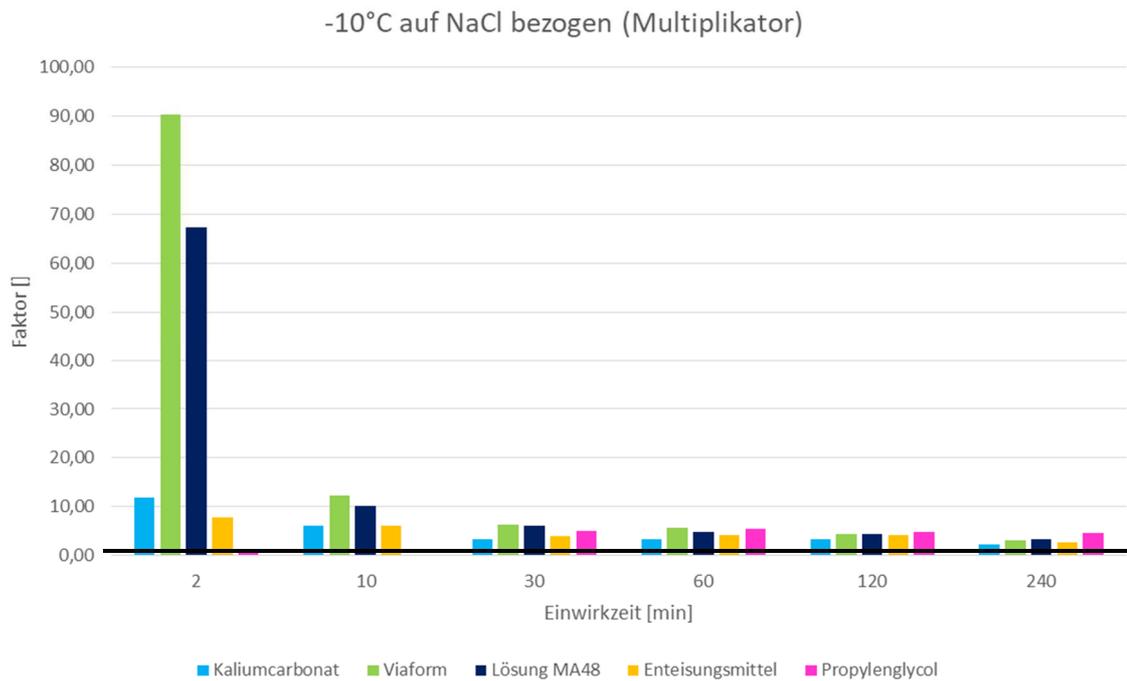


Abbildung A 9 Tauleistung bezogen auf NaCl -10°C

Da Natriumchlorid bei einer Temperatur von -10°C nur mehr eine eingeschränkte Wirksamkeit besitzt, schlägt sich das besonders in der Tauleistung bei einer Einwirkungszeit von 2 Minuten nieder. Die Tauleistung ist hier extrem gering. Dementsprechend sind die Tauleistungen aller anderen Stoffe verhältnismäßig viel höher und verfälschen das Aussehen des Diagrammes. Folglich ist es sinnvoll, den Betrachtungszeitraum von 2 Minuten bei einem Temperaturniveau von -10°C aus dem Diagramm zu nehmen. Das Diagramm für die Multiplikatoren bei -10°C wird in verbesserter Weise nochmal dargestellt:

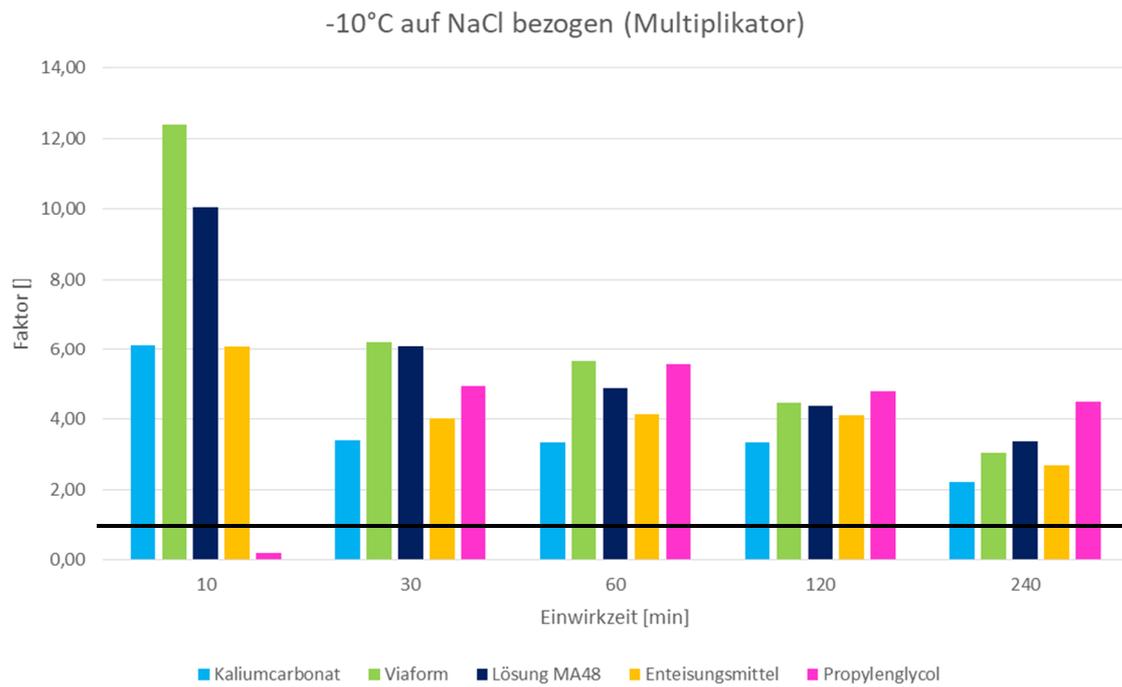


Abbildung A 10 Tauleistung bezogen auf NaCl -10°C (verbesserte Darstellung)

### Tauraten aller Taumittel bei -10°C

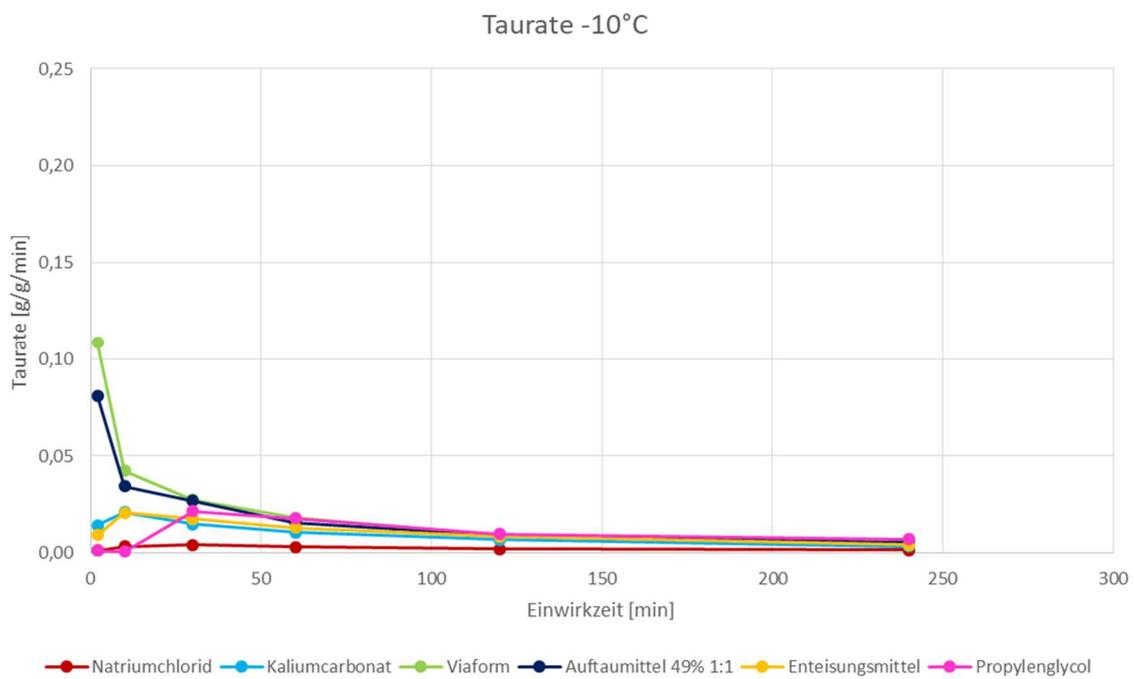


Abbildung A 11 Taurate -10°C

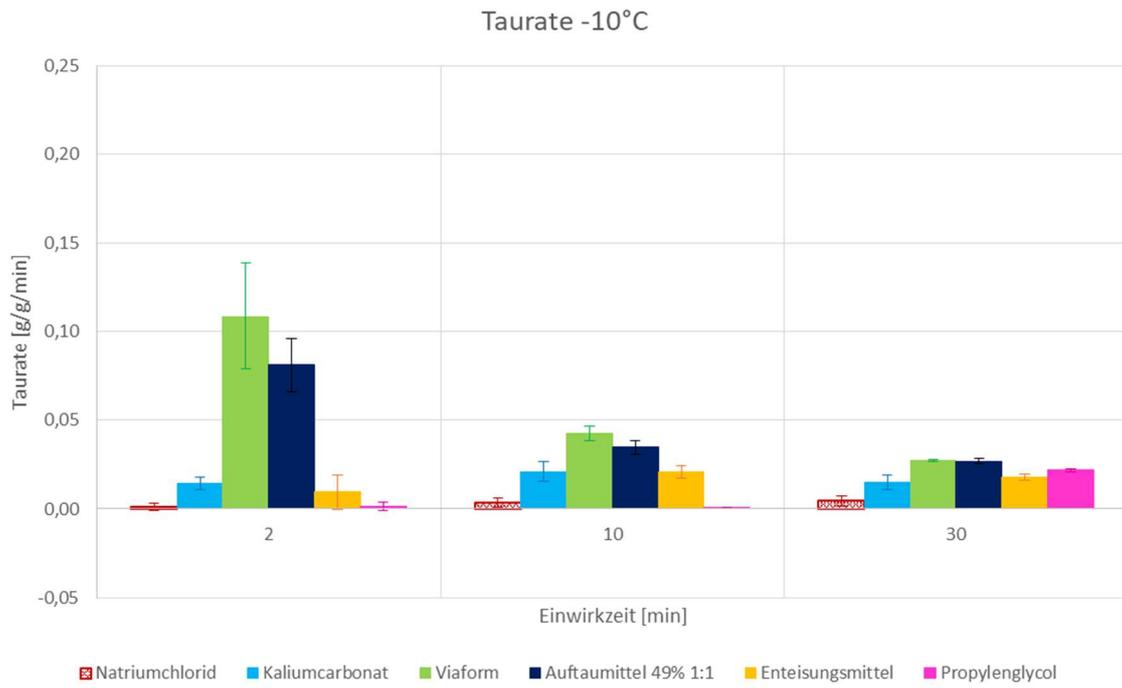


Abbildung A 12 Taurate <30 Minuten -10°C