Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/ Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

Eignungskriterien für auftauende Streumittel

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

unter der Leitung von

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

und

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn.
Bernhard Hofko

E230

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Straßenwesen

eingereicht an der **Technischen Universität Wien**
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Carina Müller, BSc

Mat. Nr.: 1228691

Lazarettgasse 37/6
1090 Wien, Österreich
carina.mue@gmx.de

Wien, November 2014 Unterschrift

Kurzfassung

Der Winterdienst in Österreich hat eine große Bedeutung sowohl in wirtschaftlicher, personeller und sicherheitstechnischer Hinsicht. In erster Linie bedeutet der Winterdienst für viele Straßennutzer die Erhaltung der Verkehrssicherheit auf den Straßen trotz winterlicher Verhältnisse. Die Befahrbarkeit soll durch präventive Vorsorge und durch den regelmäßigen Einsatz von Räum- und Streufahrzeugen sichergestellt werden. Da das österreichische Straßennetz mit 2.185 km Autobahnen und Schnellstraßen, 33.639 km Landesstraßen und 78.766 km Gemeindestraßen sehr dicht vernetzt ist [1], werden große Mengen an auftauenden Streumitteln benötigt. In den letzten Jahren wurden im Schnitt 345.000 Tonnen Salz in einer Winterdienstperiode in Österreich verbraucht [2].

Ziel dieser Arbeit ist es, Eignungskriterien für auftauende Streumittel in verschiedenen klassifizierenden Versuchen festzulegen, sodass eine Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Versuche insbesondere bei der Verwendung/Anwendung neuerer alternativer Streumittel gewährleistet werden kann.

Zur Bestimmung der Gefrierpunktverläufe verschiedener Solekonzentrationen werden acht Kunststoffflaschen mit einem Solegemisch ($NaCl$, $CaCl_2$ oder $MgCl_2$) bis zum eutektischen Punkt gefüllt, mit einem Temperaturfühler versehen und im Klimaschrank gefroren. Es wird dabei der Gefrierpunkt in Abhängigkeit der jeweiligen gewählten Solekonzentration bestimmt.

Die Tauwirksamkeit fester Taumittel ($NaCl$)wird mit Hilfe verschiedener Kornklassen in Abhängigkeit von der Einwirkzeit bestimmt. Auf bereits vorher erzeugten Eisplatten wird im Klimaschrank eine konstante Menge an Salz aufgebracht und nach Ablauf der jeweiligen Einwirkzeit die getaute Eismenge berechnet.

Für die Bestimmung der Tauwirksamkeit flüssiger Taumittel ($NaCl$, $CaCl_2$ oder $MgCl_2$) wird die Solekonzentration in Abhängigkeit der Einwirkzeit bestimmt. Hierzu werden vor Versuchsbeginn Eisplatten mit einer Vertiefung erzeugt, auf die im Klimaschrank die Sole aufgetragen wird. Nach Ablauf der Einwirkzeit wird die Menge an getautem Eis bestimmt.

Die Untersuchung der Gefrierpunktverläufe ausgewählter Taumittel ergab, dass sich Natriumchlorid ($NaCl$) für die reguläre und kostengünstigste Streuung am besten eignet,

jedoch bei Temperaturen unter -10°C durch Calcium- und Magnesiumchlorid ($CaCl_2$ und $MgCl_2$) ergänzt werden sollte.

Ein ergänzender Versuch zur Tauwirksamkeit von $NaCl$ zeigte, dass die Tauwirksamkeit dieses festen Taumittels kaum von der gewählten Kornklasse abhängig ist, jedoch gerade bei kurzen Einwirkzeiten die feine Kornklasse 0,125/1,0 bessere Ergebnisse zeigt.

Ein letzter Versuch schließlich zur Tauwirksamkeit flüssiger Taumittel ergab unterschiedliche Anwendungsempfehlungen von $NaCl$ und $CaCl_2$ in Abhängigkeit von Temperatur und Einwirkzeit.

Abstract

The winter service in Austria is of great importance, from both an economic, personnel and safety standpoint. The first line of winter maintenance means: the maintenance of traffic safety on the oads despite wintry conditions for many road users. The navigability is to ensure preventive care as well as regular use of clearing and gritting vehicles.

Since the Austrian road network is a complex combination, made up of 2,185 km of motorways and highways, 33,639 km provincial roads and 78,766 km local roads, this naturally/obviously/defiantly requires large amounts of thawing broadcasting agents.

In recent years, on average, 345.000 tons of salt were utilized during winter service in Austria.

The aim of this work is to determine the criteria for the thawing and scattering agents in various classified experiments, so that the repeatability and comparability of experiments can be ensured with others, specifically with newer broadcasting agents.

To determine the freezing point curves of different brine concentrations ($NaCl$, $CaCl_2$ or $MgCl_2$) , eight plastic bottles with a mixture of brine are filled to the eutectic point provided with a temperature sensor and frozen in a climate chamber. The freezing point is determined as a function of the respective selected brine concentration.

The thawing process solid de-icing ($NaCl$) agents are determined with the help of various grain sizes as a function of exposure time. On previously generated ice sheets, a constant amount of salt is applied, and after the end of each exposure the amount of ice thawed in the climatic chamber is calculated.

For the determination of liquid de-icing agents thawing process ($NaCl$, $CaCl_2$ oder $MgCl_2$), the brine concentration, is determined as a function of exposure time. For this purpose, prior to commencement of the ice sheets with a well produced to which the brine is applied in a climate chamber. After treatment, the amount is determined by thawed ice.

The investigation of freezing profiles of selected de-icing agents showed that sodium chloride (NaCl) for the regular and cost-effective scattering is most suitable, however, it should be complemented at temperatures below -10 ° C by calcium and magnesium chloride.

An additional study to the thawing process of NaCl showed that the thawing process as a fixed thawing agent is hardly dependent on the chosen grain class, but just for short exposure times, the fine grain class is 0.125 / 1.0 superior. A last attempt to finally the thawing process liquid de-icing agents showed different recommendations for use of NaCl and CaCl as a function of temperature and contact time.

Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit wurde am Institut für Verkehrswesen an der Technischen Universität Wien verfasst und ist der Abschluss meines Masterstudiums Infrastrukturplanung und -management.

Als erstes möchte ich mich sehr herzlich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab, Leiter des Instituts für Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Wien, für die Bereitstellung dieses wissenschaftlichen Themas und die Möglichkeit der Zusammenarbeit während meines gesamten Mastersstudiums bedanken. Erste Einblicke in die Laborarbeit des Instituts konnte ich an der Seite von Dipl.-Ing. Peter Nutz gewinnen, der mir das Thema Winterdienst näher gebracht hat. Daher auch vielen Dank an Dipl.-Ing. Peter Nutz.

Meinem Betreuer vor Ort im Labor, Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko, danke ich an dieser Stelle für die ausgezeichnete Betreuung während meiner gesamten Arbeitszeit an meiner Diplomarbeit im Labor. Mit Problemen und Fragen konnte ich jederzeit zu ihm kommen und mir wurde sofort weitergeholfen.

Ganz herzlich möchte ich mich bei dem ganzen Laborteam und besonders bei Frau Dipl.-Ing. Monika Marinova für ihre Mithilfe an den Versuchsdurchführungen bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Robert und Bärbel, die mir dieses Studium ermöglicht haben und mich immer unterstützen. Selbst während und nach meinem Umzug nach Wien stehen sie mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite und sind nur einen Anruf entfernt.

Auch bei meinem Freund Oliver möchte ich mich sehr bedanken, da er schon vor Beginn meines Studiums immer mit voller Unterstützung an meiner Seite stand und schon so manchen Prüfungsstress mit mir durchstehen musste.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 8

1.1. Ausgangslage und vorhandene Normen 9

1.2. Zielsetzungen der Arbeit 11

1.3. Versuchstypen 12

2. Allgemeine Grundlagen des Winterdienstes und der Salzstreuung 13

2.1. Abstumpfende Streumittel 16

2.2. Auftauende Streumittel 17

2.3 Zu betrachtende Streumittel 18

2.4. Weitere Streumittel und Streumaterialien 20

3. Laborversuche 22

3.1. Gefrierpunktverlauf 23

3.1.1. Zweck 24

3.1.2. Geräte und Versuchsaufbau 24

3.1.3. Versuchsdurchführung 25

3.2. Tauwirksamkeit fester Taumittel 27

3.2.1. Zweck 28

3.2.2. Geräte und Versuchsaufbau 29

3.2.3. Versuchsdurchführung 30

3.3 Tauwirksamkeit flüssiger Taumittel 31

3.3.1. Zweck 32

3.3.2. Geräte und Versuchsaufbau 32

3.3.3. Versuchsdurchführung 33

4. Auswertung & Ergebnisse 35

4.1. Gefrierpunktverlauf 35

4.2. Tauwirksamkeit fester Taumittel 38

4.3. Tauwirksamkeit flüssiger Taumittel 53

5. Zusammenfassung und Ausblick 67

Literaturverzeichnis 69

Abbildungsverzeichnis 72

Tabellenverzeichnis 74

Formelverzeichnis 74

Anhang 75

1. Einleitung

Die Straßenbetreiber haben im Winter die Pflicht, die Benutzbarkeit und die Verkehrssicherheit (vor allem Griffigkeit) der Straßen auch zu dieser Zeit zu gewährleisten. Die Griffigkeit ist für ein sicheres Bremsverhalten und eine sichere Kurvenfahrt notwendig. Auch die Wirtschaftlichkeit spielt für die Straßenbetreiber eine wichtige Rolle. Wenn die Autobahnen gesperrt und nicht nutzbar sind, kann keine Kilometermaut eingenommen werden und es entstehen Stau- und Wegekosten [3]. Dazu soll die Fahrbahn durch die geeignete Wahl eines entsprechenden Taumittels schnee- und eisfrei gehalten werden. Dabei spielen auftauende Taumittel im übergeordneten Straßennetz eine große Rolle; jährlich werden ca. 200.000 bis 300.000 Tonnen verwendet [4]. Auch im Sinne des Umweltschutzes müssen Streumittel daher folgende Kriterien und Anforderungen (Abb. 1) erfüllen:

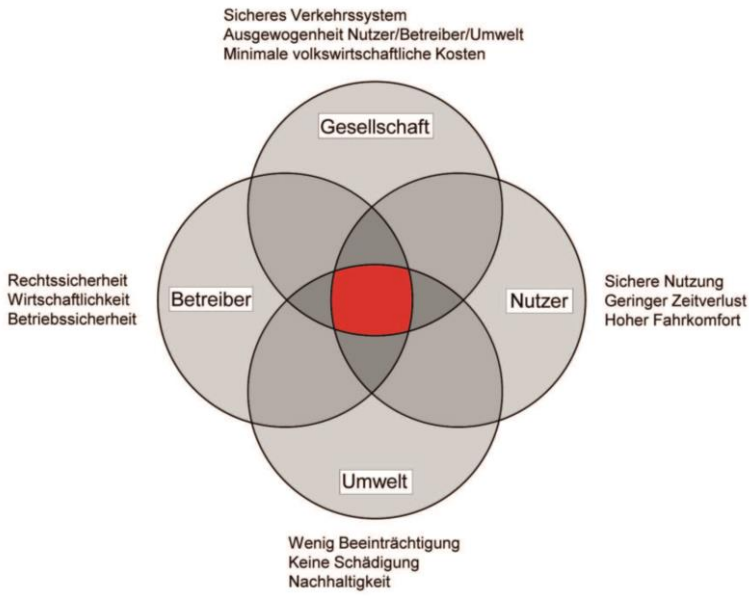


Abbildung 1: Anforderungen an Streumittel [2]

Für die Nutzer muss das Streumittel Anforderungen an die Griffigkeit und Tauwirksamkeit erfüllen. Die Griffigkeit darf durch die Streuung nicht vermindert werden, es sollte eine schnelle Tauwirksamkeit haben und die Liegedauer sollte möglichst lang sein.

Für den Betreiber sind die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit der Streumittel am höchsten. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis sollte stimmen und die Beschaffung, das Material und die Lagerung sollten nicht zu teuer sein. Die Umweltbelastungen haben auch Auswirkungen auf die anderen Nutzer und sollten daher mit besonderer Sorgfalt beachtet

werden. Die Streumittel sollen die Umwelt, Fahrzeuge, Bauwerke oder Fahrbahnen nicht angreifen oder beschädigen [2].

Aktuell wächst die Anzahl der neu auf den Markt kommenden auftauenden Taumittel und um diese genauer klassifizieren zu können, wurde diese Diplomarbeit im Rahmen des Forschungsprojekts „Eignungskriterien auftauender Streumittel im Winterdienst“ an der Technischen Universität Wien durchgeführt. Durch diese Arbeit sollen für künftige RVS (Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen) objektiv anwendbare Eignungskriterien sowie ein wiederholbares Prüfsystem entwickelt werden, damit die Verkehrssicherheit auch bei winterlichen Straßenverhältnissen gewährleistet werden kann.

1.1. Ausgangslage und vorhandene Normen

Alle Anforderungen an den Winterdienst sind in RVS niedergeschrieben. In den verschiedenen Winterdienstkategorien (siehe Kapitel 2) sind die Umlaufzeiten und Streuzeiten je nach Straßenkategorie festgelegt. Die Normen regeln auch die Mengen des aufzubringenden Streusalzes, zeigen Szenarien je nach Wettersituationen auf und beschreiben, wie die Fahrbahn nach der Räumung und Streuung auszusehen hat [5]. Die Sicherheit der Straßennutzer hat in jedem Fall Vorrang, daher müssen Standards eingehalten werden, damit es nicht zu Ausfällen oder gar Haftungsproblemen in Unfallsituationen kommt.

RVS 12.04.11 Winterdienst [6]

Die RVS Winterdienst beschreibt die Vorkehrungen und Arbeiten, die während der winterlichen Straßenverhältnisse durchgeführt und eingehalten werden müssen. Darin werden nicht nur die Maßnahmen beschrieben, sondern es werden alle Begriffe, die mit dem Winterdienst zu tun haben, erklärt, sodass sie dort nachgeschlagen werden können. Genauer werden die Straßenkategorien, Einflussfaktoren, die Organisation und Ausstattung der Straßenmeistereien und die genaue Gliederung der Aufgaben beschrieben.

RVS 12.04.12 Schneeräumung und Streuung [7]

Diese RVS enthält Erklärungen zu den Grundsätzen und Grundlagen, zu der Dokumentation, den Schneeräumungsmaßnahmen (Geräte und Arten) und der Streuung (Pläne, Streumittel,

Streugeräte und Anwendungen). Im Anhang finden sich noch genaue Ausführungen zu den verschiedenen Winterdienstkategorien.

RVS 12.04.15 Minimierung von Umweltauswirkungen beim Einsatz von Streumitteln im Winterdienst [8]

Auch in dieser RVS werden nach den Begriffserklärungen die Grundlagen des Winterdienstes und der Streumittel näher betrachtet. Am Ende werden Empfehlungen zur Streumittelbeschaffung, der Streumenge, der Streumittel und zur Handhabung der Arbeitsfahrzeuge gegeben.

RVS 12.04.16 Streumittel [9]

In dieser RVS werden alle Begriffe rund um den Oberbegriff Streumittel erläutert. Es werden genaue Definitionen zu der Art der Räumung, Streumittel und Streuung gegeben. Um die eingesetzten Produkte beurteilen zu können, werden die genauen Anforderungen, Eigenschaften und Zusammensetzungen der einzelnen Streumittel erläutert. In Österreich gelten besonders detaillierte Anforderungen für das verwendete $NaCl$, $CaCl_2$ und $MgCl_2$ (Tab. 1).

Tabelle 1: Anforderungen an die Streumittel [9]

Mittel	Anforderungen
$NaCl$	Trockensubstanz min. 97,5 M.-% Geringer Anteil an unlöslichen Stoffen Kleine Körner wirken schneller Max. Korngröße 3,15 mm 5 % Überkorn bis 5,0 mm ist akzeptabel Unterkorn < 0,125 mm darf nicht höher als 5 % sein Eisetzbar bis ca. -10 °C
$CaCl_2$	Gehalt min. 77 M.-% Schuppen nicht größer als 8 mm Stark hygroskopisch Überdosierung führt zur Griffigkeitsherabsetzung Einsetzbar bis ca. -20 °C
$MgCl_2$	Gehalt min. 47 M.-% Schuppen nicht größer als 8 mm Stark hygroskopisch Überdosierung führt zur Griffigkeitsherabsetzung Einsetzbar bis ca. -15 °C

Des Weiteren enthält die RVS Vorlagen für Handzettel zur Qualitätsprüfung und die Qualitätsmerkmale, sodass eine eigene Überprüfung der Anforderungen und Kriterien für Natur/Umwelt, Nutzer und Betreiber möglich ist.

1.2. Zielsetzungen der Arbeit

Die Ziele der Arbeit sind die Optimierung und die Bestimmung der Wiederholbarkeit der drei Laborversuche (siehe 1.3 Versuchstypen), das Verfassen einer jeweiligen Arbeitsanweisung und die Auswertung der Daten für die drei Versuchstypen (siehe 1.3 Versuchstypen). Dafür wird nicht nur das meist eingesetzte Natriumchlorid ($NaCl$) untersucht, sondern auch Calciumchlorid ($CaCl_2$) und Magnesiumchlorid ($MgCl_2$). Die beiden Letztgenannten werden im Winterdienst in geringerem Umfang eingesetzt, da sie nur bei bestimmten

Witterungsverhältnissen benötigt werden. Zur Erstellung eines umfassenden Bewertungshintergrunds werden alle drei Taumittel getestet. Diese durch die Diplomarbeit gesammelten und zusammengefassten Daten sollen die Grundlage einer standardisierten Versuchsdurchführung und einer künftigen RVS bilden.

1.3. Versuchstypen

Gefrierpunktverlauf

In diesem Versuch wird der Gefrierpunkt der drei Taumittel in Abhängigkeit der Sole-Konzentrationen im Klimaschrank bestimmt.

Tauwirksamkeit fester Taumittel

In diesem Versuch wird die Tauwirksamkeit von Natriumchlorid ($NaCl$) in fester Form in Abhängigkeit der Temperatur und verschiedener Kornklassen unter Berücksichtigung der Zeit betrachtet.

Tauwirksamkeit flüssiger Taumittel

In diesem Versuch wird die Tauwirksamkeit der drei Taumittel in flüssiger Form (Sole) in Abhängigkeit der Temperatur und der Konzentration unter Berücksichtigung der Zeit betrachtet.

2. Allgemeine Grundlagen des Winterdienstes und der Salzstreuung

Winterdienst bedeutet die Sicherstellung der Befahrbarkeit, Unfallvorsorge und Verkehrssicherheit der Straßen im Winter. Dieser Zustand wird zum einen durch die mechanische Beseitigung von Schnee (Schneeräumung) und zum anderen durch das Streuen von Streumitteln zur Erhaltung der Griffigkeit erreicht. Die Griffigkeit wird durch den Reibungsbeiwert μ, der sich aus den horizontalen Reibungskräften und der Anpressung durch das Fahrzeug zusammensetzt, ausgedrückt (Formel 1) [2]:

$$\mu = \frac{H}{N} \qquad (1)$$

H… Horizontalkraft, die am Körper zieht

N… Normalkraft, die den Körper auf den Boden drückt

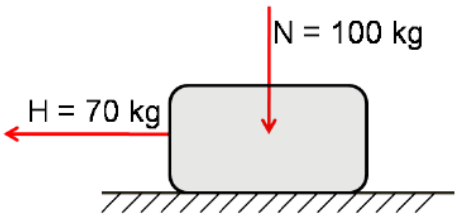


Abbildung 2: Griffigkeitsbeiwert [2]

Der Reibungsbeiwert hängt von der Textur der Fahrbahn, Verschmutzungen, dem Reifentyp und dem Zustand der Fahrbahn (trocken, nass oder Schnee) ab. Die folgende Tabelle 2 zeigt die Reibungsbeiwerte, die auf B+L-Straßen bei einer Geschwindigkeit v_{85} während der verschiedenen Witterungsverhältnisse herrschen [3]. v_{85} beschreibt die Geschwindigkeit, die von 85% der PKW-Fahrer, bei freier Fahrt und nicht verschmutzter Fahrbahn, nicht überschritten wird.

Tabelle 2: Reibungsbeiwert bei verschiedenen Fahrbahnzuständen

Fahrbahnzustand	**Reibungsbeiwert μ**
Trockene Fahrbahn	≥ 0,6
Nasse Fahrbahn	≥ 0,4
Schneefahrbahn	≥ 0,1
Eisfahrbahn	≥ 0,05

Die Griffigkeit hängt nicht nur von dem Straßenzustand, sondern auch von der Filmdicke zwischen Reifen und Fahrbahn ab. Dieser Film entsteht durch Wasser, Schnee und Eis und führt je nach Dicke zu einer anderen Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn. Je geringer diese Kontaktfläche ist, desto schlechter ist die Reibung zwischen dem Fahrbahnbelag und dem Reifen und der Bremsweg erhöht sich (Abb. 3). Der ungünstigste Fall sind große Wasserfilmdicken, die durch Spurrinnen entstehen und zu Aquaplaning führen. Bei Schneefahrbahn ist gar kein Kontakt mehr gegeben und die Griffigkeit wird auf $\mu \leq 0{,}2$ herabgesetzt. Im Fall des Aquaplanings und der Schneefahrbahn muss die Geschwindigkeit stark reduziert werden, damit eine sichere Benutzbarkeit der Fahrbahn gegeben ist. [2]

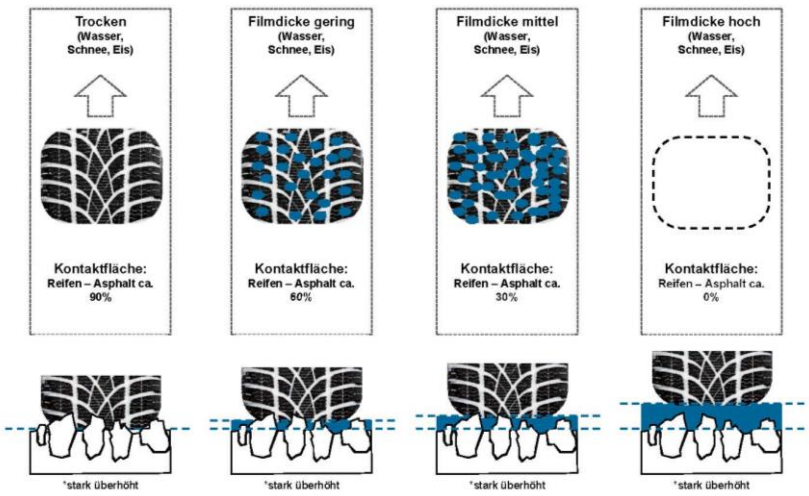


Abbildung 3: Einfluss der Wasserfilmdicke zwischen Reifen und Fahrbahn [2]

Damit Griffigkeit und eine gute Befahrbarkeit gewährleistet werden können, erstellt die Straßenmeisterei je nach Wetterbeobachtungen einen Räumplan für die jeweiligen Straßenkategorien, der die DTV (durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge) und den LKW-Anteil berücksichtigt und in der RVS 12.04.12 geregelt ist [6]. Dazu werden zuerst die Straßen nach den Winterdienstkategorien (Tab. 3) eingeteilt, da die einzelnen Straßenkategorien verschiedene Anforderungen und einen unterschiedlichen Streubedarf besitzen. Durch diese gezielte Planung werden die Streuumlaufzeiten minimiert und Leerfahrten vermieden. Für den urbanen Bereich gelten eigene Winterdienstkategorien [3].

Tabelle 3: Anforderungsniveau für den Winterdienst, Bundes- und Landesstraßen, Winterdienstkategorien A bis D [7]

	Winterdienstkategorie A	B	C	D
	Autobahnen, Schnellstraßen u. deren Netzschluss	**Landesstraßen mit überörtlicher Verkehrsbedeutung oder mit einer Verkehrsstärke von JDTV > 5.000 Kfz/24h**	**Landesstraßen mit einer Verkehrsstärke von 1000 < JDTV < 5.000 Kfz/24h**	**Landesstraßen mit einer Verkehrsstärke von JDTV < 1.000 Kfz/24h**
Wettersituation, Straßenzustand				
1. Gefahr von Reifglätte oder Eisglätte	Eine Kontrollfahrt pro Tag	Eine Kontrollfahrt pro Tag	Eine Kontrollfahrt pro Tag	Kontrollfahrt nach Bedarf
2. Leichter Schneefall, Schnee- und Eisglätte, leichte Schneeverwehungen	Befahrbarkeit der durchgehenden Fahrstreifen, Anschlussstellen und Zufahrten zu Rasthäusern. Streuung mit Auftaumitteln – Schwarzräumung. Räumung mit Intervallen, in denen Schneehöhen bis 10 cm auftreten können.	Befahrbarkeit; Streuung vorwiegend mit Auftaumitteln. Schneehöhen bis 10 cm können auftreten. Beeinträchtigungen zwischen 22 und 6 Uhr können nicht ausgeschlossen werden.	Befahrbarkeit; Streuung mit Auftaumitteln oder mit Splitt. Schneehöhen bis 10 cm können auftreten. Stärkere Beeinträchtigungen zwischen 20 und 7 Uhr und an Wochenenden bzw. Feiertagen können nicht ausgeschlossen werden.	Befahrbarkeit; Streuung mit Splitt oder Auftaumitteln. Stärkere Beeinträchtigungen können nicht ausgeschlossen werden.
3. Starker Schneefall, Schneeverwehungen	Befahrbarkeit mindestens eines Fahrstreifens je Fahrtrichtung sowie der Anschlussstellen und der Zufahrten zu Rasthäusern von 0 bis 24 Uhr. Streuung mit Auftaumitteln – Schwarzräumung ist anzustreben. Schneefahrbahnen können auftreten. Benützbarkeit der Parkplätze und Abstellstreifen ist nicht gewährleistet. Befahrbarkeit notfalls mit Schneeketten.	Befahrbarkeit mindestens eines Fahrstreifens je Fahrtrichtung. Streuung vorwiegend mit Auftaumitteln. Stärkere Beeinträchtigungen fallweise durch Schneehöhen über 10 cm möglich; Befahrbarkeit notfalls mit Schneeketten.	Befahrbarkeit mindestens eines Fahrstreifens je Fahrtrichtung. Streuung mit Auftaumitteln oder mit Splitt. Stärkere Beeinträchtigungen durch Schneehöhen über 10 cm möglich; Befahrbarkeit notfalls mit Schneeketten.	Befahrbarkeit mindestens eines Fahrstreifens mit Ausweichen, notfalls mit Schneeketten. Streuung mit Splitt oder Auftaumitteln. Räumung ab Schneehöhen von 10 cm (8 bis 20 Uhr).
		Falls Splittstreuung, dann erst nach Abschluss der Schneeräumung		
4. Starke Schneeverwehungen, Lawinen, extremes Glatteis (z.B. Eisregen), Katastrophen	Die Befahrbarkeit kann nicht gewährleistet werden. Bei außergewöhnlich großen Schneehöhen, starken Schneeverwehungen und Lawinen ist die Befahrbarkeit bis zur Beseitigung der Schneemassen nicht gewährleistet. Vorübergehende Straßensperren können auftreten. Dies gilt sinngemäß auch für extremes Glatteis, z.B. bei Eisregen, wenn das Eis mit den vorhandenen Mitteln nicht unmittelbar beseitigt werden kann. Informationen erfolgen durch die Medien und die Exekutive.			
Winterdienstbetreuungszeitraum	0 bis 24 Uhr Räum- und Streuintervalle nach Erfordernis	4 bis 22 Uhr Räum- und Streuintervalle nach Erfordernis	5 bis 20 Uhr Räum- und Streuintervalle nach Erfordernis	8 bis 20 Uhr Räum- und Streuintervalle nach Erfordernis
Umlaufzeit eines Winterdiensteinsatzes	max. 3 Stunden	max. 5 Stunden	max. 5 Stunden	—
Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen	Arbeiten zur Wiederherstellung der Erkennbarkeit, Lesbarkeit und Funktionstüchtigkeit von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen sowie das Freimachen von Sichtfeldern werden erst nach Abschluss der Nachräumarbeiten durchgeführt. Beeinträchtigungen können nicht ausgeschlossen werden.			

Erläuterungen:

Befahrbarkeit: Für Kraftfahrzeuge mit Winterausrüstung ist die Benützung der Straßen möglich.

Winterdienstbetreuungszeitraum: Beschreibt den Beginn und das Ende der winterdienstlichen Einsatzmaßnahmen.

Umlaufzeit: Zeitraum zwischen einem Einsatz und einem neuerlichen Einsatz auf derselben Stelle während des Winterdienstbetreuungszeitraumes.

Starker Schneefall: Neuschneehöhe beträgt in einem Zeitraum von 3 Stunden mehr als 10 cm.

Allgemein zählen Sand, Gesteinskörnungen, Asche und Auftausalze zu den verschiedenen Streumittelarten, die bei winterlichen Verhältnissen die Griffigkeit erhöhen [10]. Allerdings darf Asche aus umwelttechnischen Gründen hierzulande nicht eingesetzt werden (ggf. im Privatgebrauch) und die anderen Streumittel werden in abstumpfende und auftauende Streumittel (siehe Kapitel 2.1 und 2.2) unterteilt. Zur Arbeit des Winterdienstes gehören

nicht nur die Schneeräumung und das Streuen von Streumitteln, sondern auch die Vor- und Nachbereitung durch die Straßenmeisterei. So müssen Schneestangen und Gefahrenzeichen auf- und abgebaut, die Verkehrsflächen von Splitt befreit, die eigenen Fahrzeuge gewartet und instandgehalten und die Pflüge und Streumittel eingelagert werden [3].

Auch aus wirtschaftlichen Gründen ist eine gute und vorrausschauende Planung des Winterdienstes notwendig. Wurde im Vorfeld nicht genügend Taumittel eingekauft oder ist die Winterperiode sehr lang, ist es in der Vergangenheit schon zu Salzknappheit ($NaCl$) gekommen. In dieser Zeit steigen die Preise pro Tonne auf ein 2,5faches an.

2.1. Abstumpfende Streumittel

Abstumpfende Streumittel (gebrochener Naturstein) werden nur auf weniger befahrenen Straßen (< 1.000 KFZ pro Tag [11]) sowie Rad- und Fußwegen verwendet. Dieses Mittel tauen das Eis jedoch nicht auf, sondern „stumpfen“ die Glätte nur ab. Dadurch, dass z.B. Splitt nicht so schnell wie bspw. Sand in den Schnee oder das Eis eingedrückt wird und eine Verbindung zwischen Reifen und Eis erzeugt [2], wird die Rutschgefahr gedämmt und die Griffigkeit sofort erhöht. Meist werden daher Kies, Splitte oder Schotter (ab 2 mm Korngröße, jedoch meist 4/8 [9]) aufgrund ihrer kantigen Oberfläche verwendet und nach dem Winter wieder aufgefegt, gereinigt und im Straßenbau weiterverwendet [12]. Allerdings sollte auch beachtet werden, dass es gerade bei Splitten durch den Abrieb und die Aufwirbelung zu einer Feinstaubproblematik kommen kann und die Splitte nach einer Winterperiode deponiert werden müssen. Insgesamt sind die Kosten mit 10-30€ pro Tonne recht gering, die Streumengen mit 50-300g/m² sehr hoch und die Liegedauer sehr gering. Aber die Entsorgungs- und Aufbereitungskosten sind mit 80-100 € pro Tonne vergleichsweise hoch [2]. Bereits nach einer Überrollung von 400 KFZ befindet sich kaum noch abstumpfendes Streumittel auf der Fahrbahn, da die groben Körner durch die Fahrzeuge aus der Rollspur gedrückt und abgetragen werden (Abb. 4) [3]. Daher sind abstumpfende Streumittel in großem Umfang nicht wirtschaftlich.

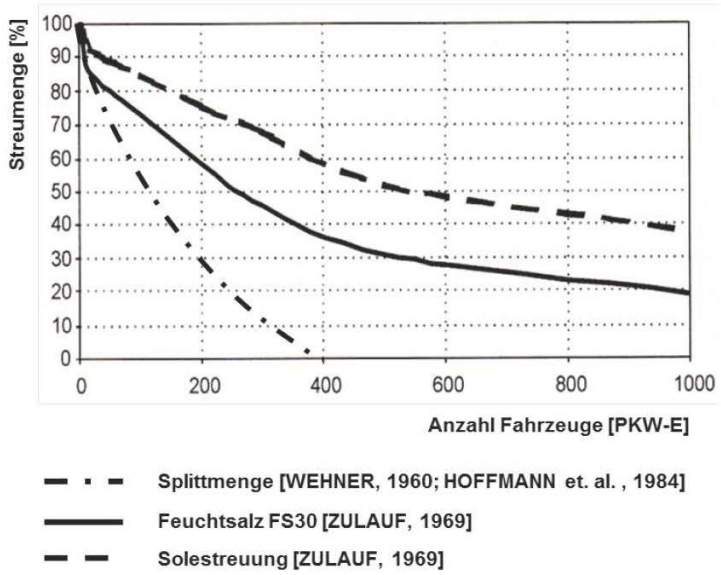


Abbildung 4: Abtragung von Splitt und Salz [2]

2.2. Auftauende Streumittel

Als auftauendes Streumittel wird österreichweit hauptsächlich Natriumchlorid eingesetzt. Natriumchlorid liegt nach der Gewinnung in Form eines trockenen Salzes vor. Trockenes Salz wird aber sehr schnell von der Fahrbahn durch die Überrollung der Fahrzeuge abgetragen, vom Wind verweht oder ist bei starkem Niederschlag kaum noch einsetzbar. Aufgrund der besseren Liegedauer wird stattdessen eine Feuchtsalzstreuung mit Sole durchgeführt, da diese durch ihren Wasseranteil schneller zur gewünschten Tauwirkung führt und die benötigte Menge an Salz verringert wird, da die kleinen Salzkörner durch die Sole besser aneinander haften und eine größere Fläche bilden [9]. Die Tauwirkung wird dadurch erzielt, dass Salzpartikel sich in dem Wassergemisch (Sole = wässrige Lösung) lösen und dieses Gemisch einen niedrigeren Gefrierpunkt als das Eis hat. Wassermoleküle aus dem Eis lösen sich und vermischen sich mit der Sole. Der Gefrierpunkt der Sole steigt wieder mit der Menge des getauten Eises und muss ausreichend gemischt sein, damit es bei weiteren Niederschlägen nicht zur erneuten Eisbildung kommt [13]. Daher kann es in manchen Fällen das Problem geben, dass zwei Streuintervalle zu nah hintereinander erfolgen und es zu einer Übersättigung zwischen der bereits auf der Fahrbahn vorhandenen Sole und der neu aufgetragenen kommt, da in der Zwischenzeit kaum neuer Schnee gefallen ist. Durch die Übersättigung der Sole kommt es zu keinem weiteren Tauvorgang, auch wenn gestreut wurde, der Schneematsch gefriert wieder und senkt die Griffigkeit herab [2]. Es sollte daher auf die richtige Dosierung geachtet werden und diese muss an die aktuellen

Wetterverhältnisse, die Verkehrsmenge und die Temperatur angepasst werden. Der Einsatzbereich von Natriumchlorid liegt bei -10°C, daher sind bei tieferen Temperaturen Calciumchlorid und Magnesiumchlorid vorzuziehen. Calciumchlorid ist allerdings viermal so teuer wie Natriumchlorid [11].

Der große Nachteil auftauender Streumittel liegt in der Umweltschädigung, da die Salze durch Schmelzwasser in den Boden gelangen. Die Konzentration der Natrium- und Chloridionen steigt und verändert die Bodenstruktur. Die Vegetation kann angegriffen und Gewässer können verunreinigt werden [13].

Die Kosten sind mit 90€ pro Tonne Natriumchlorid sehr hoch, allerdings ist die Streumenge mit 5-40g/m² viel geringer und das Feuchtsalz ist selbst nach 1000 KFZ Überrollungen noch zu 20% auf der Fahrbahn vorhanden. Unterschieden wird noch in feines Siedesalz, das rutschiger ist, länger zum Tauen braucht und durch seine Feinheit viel Oberfläche für chemische Reaktion beanspruchen kann. Das gröbere Steinsalz hingegen taut von unten und löst das Eis und den Schnee durch die Bildung eines Trennfilms von der Fahrbahn [3].

2.3 Zu betrachtende Streumittel

$\underline{NaCl}$

Natriumchlorid (Speisesalz oder Kochsalz) ist in großen Mengen in Steinsalzlagerstätten und im Meerwasser vorhanden und wird auch aus diesen beiden Vorkommen gewonnen. Hauptproduzent ist mittlerweile China, wobei die USA direkt dahinter folgen. Österreich produzierte im Jahr 2006 rund 0,77 Tonnen, was ca. 0,3% der weltweiten Gesamtproduktion ausmacht [14]. Die hergestellten Produkte durch die Salzgewinnung sind Sole, Steinsalz, Siedesalz und Meersalz, wobei Letzteres nur in Küstengebieten hergestellt wird. In den folgenden Versuchen wird nur mit Stein- und Siedesalz gearbeitet.

$NaCl$ besteht aus farblosen, geruchlosen Kristallen, die gut wasserlöslich sind. Es kommt zu einem Phasengleichgewicht (eutektisches Gemisch), wenn eine Lösung mit 23,4% gemischt wird. Wie in der folgenden Abbildung 5 zu sehen ist, erstarrt das eutektische Gemisch (die Sole friert) bei -21,3 °C (Kryohydrat), seinem tiefsten Punkt im Phasendiagramm [14].

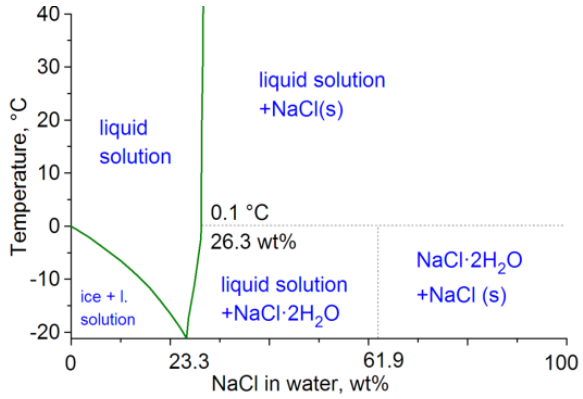


Abbildung 5: Phasendiagramm einer NaCl-Lösung [14]

$\underline{CaCl_2}$

Aus dem Erdalkalimetall Calcium wird das Salz Calciumchlorid gewonnen. In natürlicher Form kommt es in gelöster Form in Salzsolen vor. Die farblosen Kristalle des Calciumchlorids nehmen sehr leicht Feuchtigkeit und Wasser aus ihrer Umgebung auf und dies kann zu einer Nichtverwendbarkeit führen. Für die Fahrer der Streufahrzeuge kann es schnell zu Verwirrungen kommen, da das aufgebrachte Calciumchlorid wie ein nasser Film auf der Fahrbahn aussieht. Aber dieser Wasserfilm wurde erst durch die Streuung verursacht und es kommt nicht zum Gefrieren desselben [2]. Kommt Calciumchlorid mit größeren Mengen an Wasser in Kontakt, so reagiert es exotherm (Energie = Wärme wird an die Umgebung abgegeben) [15]. Um Reaktionen vorzubeugen und das Gefrieren während des Transports zu verhindern, wird Calciumchlorid nur als Feuchtsalzstreuung FS30 (70% Salz und 30% Sole) aufgetragen. Calciumchlorid wird deshalb in geringerem Umfang verwendet, da es stark hygroskopisch (wasseranziehend), deutlich aggressiver und viermal teurer (ca. 250-310 € pro Tonne [2]) als Natriumchlorid ist [5].

$\underline{MgCl_2}$

In Salzsäure findet man das Magnesiumchlorid als Magnesiumsalz vor. Auch in der Natur kommt es in Mineralen (Bischofit) und im Meerwasser vor. Die Herstellung erfolgt durch Eindampfen. Auch Magnesiumchlorid nimmt Feuchtigkeit aus seiner Umgebung auf und reagiert unter sehr großer exothermer Reaktion. [16] Für Magnesiumchlorid gelten die gleichen Nachteile wie für Calciumchlorid. Mit ca. 180-220€ pro Tonne ist auch dieses Taumittel doppelt so teuer wie Natriumchlorid [2]. Allerdings haftet das Magnesiumchlorid besser, besitzt eine sehr rasche Tauwirkung und der maximal Einsatzbereich liegt tiefer als bei Natrium- und Calciumchlorid.

2.4. Weitere Streumittel und Streumaterialien

Weltweit gibt es verschiedene Projekte, die der Findung alternativer Streumittel dienen. So wurden auch z.B. in Kanada verschiedene Untersuchungen zu alternativen Streumitteln, die kein Salz enthalten, gemacht. Dazu wurden dort Sand, Asche, Katzensteu und EcoTraction betrachtet und getestet. Im Folgenden zeigt ein kleiner Überblick die verschiedenen alternativen Produkte samt deren Wirkung aus Kanada und Österreich.

EcoTraction

Dieses Produkt besteht aus vulkanischem Material und wird bereits eingesetzt, da es viele Vorteile bietet. Es sorgt für mehr Zugkraft als Sand, bettet sich besser in Eis und Schnee und hat dadurch eine längere Liegezeit. Es werden nur geringe Mengen benötigt und es ist bei jeder Außentemperatur zu verwenden. Dazu ist es noch umweltfreundlich und beschädigt keine Betonoberflächen [18]. Dennoch wird es nicht in großem Rahmen eingesetzt, da seine Anwendung ob seines hohen Preises nicht wirtschaftlich ist.

Asche

Asche wird nur für das Streuen auf Wegen, Geh- und Radwegen nur von Privatpersonen auf deren eigenen Grundstücken verwendet, da der Einsatz nicht erlaubt ist. Meist besitzen Privatpersonen einen Kamin zu Hause und verwenden die dort übrig gebliebene Asche. Die Asche sorgt für Zugkraft und bringt das Eis durch die Absorption des Sonnenlichts schnell zum Schmelzen [17].

Harnstoff

Harnstoffe sind organische Verbindungen, die im Urin von vielen Lebewesen enthalten sind. In Reinform ist der Harnstoff kristallin, weiß und ungiftig. Als salzfreies Ersatzstreumittel ist er aber nicht wirtschaftlich, da er zu teuer ist und bereits bei -10°C seinen Gefrierpunkt hat [19]. Des Weiteren können die Bestandteile des Harnstoffs zu einer schädigenden Überdüngung des Bodens führen. In Wien ist sein Einsatz verboten [13].

Ammoniumsulfat

Ammoniumsulfat hat nur eine geringe hygroskopische Eigenschaft [20] und der Gefrierpunkt liegt bei -18,5 °C. Aber auch dieser Stoff führt zur Überdüngung und wird daher nicht weiter eingesetzt [13].

Safecote

Safecote ist ein Nebenprodukt der Zuckerherstellung und ist eine zähe, dunkelbraune Flüssigkeit, deren Hauptbestandteile Stärke und Zucker sind. Der Vorteil der Zuckermelasse ist, dass es die Karosserien nicht angreift [11]. In einem Projekt der TU Wien und der ASFINAG stellte sich heraus, dass das Produkt nicht wirtschaftlich ist, es Probleme mit den Geräten gibt und es nur eine unbefriedigende Wirkung hat [13].

Reste von Weintrauben und Granulat aus Maiskolben

Zu diesen beiden Alternativstoffen werden gerade Versuche in Wien durchgeführt. Aber auch diese erweisen sich bisher als keine geeignete Alternative, da sich auslösende organische Kohlenstoffe negativ auf die Flora und Fauna auswirken [13].

Insgesamt ist zu sagen, dass es viele Forschungsprojekte zu Salzalternativen gibt, diese sich aber auf Grund von zu hohen Kosten, fehlenden Maschinen oder weil sie nicht die gewünschte Tauwirksamkeit erzielen, nicht durchgesetzt haben. Dennoch geht die Forschung in diesem Bereich weiter und es werden neue alternative „Stoffe“ entwickelt und getestet.

3. Laborversuche

Für die Untersuchung von auftauenden Streumitteln werden die drei verschiedenen Taumittel (siehe 2.3, „zu betrachtende Streumittel“) mit ihren spezifischen chemischen Eigenschaften untersucht. Alle Versuche werden im Klimaschrank (Abb. 6) mit Hilfe von PE-Handschuhen durchgeführt, da dadurch der Klimaschrank während des ganzen Versuchs geschlossen bleiben und eine konstante Temperatur gehalten werden kann.

Abbildung 6: Klimaschrank

In den Versuchen wird das jeweilige Taumittel mit verschiedenen Konzentrationen bei unterschiedlichen Temperaturen getestet. Die folgende Abbildung 7 zeigt den Gefrierpunktverlauf und den maximalen Wirkungsbereich der drei unterschiedlichen Taumittel.

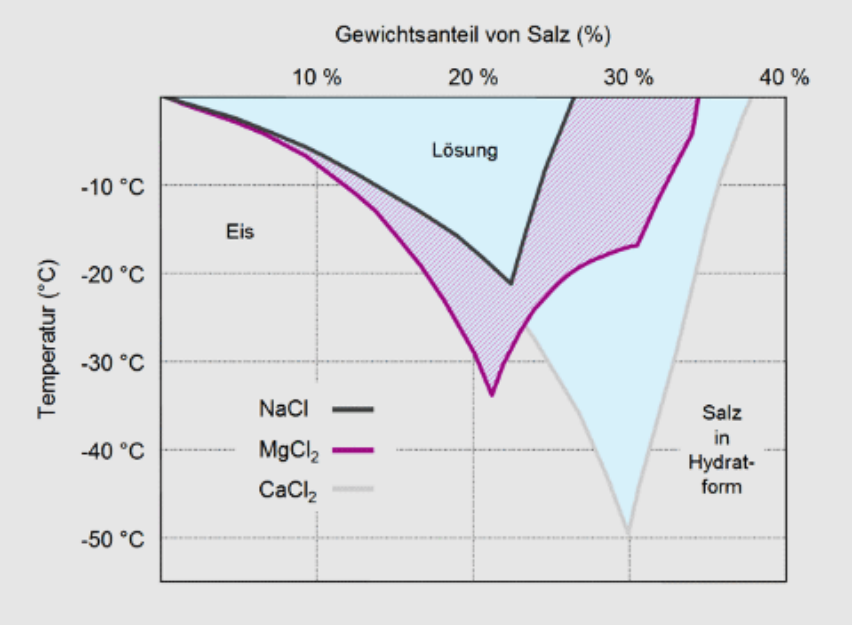


Abbildung 7: Wirkungsbereiche der drei Taumittel [21]

In der Abbildung ist zu erkennen, dass der Gefrierpunktverlauf jedes Taumittels eine Spitze besitzt, der die maximale Einsatztemperatur beschreibt. Diese ist der sogenannte eutektische Punkt, der eine Mischphase zum Übergang in einen flüssigen Zustand darstellt. Nachdem sich dieser Punkt eingestellt hat, sinken die maximale Einsatztemperatur mit steigender Konzentration immer weiter ab. In der folgenden Tabelle 4 sind die eutektischen Punkte und die damit verbundenen maximalen Konzentrationen einmal zusammengefasst.

Tabelle 4: Eutektische Punkte [Abb. 7]

Taumittel	Eutektischer Punkt	Gewichtsanteil von Salz
$NaCl$	ca. -21 °C	ca. 23,4 %
$CaCl_2$	ca. -50 °C	ca. 30,2 %
$MgCl_2$	ca. -33 °C	ca. 21,4 %

Daher müssen auch die Taumittel und deren Konzentrationen anhand dieser Erkenntnis gewählt werden, da es über dem eutektischen Punkt hinaus zu geringeren Wirkungstemperatur kommt.

3.1. Gefrierpunktverlauf

In diesem Versuch werden die Gefrierpunkte der jeweiligen Taumittel ($NaCl$, $CaCl_2$ und $MgCl_2$) in Abhängigkeit von der gewählten Konzentration untersucht. In der RVS 12.04.12

sind Temperaturen und die damit empfohlenen Einsatzbereiche für die einzelnen Taumittel definiert (Tab. 5).

Tabelle 5: Empfohlene Einsatzbereiche der Taumittel [9]

Taumittel	**Max. Einsatz-temperatur**
$NaCl$	-10 °C
$CaCl_2$	-20 °C
$MgCl_2$	-15 °C

3.1.1. Zweck

Um einen Zusammenhang zwischen Gefrierpunkt und Taumittelkonzentration zu untersuchen, werden die Konzentrationen der Streumittel bis zu ihren eutektischen Punkten (Punkt der vollständigen Sättigung, siehe Abb. 7) gewählt. Durch diesen Versuch können die benötigten Streumengen genauer ermittelt und dosiert werden, Salzmengen und Kosten können eingespart und genauere Streu- und Einsatzpläne erstellt werden, da die Wirkungsbereiche bekannt sind.

Da verschiedene Szenarien getestet werden sollen, werden Solekonzentrationen unter und bis zum eutektischen Punkt getestet (Tab. 6).

Tabelle 6: Verwendete Solekonzentrationen

Taumittel	**Solekonzentration**							
$NaCl$	3%	6%	9%	12%	15%	18%	21%	23,4%
$CaCl_2$	3%	6%	9%	12%	15%	18%	21%	25%
$MgCl_2$	2,6%	5,2%	7,8%	10,4%	13,0%	15,6%	18,2%	21,4%

3.1.2. Geräte und Versuchsaufbau

Der Gefrierpunktversuch wird im geschlossenen Klimaschrank bei -45°C durchgeführt. Im Klimaschrank ist ein Datenlogger angebracht, der die Luftfeuchtigkeit und Temperatur während des gesamten Versuchs aufzeichnet. Der Versuch wird parallel in acht Kunststoffflaschen durchgeführt, die mit verschiedenen Solekonzentrationen (Gemisch aus Leitungswasser und Salz) befüllt sind. Die Kunststoffflaschen sind zur

Temperaturbestimmung mit je einem Temperaturfühler ausgestattet und auch an Datenlogger mit je vier Kanälen angeschlossen, die alle 15 Sekunden einen Wert aufzeichnen. Alle Datenlogger befinden sich außerhalb des Klimaschranks und die Verbindungskabel werden durch seitliche Öffnungen nach draußen geführt. Ehe der Versuch beginnen kann, muss der Klimaschrank bereits auf -45°C heruntergekühlt sein, damit es während der Aufzeichnung nicht zu zwei Haltepunkten kommt, da das Kühlen im tiefen Temperaturbereich nur sehr langsam vorangeht. Das Aufstellen der Kunststoffflaschen erfolgt in versetzter Form (Zick-Zack, Abb. 8) mit gleichen Abständen von mindestens 7,5cm zueinander und zur Außenwand auf der mittleren Ebene des Klimaschranks.

Abbildung 8: Versuchsaufbau bei geöffnetem Klimaschrank

3.1.3. Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung und gerade der Mischvorgang der verschiedenen Salze unterscheiden sich ein wenig, da $CaCl_2$ und $MgCl_2$ beim Mischen mit Wasser stark exotherm reagieren. Daher müssen gesonderte Gefäße zum Mischen verwendet und Schutzmaßnahmen getroffen werden.

Durchführung für nicht exotherm reagierende Stoffe ($NaCl$)

Die Arbeiten werden bei Zimmertemperatur durchgeführt und zur Einwaage wird eine Waage mit einer Genauigkeit von 0,01g verwendet. Die Kunststoffflaschen werden im ersten Schritt mit 375 ml ±10 ml Leitungswasser befüllt und der genaue Wert wird in den

Handzettel (siehe Anhang) eingetragen. Das Mischen der verschiedenen Solekonzentrationen, die vorher festgelegt worden sind, erfolgt auf Basis der Berechnungen mit folgender Formel:

(2)

$$SM = \frac{\frac{SK}{100} \cdot WM}{1 - \frac{SK}{100}}$$

SM – Salzmenge in [g]

SK – Solenkonzentration in [M-%]

WM – Wassermenge in [g]

Die „Salz-Soll"-Menge wurde errechnet und die „Salz-IST"-Menge wird nach dem Einwiegen wieder in den Handzettel eingetragen, damit die „Sole-IST"-Konzentration bestimmt werden kann, falls zu viel Salz eingewogen wurde.

Durchführung für exotherm reagierende Stoffe ($CaCl_2$ und $MgCl_2$)

Die Arbeiten werden bei Zimmertemperatur unter einem Abzug zur Vermeidung der Wärme- und Dampfentwicklung durchgeführt. Zur Einwaage wird eine Waage mit einer Genauigkeit von 0,01g verwendet, die direkt unter dem Abzug positioniert ist. Auf Grund der großen Wärmeentwicklungen wird zum Mischen ein Erlenmeyerkolben verwendet, der anschließend einfach abgekühlt werden kann. Damit die exotherme Reaktion während des Mischvorgangs nicht zu groß ist, wird für diese Stoffe der Mischvorgang verändert. Die Wassermenge wird mit 375 ml ±10 ml festgelegt und die Berechnung der Salzmenge erfolgt mit Formel (2).

Der errechnete „Salz-Soll"-Wert wird in den Handzettel eingetragen und im nächsten Schritt wird zuerst das Salz mit Hilfe eines Trichters in dem Erlenmeyerkolben eingewogen. Mit der tatsächlich eingewogenen „Salz-IST" Menge wird die „Wasser-SOLL"-Menge noch einmal errechnet, falls zu viel Salz eingewogen wurde. Das Wasser wird dann sehr langsam unter dem Abzug in den Erlenmeyerkolben gegeben und es ist darauf zu achten, dass dieser nicht überkocht. Damit die „Sole-IST"-Konzentration bestimmt werden kann, wird die tatsächlich eingefüllte Wassermenge nach dem Einwiegen auf dem Handzettel eingetragen. Nach dem Mischvorgang kann der Erlenmeyerkolben in einem Wasserbad gekühlt werden und später

in gesonderte dickere Kunststoffflaschen abgefüllt werden. In diesen Flaschen kann die Solelösung weiter auskühlen, ehe sie in die Flaschen für den Versuch umgefüllt wird.

Die Kunststoffflaschen für den Versuch werden mit Deckeln verschlossen, in denen die Temperaturfühler befestigt sind, die mit dem Fühlerköpfchen zu 7,5cm in die Solelösung ragen. Die einzelnen Temperaturfühler sind an zwei außenliegende Datenlogger angeschlossen, die im vorbestimmten Intervall die Temperatur und Luftfeuchtigkeit aufzeichnen. Später werden die aufgezeichneten Werte am Computer ausgelesen und ausgewertet.

Ehe die befüllten Kunststoffflaschen in den Klimaschrank gestellt werden, muss dieser bereits auf -45°C gekühlt sein. Andernfalls kommt es zu einem Stopp des Gefriervorgangs kommt und es werden fälschlicherweise quasi zwei Gefrierpunkte aufgezeichnet. Damit sich die Flaschen nicht gegenseitig beim Gefriervorgang beeinflussen, werden sie in versetzter Reihenfolge auf der mittleren Schiene des Klimaschranks aufgebaut.

Die genaue Versuchsdurchführung ist der Arbeitsanweisung „Bestimmung des Gefrierpunktverlaufs von Lösungen in Abhängigkeit der Konzentration“ im Anhang zu entnehmen.

3.2. Tauwirksamkeit fester Taumittel

Der Versuch für die realitätsnahe Abbildung der Streuvorgänge wird in diesem Fall für $NaCl$ durchgeführt.

Das Salz wird in verschiedene Kornklassen bis zur maximalen Größe (gemäß RVS 12.04.16) unterteilt und bei folgenden Einwirkdauern (240, 120, 90, 60, 30, 20, 10, 5, 2 Minuten) bei je vier verschiedenen Temperaturen, die die Außentemperatur darstellen, getestet (Tab. 7).

Tabelle 7: Korngrößen- und Temperatureinteilungen

Kornklassen	**0,125/1,0**	**1,0/3,15**	**3,15/5,0**
Temperatur [°C]	-2,5	-2,5	-2,5
	-5,0	-5,0	-5,0
	-7,5	-7,5	-7,5
	-10,0	-10,0	-10,0

Die Temperaturen für diesen Versuch sind entsprechend der häufigsten Bereiche des Schneefalls gewählt. Für alle Höhenlagen (0-300m, 300-600m und 600-900m) gelten dieselben Bereiche (2 bis -3°C) für den häufigsten Schneefall. In der folgenden Abbildung 9 ist dies am Beispiel von 300-600m dargestellt. Der Versuch wird bis maximal -10°C durchgeführt, da in Abbildung 9 zu erkennen ist, dass ab diesem Punkt kaum noch Schnee fällt.

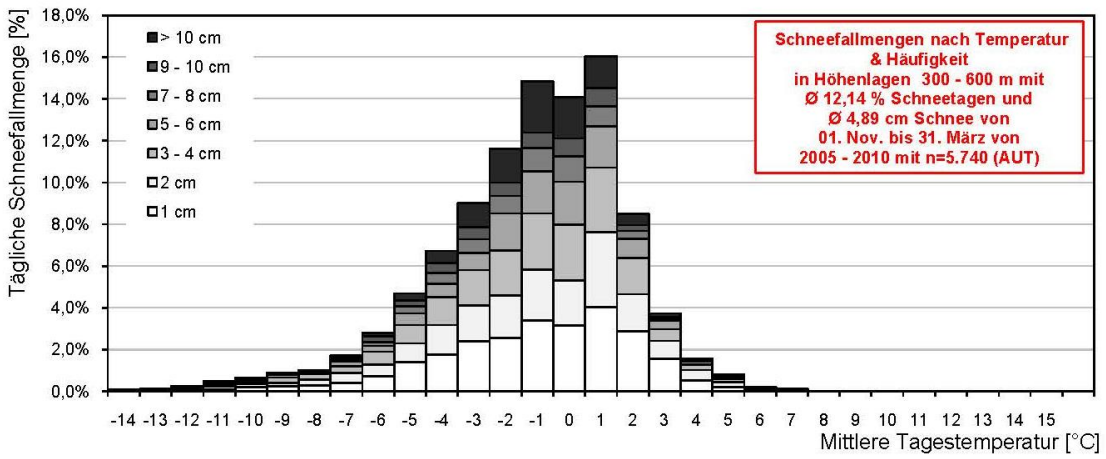


Abbildung 9:Auswertung Schneefallereignisse 2005-2010 [2]

3.2.1. Zweck

Die Tauwirksamkeit eines Taumittels während einer vorgegebenen Zeit ist die wichtigste Eigenschaft, mit der der Streu- und Tauvorgang realitätsnah abgebildet werden kann. Der Versuch zeigt, wie viel Eis in der vorgegebenen Zeit in Abhängigkeit von der Kornklasse und der Temperatur geschmolzen werden kann. Die Korngröße beeinflusst die Schnelligkeit und den Wirkungsbeginn des Taumittels. Diese Eigenschaft wird vor allem in gefährlichen Situationen benötigt und ausgenutzt, um eine schnelle Besserung der Witterungsverhältnisse erzielt. Durch die unterschiedlichen Kornklassen können verschiedene Tausalze bei gleicher Temperatur und Einwirkzeit miteinander verglichen werden.

Dabei bedeuten z.B. kleinere Korngrößen, dass das Salz eine größere spezifische Oberfläche bildet und schneller zu tauen beginnt. Der Schmelzvorgang findet daher flächiger statt und die Eisschicht wird von oben abgetaut. Die spezifische Fläche großer Körner ist sehr gering und daher tauen sie nicht flächendeckend, sondern tauen an einem Punkt bis in tiefere Schichten des Eises. Reicht der Tauvorgang der großen Körner bis zum Bodenbelag, bildet er

durch die horizontale Ausbreitung einen horizontalen Trennfilm zwischen Bodenbelag und Eis. Der Einsatz solch großer Körner wird meist bei sehr festgefahrenen Flächen durchgeführt, da der Vorteil der Trennfilmbildung genutzt wird, um das Eis mit dem nächsten Räumzyklus zu beseitigen [2]. Die unterschiedlichen Wirkungsweisen der Korngrößen werden in Abbildung 10 grafisch dargestellt.

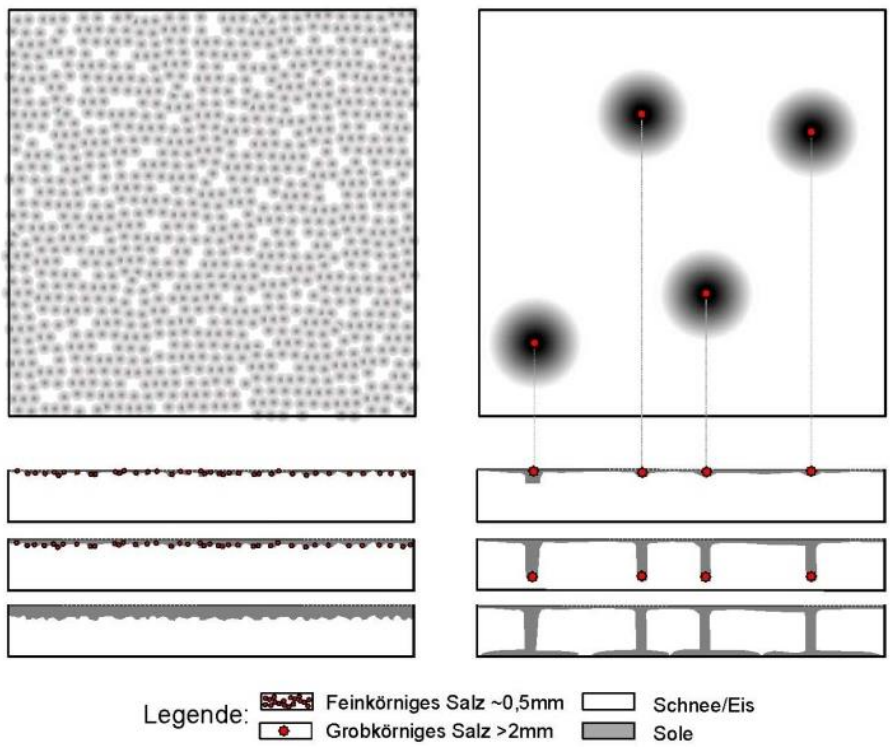


Abbildung 10: Wirkung von kleinen und großen Salzkörnern [2]

Insgesamt bedeutet eine höhere Tauwirksamkeit, dass zur gleichen Wirkung eine geringere Salzmenge eingesetzt werden muss. Dies wirkt sich in wirtschaftlicher Hinsicht positiv für den Straßenbetreiber aus und ist besser für die Umwelt.

3.2.2. Geräte und Versuchsaufbau

Die Tauwirksamkeitsversuche werden im Klimaschrank durchgeführt, damit eine konstante und gleichbleibende Temperatur gewährleistet werden kann. Es werden pro Versuch neun Metallschalen mit Leitungswasser befüllt, gemäß der Skizze in Abbildung 11 im Klimaschrank positioniert, und über Nacht gefroren. Das Salz wird schon vor dem Gefrierprozess abgewogen und in kleine Metalldosen abgefüllt, damit der Vorgang des Abwiegens nicht noch zusätzlich im Klimaschrank stattfinden muss. Des Weiteren werden eine elektronische

Waage, ein Metallgefäß zum Abgießen des getauten Eises und eine Plastikkiste zum Entsorgen der nicht mehr gebrauchten Gegenstände benötigt (Abb. 12).

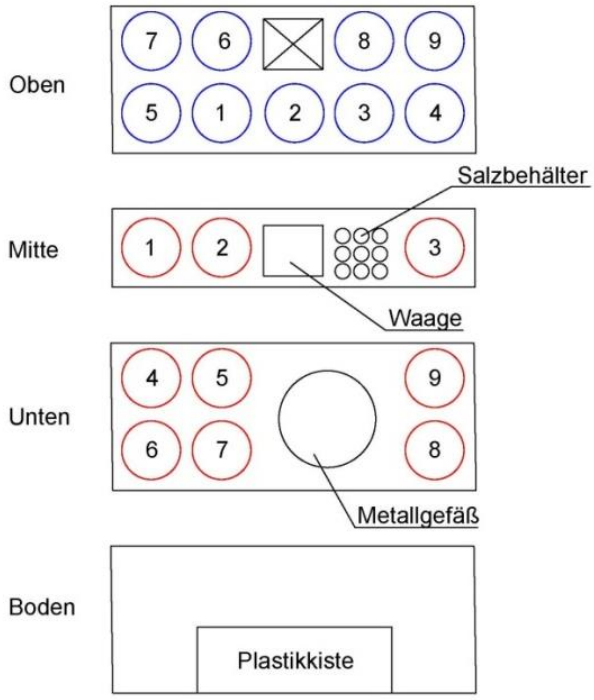


Abbildung 11: Versuchsaufbau für eine Doppelbestimmung (Skizze)

Abbildung 12: Versuchsaufbau bei geöffnetem Klimaschrank

3.2.3. Versuchsdurchführung

Der Versuch kann in Einzel- oder Doppelbestimmung durchgeführt werden: Es werden pro Versuch neun Metallschalen (Doppelbestimmung: 18 Metallschalen) mit je 500 ml ± 5 ml Leitungswasser gefüllt, entsprechend im Klimaschrank positioniert und über Nacht bei

gewählter Versuchstemperatur gefroren. Von dem zu testenden Salz werden 10,1 g abgewogen, da immer ein kleiner Rest in der Metalldose verbleiben kann und in kleine Metalldosen abgefüllt. Damit der Arbeitsschritt des Abwiegens nicht noch zusätzlich im Klimaschrank stattfinden muss bzw. im geschlossenen Klimaschrank sehr umständlich ist, wird das Salz schon zu Beginn des Versuchs (mit Start des Gefriervorgangs) im Klimaschrank positioniert, damit der runtergekühlte Klimaschrank nicht noch einmal geöffnet werden muss. Ist das Wasser in den Metallschalen komplett gefroren, kann mit dem Versuch begonnen werden.

Es wird mit der ersten Metallschale begonnen, indem sie gewogen und das Gewicht im Handzettel (in der Arbeitsanweisung zu finden) unter „Gewicht Wasser inkl. Schale“ notiert wird. Dann wird eine kleine Metalldose geöffnet, das Salz gleichmäßig auf der eben gewogenen Eisplatte verteilt, diese dann erneut gewogen und das neue Gewicht unter „Gewicht Wasser inkl. Schale + Salz“ notiert. Mit dem Auftragen des Salzes beginnt die Einwirkungsdauer des Salzes (zwischen 2 und 240 Minuten). Dazu wird im Handzettel die Startzeit unter „Uhrzeit-Beginn“ und der Endzeitpunkt unter „Uhrzeit-Ende SOLL“ vermerkt. Ist die Einwirkdauer erreicht, wird das getaute Eis-Sole-Gemisch in das Metallgefäß abgekippt, die Schale wird erneut gewogen und das Gewicht unter „Gewicht nach Tauwirkung inkl. Schale“ in der dazugehörigen Spalte im Handzettel eingetragen. Auf Grund der Gewichte von „Gewicht Wasser inkl. Schale + Salz“ und „Gewicht nach Tauwirkung inkl. Schale“ kann nun das „Gewicht der abgegossenen Sole“ errechnet werden. Jeder Probekörper wird nur einmal verwendet, da der bereits eingesetzte Tauvorgang auch nach dem Abgießen der Sole weiter voran schreitet, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die komplette Sole abgegossen wird. Die genaue Versuchsdurchführung ist der Arbeitsanweisung „Bestimmung der Tauwirksamkeit von Trockensalz“ im Anhang zu entnehmen.

3.3 Tauwirksamkeit flüssiger Taumittel

In dem Versuch zur Tauwirksamkeit flüssiger Taumittel soll die realitätsnahe Abbildung der Solestreuung, in diesem Fall nur für $NaCl$ und $CaCl_2$, untersucht werden. Für diese Versuche werden verschieden konzentrierte Solelösungen hergestellt und bei folgenden Einwirkdauern (240, 120, 90, 60, 30, 20, 10, 5, 2 Minuten) bei je drei verschiedenen Temperaturen getestet (Tab. 8, Prüfprogramm).

Tabelle 8: Prüfprogramm

Temp.	**Solelösung**			
-2,5 °C	$NaCl$ 20%	$NaCl$ 24%	$CaCl_2$ 20%	$CaCl_2$ 30%
-5,0 °C	$NaCl$ 20%	$NaCl$ 24%	$CaCl_2$ 20%	$CaCl_2$ 30%
-10,0 °C	$NaCl$ 20%	$NaCl$ 24%	$CaCl_2$ 20%	$CaCl_2$ 30%

Die drei Temperaturen dieses Versuchs entsprechen, wie in Kapitel 3.2 „Tauwirksamkeit fester Taumittel“, den häufigsten Bereichen des Schneefalls.

3.3.1. Zweck

Wie auch schon für die festen Taumittel ist die Tauwirksamkeit eines flüssigen Taumittels während einer bestimmten Zeit dessen wichtigste Eigenschaft. Auch dieser Versuch zeigt, wie viel Eis während einer festgelegten Zeit in Abhängigkeit von der Solekonzentration geschmolzen werden kann. Daher bedeutet auch hier eine höhere Tauwirksamkeit, dass geringere Salzmengen zur selben Wirkung eingesetzt werden können und Einsparungen in wirtschaftlicher und umwelttechnischer Sicht gemacht werden können.

3.3.2. Geräte und Versuchsaufbau

Auch die Tauwirksamkeitsversuche mit flüssigen Taumitteln werden im geschlossenen Klimaschrank durchgeführt, damit eine konstante und gleichbleibende Temperatur gewährleistet werden kann. Es werden pro Versuch neun Metallschalen mit Leitungswasser nahezu bis zum Rand befüllt (gemäß der Skizze in Abb. 13), im Klimaschrank positioniert und über Nacht gefroren.

Die kleinen Metallschalen werden nicht komplett mit Wasser befüllt, da auf sie ein Deckel mit einer formenden Vertiefung aufgesetzt wird. Der Deckel bewirkt, dass sich eine Eisfläche mit einer Vertiefung bildet, die später der Sole eine gleichmäßig ebene Fläche bietet.

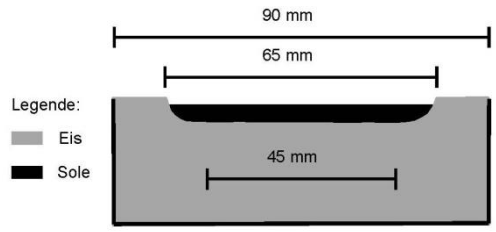


Abbildung 13: Skizze der verwendeten Metallschalen [2]

Die Sole wird angemischt, in kleine Einwegspritzen mit je 10 ml aufgezogen und vor dem Gefrierprozess im Klimaschrank positioniert, damit sie die gewünschte Umgebungstemperatur annimmt. Die Spritzen sorgen für die gewünschte Dosierung und ein leichtes Auftragen der Sole. Des Weiteren werden eine elektronische Waage, ein Metallgefäß zum Abgießen des getauten Eis-Sole-Gemisches und eine Plastikkiste zum Entsorgen der nicht mehr gebrauchten Gegenstände benötigt.

3.3.3. Versuchsdurchführung

Auch dieser Versuch kann in Einzel- oder Doppelbestimmung durchgeführt werden, allerdings bietet sich auf Grund des geringen Platzbedarfs eine Doppelbestimmung an. Zu Beginn werden pro Versuch neun Metallschalen (Doppelbestimmung: 18 Metallschalen) fast bis zum Gefäßrand mit Leitungswasser gefüllt, anschließend mit einem Deckel verschlossen, im Klimaschrank positioniert, die Solelösungen vorbereitet und über Nacht bei eingangs gewählter Versuchstemperatur gefroren. Die Solelösungen werden entsprechend der gewählten Solekonzentration und der Menge an Einwegspritzen hergestellt. In einem Erlenmeyerkolben wird eine Wassermenge von 220 ml ± 2ml (reicht für 22 Einwegspritzen mit je 10 ml) eingewogen und die errechnete Menge (siehe Formel (2)) an Salz hinzugegeben.

Auch für diesen Versuch ist die Reaktion der exothermen Stoffe zu beachten und ebenfalls erst das Salz einzuwiegen (siehe 3.1.1.3 „Versuchsdurchführung – Durchführung für exotherm reagierende Stoffe“).

Um eine gut vermischte Solelösung herzustellen, wird diese nach der Einwaage im Erlenmeyerkolben belassen, ggf. abgekühlt und mit Hilfe eines Magnetrührers gemischt. Anschließend wird die Sole zu je 10 ml in Einwegspritzen aufgezogen und an dieser Stelle

sollten zur Sicherheit mehr als die benötigte Anzahl an Spritzen aufgezogen werden. Auch die Spritzen werden vor Beginn des Versuchs (mit Start des Gefriervorgangs) im Klimaschrank positioniert. Ist das Wasser in den Metallschalen komplett gefroren, kann mit dem Versuch begonnen werden, indem der Klimaschrank kurz geöffnet wird und die Deckel der Dosen entfernt werden. Anschließend wird der Klimaschrank geschlossen und die Proben werden erneut 2-3 Stunden gefroren, da durch den Kälteverlust beim Öffnen das Eis an einigen Stellen leicht angetaut sein kann.

Es wird mit der ersten Metallschale begonnen, indem sie gewogen und das Gewicht im Handzettel (in der Arbeitsanweisung zu finden) unter „Gewicht Wasser inkl. Schale“ notiert wird. Dann wird die Sole einer Einwegspritze in die Vertiefung der Eisoberfläche gegeben, diese dann erneut gewogen und das neue Gewicht unter „Gewicht Wasser inkl. Schale + Salz“ notiert. Mit der Zugabe der Sole beginnt die Einwirkungsdauer des Salzes (zwischen 2 und 240 Minuten). Dazu wird im Handzettel die Startzeit unter „Uhrzeit-Beginn“ und der Endzeitpunkt unter „Uhrzeit-Ende SOLL“ vermerkt. Ist die Einwirkdauer erreicht, wird das getaute Eis-Sole-Gemisch in das Metallgefäß abgekippt, die Schale wird erneut gewogen und das Gewicht unter „Gewicht nach Tauwirkung inkl. Schale“ in der dazugehörigen Spalte im Handzettel eingetragen. Auf Grund der Gewichte von „Gewicht Wasser inkl. Schale + Salz“ und „Gewicht nach Tauwirkung inkl. Schale“ kann nun das „Gewicht der abgegossenen Sole“ errechnet werden. Jeder Probekörper wird nur einmal verwendet, da der bereits eingesetzte Tauvorgang auch nach dem Abgießen der Sole weiter voran schreitet, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die komplette Sole abgegossen wird.

Die genaue Versuchsdurchführung ist der Arbeitsanweisung „Bestimmung der Tauwirksamkeit von flüssigen Taumitteln“ im Anhang zu entnehmen.

4. Auswertung & Ergebnisse

4.1. Gefrierpunktverlauf

Auswertungsmethode

Durch eine Regressionsanalyse soll der Zusammenhang zwischen der Sole-Konzentration und dem Gefrierpunkt ermittelt werden und das Bestimmtheitsmaß soll zeigen, wie gut der Zusammenhang mit Hilfe einer Regressionsgeraden dargestellt werden kann.

Der genaue Gefrierpunkt der einzelnen Sole-Lösungen kann mittels einer Häufigkeitsverteilung genauer ermittelt werden. Diese gibt an, wie oft eine Gefrierpunkttemperatur aufgetreten ist. Der Gefrierpunkt ist statistisch betrachtet schließlich der Wert, der am häufigsten gemessen wurde. Zur Kontrolle der Werte kann der Gefrierpunkt grafisch ausgewertet werden. Dies geschieht an Hand der Temperaturverläufe, die mit Hilfe der Datenlogger aufgezeichnet worden sind. Der Gefrierpunkt liegt an der Stelle, an der die Kurve annähernd in die Horizontale übergeht und ein kleines Halteplateau besitzt (Abb.14 (a)). Der Prozess, dass die Temperatur einer Flüssigkeit unter ihren Gefrierpunkt sinkt ohne zu gefrieren, wird „Super Cooling“ genannt und der Gefrierpunkt befindet sich nach diesem Punkt (Abb. 14 (b)).

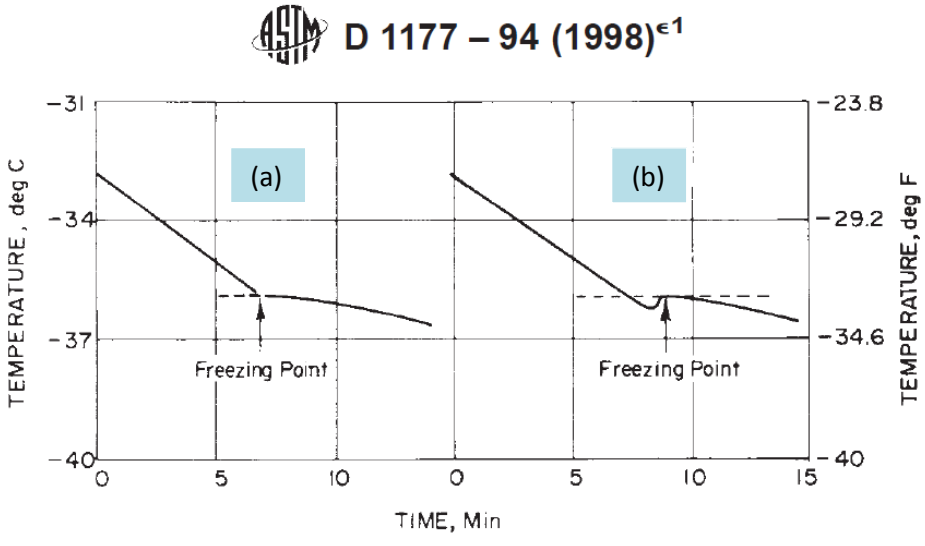


Abbildung 14: Ermittlung des Gefrierpunkts [2]

Im weiteren Verlauf der Kurve sinkt diese immer weiter ab, da die Temperatur im Klimaschrank unterhalb des Gefrierpunkts liegt. In den folgenden Abbildungen 15 & 16 sind die Gefrierpunkte beispielhaft für Natriumchlorid sowohl mit Hilfe einer Häufigkeitsverteilung als auch grafisch dargestellt.

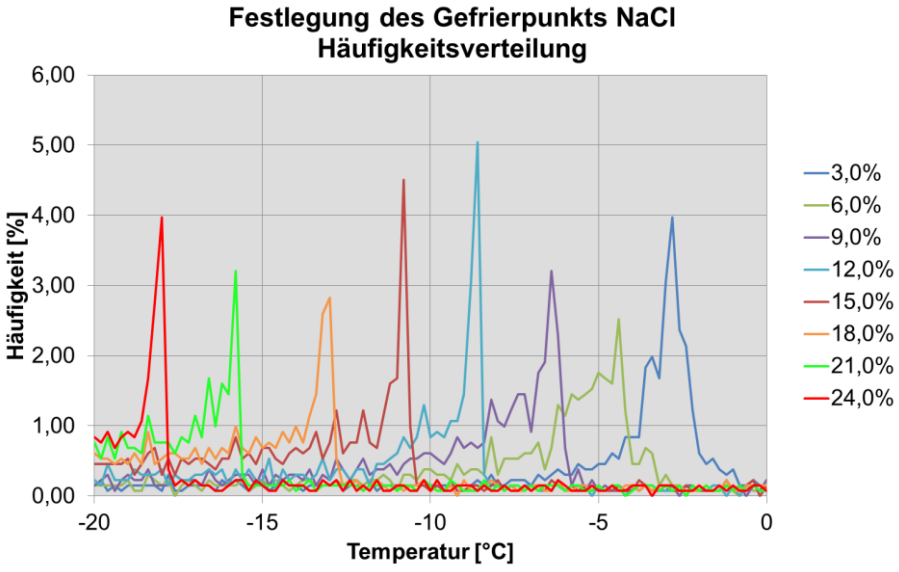


Abbildung 15: Bestimmung des Gefrierpunktes von NaCl durch eine Häufigkeitsverteilung

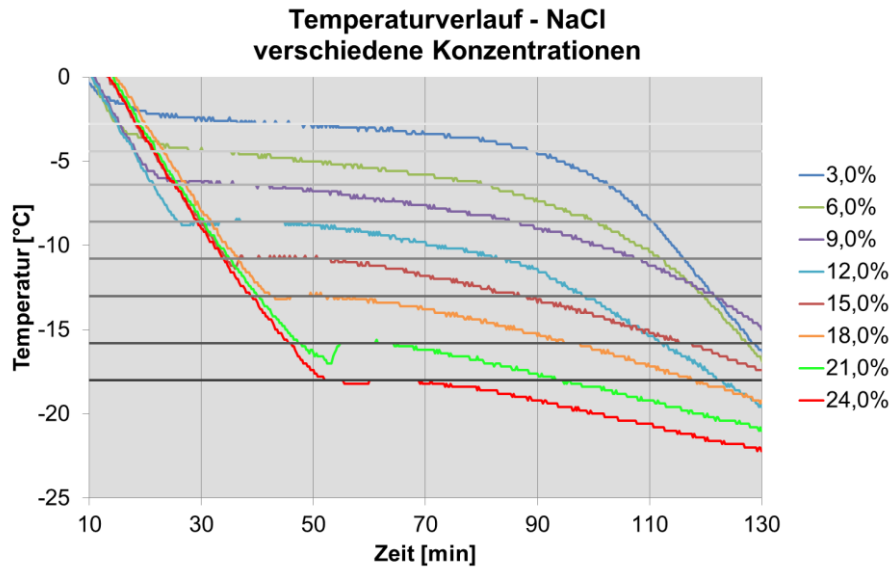


Abbildung 16: Grafische Bestimmung der Gefrierpunkte von NaCl

Ergebnisse

Eine Regressionsanalyse zeigt, dass der Zusammenhang zwischen der Sole-Konzentration der verschiedenen Taumittel und ihrem Gefrierpunkt sehr gut durch ein Polynom 3. Ordnung beschrieben werden kann. In den Abbildungen 17-19 sind die Gefrierpunktverläufe aller Taumittel durch die Mittelwerte, eine 95%ige Konfidenz und eine Regressionsgerade mit ihren jeweiligen Gütemaßen abgebildet ($R^2 > 0{,}9936$).

Die Gefrierpunkte der getesteten Taumittelkonzentrationen können bis zu ihrem eutektischen Punkt in einem Gefrierpunktverlauf dargestellt werden. Würden

Konzentrationen über diesen Punkt hinaus getestet werden, so würde die Funktion, die mit einem Polynom dritter Ordnung dargestellt wird, in eine horizontale Linie übergehen.

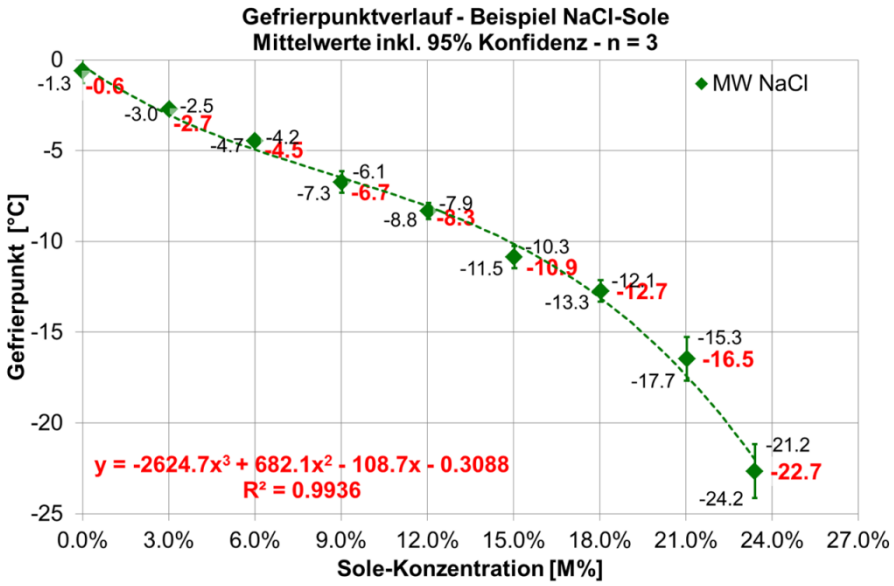


Abbildung 17: Gefrierpunktverlauf NaCl

Für Natriumchlorid (Abb. 17) ist zu erkennen, dass das 95%ige Konfidenzintervall die Mittelwerte der zu erwartenden Gefrierpunkte um max. ± 1,5 °C über- bzw. unterschreitet. Durch das Polynom 3. Ordnung werden mit einem Bestimmtheitsmaß von R^2 = 0,9936 (> 99%) nahezu alle Mittelwerte erfasst.

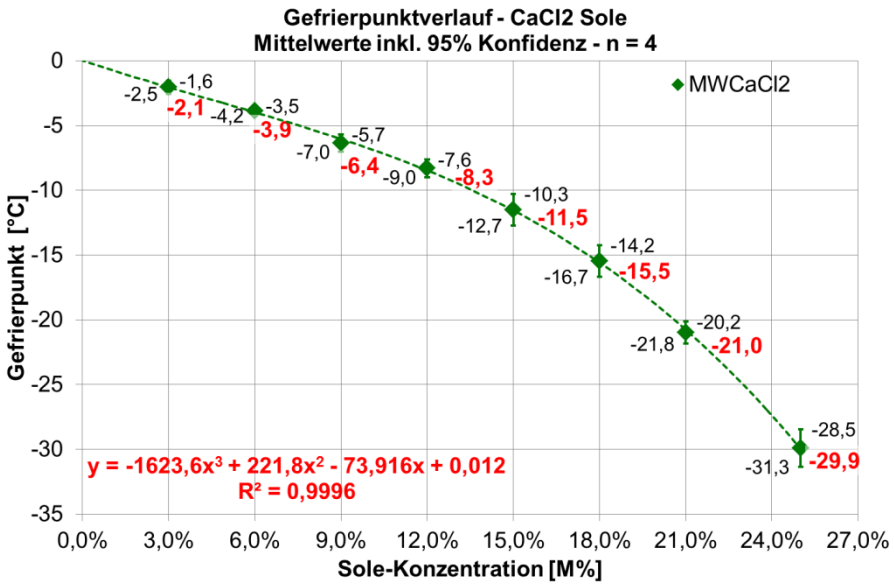


Abbildung 18: Gefrierpunktverlauf CaCl

Der Gefrierpunktverlauf von Calciumchlorid (Abb. 17) wird durch die Regressionsgerade am besten dargestellt. R^2 = 0,9996 (> 99,9%) lässt auf einen nahezu linearen Verlauf schließen. Die maximale Temperaturdifferenz des Konfidenzintervalls beträgt in diesem Fall max. ± 1,4 °C und zeigt eine im Vergleich zur Regressionsanalyse des Gefrierpunktverlaufs von NaCl höhere Genauigkeit an.

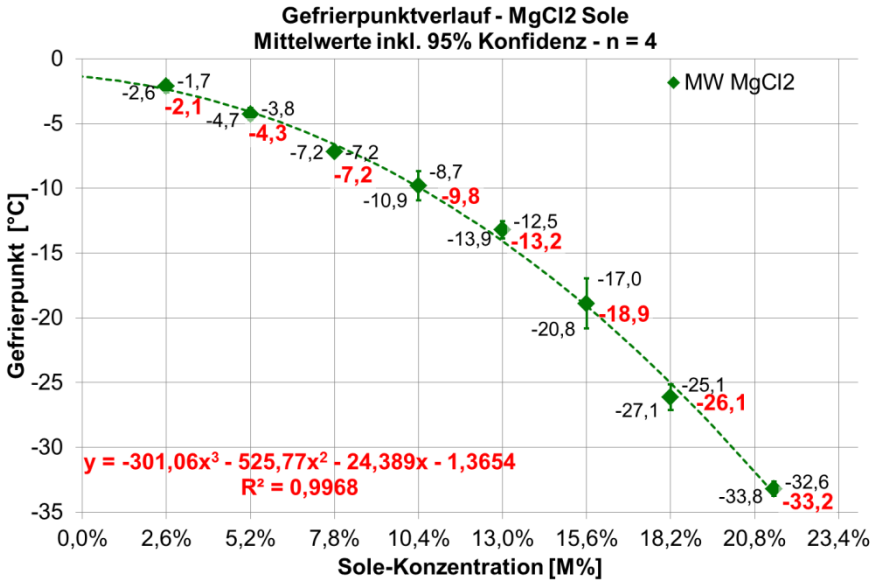


Abbildung 19: Gefrierpunktverlauf MgCl

Mit einer Temperaturdifferenz von ± 1,7 °C ist das 95%ige Konfidenzintervall gering und die Regressionsgerade des Magnesiumchlorids (Abb. 18) zeigt mit R^2 = 0,9968 (>99,6%) an, dass nahezu alle Mittelwerte auf der Geraden liegen.

4.2. Tauwirksamkeit fester Taumittel

Auswertungsmethoden

Nach der Tauwirksamkeit: Die TW ist definiert durch die Arbeit pro Zeiteinheit und kann durch die folgende Formel ausgedrückt werden:

$$TW = \frac{W}{t} \qquad (3)$$

W – Arbeit [J]

t – Zeiteinheit [min]

Eignungskriterien für auftauende Streumittel

Nach der Taurate: Die TR ist definiert als die nach der Zeit abgeleitete Tauwirksamkeit und wird durch folgende Formel ausgedrückt:

$$TR = \frac{d\,TW}{dt} \tag{4}$$

dTW – Tauwirksamkeit

dt – Ableitung nach der Zeit

t-Test

Mit Hilfe des t-Tests [22] werden jeweils zwei Stichproben der gleichen Konzentrationen miteinander verglichen. Zudem werden die Unterschiede innerhalb einer Stichprobe zwischen den gewählten Einwirkzeiten auf Signifikanz untersucht. Für die Versuche wurde ein typisches Signifikanzniveau α<= 0,05 gewählt. Da der Versuchsumfang recht groß ist, werden im Folgenden einige Fälle beispielhaft beschrieben.

- **Kornklasse 0,125/1,0 (Tab. 9)**

t-Test zum Vergleich von -2,5°C und -10,0°C: Für das Steinsalz zeigt sich in den Einwirkzeiten ab 5 Minuten ein signifikanter Unterschied. Nur bei den Einwirkzeiten von 2 Minuten zeigt sich – vermutlich auf Grund der geringen Einwirkzeit – kein signifikanter Unterschied.
t-Test zum Vergleich von -5,0°C und -10,0°C: Nur bei den Einwirkzeiten von 10 Minuten zeigt sich kein signifikanter Unterschied.

Bei allen anderen Temperaturvergleichen liegt ein signifikanter Unterschied meist erst ab einer Einwirkzeit von mehr als 60 Minuten vor.

t-Test bezüglich der kurzen Einwirkzeiten: Hinsichtlich der Einwirkzeiten ergeben sich bei -5,0°C, -7,5°C und -10,0°C für Zeiträume zwischen 2 und 10 Minuten keine signifikanten Unterschiede (α>0,05).
t-Test bezüglich der längeren Einwirkzeiten: Es ergeben sich keine signifikanten Unterschiede (α>0,05) ab mehr als 60 Minuten Einwirkzeit.

Tabelle 9: t-Test für 0,125/1,0

Einwirk-dauer	Vergleich -2,5°C und -5,0°C α	Vergleich -2,5°C und -7,5°C α	Vergleich -2,5°C und -10,0°C α	Vergleich -5,0°C und -7,5°C α	Vergleich -5,0°C und -10,0°C α	Vergleich -7,5°C und -10,0°C α
240	0,0001	0,0000	0,0000	0,0013	0,0000	0,0025
120	0,0008	0,0000	0,0001	0,0042	0,0016	0,0351
90	0,0189	0,0020	0,0006	0,0251	0,0012	0,0098
60	0,5581	0,0904	0,0067	0,2535	0,0309	0,1528
30	0,1662	0,0465	0,0061	0,0928	0,0069	0,4366
20	0,6869	0,2052	0,0020	0,2942	0,0205	0,3835
10	0,0115	0,0288	0,0104	0,5711	0,3482	0,8848
5	0,3319	0,0050	0,0023	0,0442	0,0267	0,7394
2	0,4259	0,1166	0,0593	0,0135	0,0070	0,3476

Vergleich Einwirk-dauer	bei -2,5°C α	bei -5,0°C α	bei -7,5°C α	bei -10,0°C α
240/120	0,0005	0,0003	0,0052	0,0605
120/90	0,0712	0,0670	0,0197	0,0268
90/60	0,1068	0,8879	0,4312	0,0323
60/30	0,0467	0,0122	0,0121	0,0016
30/20	0,0235	0,0474	0,5819	0,4500
20/10	0,0487	0,0012	0,0296	0,0046
10/5	0,0116	0,1014	0,0878	0,0299
5/2	0,0084	0,0748	0,0946	0,0502

- **Kornklasse 1,0/3,15 (Tab. 10)**

t-Test zum Vergleich von -2,5°C und -5,0°C bzw. -2,5°C und -7,5°C: Es zeigen sich nur bei Einwirkzeiten von 30, 90 und 120 Minuten signifikante Unterschiede.

t-Test zum Vergleich von -5,0°C und -10,0°C: Führt hier zu jeder Einwirkzeit zu signifikanten Unterschieden mit $\alpha < 0,05$.

t-Test zum Vergleich von -2,5°C und -10,0°C bzw. -5,0°C und -7,5°C bzw. -7,5°C und -10,0°C: Hier kommt es nur in den Einwirkzeiten zwischen 30 und 240 Minuten zu keinen signifikanten Unterschieden.

t-Test bezüglich der Einwirkzeiten bei -2,5°C: Im mittleren Bereich zwischen 10 und 90 Minuten gibt es bei allen Prüftemperaturen keine signifikanten Unterschiede ($\alpha > 0,05$). Die Einwirkzeit von 2 Minuten wird trotz des nicht signifikanten Unterschiedes bei -10,0°C nicht weiter berücksichtigt, da die Einwirkzeit vermutlich zu gering ist.

Tabelle 10: t-Test für 1,0/3,15

Einwirk-dauer	Vergleich -2,5°C und -5,0°C α	Vergleich -2,5°C und -7,5°C α	Vergleich -2,5°C und -10,0°C α	Vergleich -5,0°C und -7,5°C α	Vergleich -5,0°C und -10,0°C α	Vergleich -7,5°C und -10,0°C α
240	0,1709	0,0077	0,0009	0,0013	0,0000	0,0067
120	0,0409	0,0001	0,0000	0,0004	0,0000	0,0001
90	0,0425	0,0012	0,0002	0,0014	0,0000	0,0232
60	0,2576	0,0717	0,0001	0,0285	0,0001	0,0083
30	0,0344	0,0055	0,0001	0,1999	0,0056	0,0685
20	0,3346	0,2927	0,0543	0,0359	0,0037	0,1947
10	0,4348	0,4626	0,0195	0,0003	0,0001	0,0008
5	0,2479	0,0322	0,0010	0,0364	0,0030	0,0193
2	0,8358	0,0612	0,0078	0,0139	0,0028	0,0201

Vergleich Einwirk-dauer	bei -2,5°C α	bei -5,0°C α	bei -7,5°C α	bei -10,0°C α
240/120	0,0531	0,0014	0,0074	0,0267
120/90	0,0124	0,0015	0,0021	0,0004
90/60	0,0999	0,1104	0,3949	0,0177
60/30	0,0019	0,0006	0,0134	0,0810
30/20	0,0077	0,5139	0,1319	0,1702
20/10	0,0527	0,0027	0,0809	0,0418
10/5	0,0150	0,0001	0,0000	0,0102
5/2	0,0184	0,0117	0,0086	0,2560

- **<u>Kornklasse 3,15/5,0 (Tab. 11)</u>**

<u>t-Test zum Vergleich von -2,5°C und -5,0°C bzw. -2,5°C und -7,5°C:</u>

- Im Vergleich von -2,5°C mit -5,0°C zeigt sich – vermutlich auf Grund der geringen Einwirkzeit – bei den Einwirkzeiten von 2 und 5 Minuten kein signifikanter Unterschied.
- Genau dasselbe zeigt sich für den Vergleich von -2,5°C und -7,5°C im Einwirkbereich von 5 Minuten.

<u>t-Test zum Vergleich von -5,0°C und -7,5°C:</u> Der Vergleich bei -5,0°C und -7,5°C der Einwirkzeiten 5 und 20 Minuten und bei 60 Minuten zeigt keine signifikanten Unterschiede.

<u>t-Test zum Vergleich von -2,5°C und -10,0°C bzw. -5,0°C und -10,0°C:</u> Das Siedesalz führt hier zu jeder Einwirkzeit zu signifikanten Unterschieden mit $\alpha < 0,05$.

<u>t-Test zum Vergleich von -7,5°C und -10,0°C:</u> Das Siedesalz zeigt hier im Vergleich zwischen den beiden Temperaturen bei den Einwirkzeiten zwischen 2 und 30 Minuten keine signifikanten Unterschiede mit $\alpha > 0,05$.

<u>t-Test bezüglich der Einwirkzeiten:</u> Für alle gewählten Prüftemperaturen ergibt der t-Test für den Zeitraum zwischen 60 und 90 Minuten keinen signifikanten Unterschied ($\alpha > 0,05$). Des Weiteren gibt es keine signifikanten Unterschiede bei -2,5°C und -7,5°C bei einer Einwirkzeit zwischen 20 und 30 Minuten und im Bereich von 2 bis 10 Minuten für -7,5°C gilt auch $\alpha < 0,05$.

Tabelle 11: t-Test für 3,15/5,0

Einwirk-dauer	Vergleich -2,5°C und -5,0°C α	Vergleich -2,5°C und -7,5°C α	Vergleich -2,5°C und -10,0°C α	Vergleich -5,0°C und -7,5°C α	Vergleich -5,0°C und -10,0°C α	Vergleich -7,5°C und -10,0°C α
240	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,0000	0,0034
120	0,0018	0,0000	0,0000	0,0015	0,0000	0,0006
90	0,0424	0,0016	0,0002	0,0132	0,0004	0,0088
60	0,0381	0,0028	0,0001	0,1556	0,0051	0,0194
30	0,0118	0,0013	0,0003	0,0191	0,0009	0,0780
20	0,0008	0,0011	0,0000	0,4052	0,0032	0,0848
10	0,0033	0,0007	0,0000	0,1108	0,0069	0,2577
5	0,4998	0,1298	0,0032	0,1620	0,0025	0,6842
2	0,0641	0,0013	0,0000	0,0407	0,0017	0,0705

Vergleich Einwirk-dauer	bei -2,5°C α	bei -5,0°C α	bei -7,5°C α	bei -10,0°C α
240/120	0,0000	0,0001	0,0190	0,0006
120/90	0,0223	0,0094	0,0074	0,0011
90/60	0,5513	0,8026	0,9316	0,1972
60/30	0,0022	0,0044	0,0019	0,0017
30/20	0,0721	0,0059	0,2092	0,0030
20/10	0,0001	0,0019	0,0180	0,0004
10/5	0,0000	0,0047	0,0844	0,0074
5/2	0,0018	0,0006	0,1427	0,0030

Eine Regressionsanalyse zeigt (Abb. 20-22), dass zwischen der Einwirkzeit der Taumittel und ihrer Tauwirksamkeit ein annähernd Zusammenhang (durch Polynom 2. Ordnung darstellbar) besteht ($R^2 > 0,8966$), und zwar unabhängig vom angewandten Taumittel und der Versuchstemperatur.

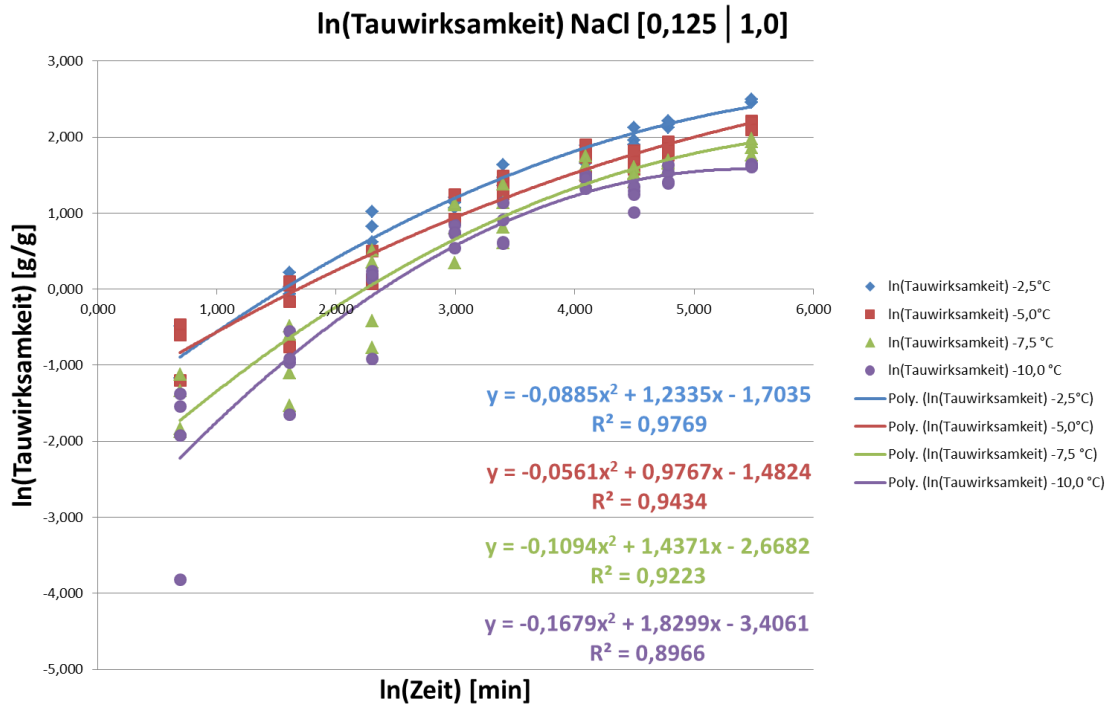


Abbildung 20: ln(Tauwirksamkeit) NaCl [0,125/1,0]

In Abbildung 20 ist die ln Tauwirksamkeit der feinen Kornklasse dargestellt und es ist zu erkennen, dass auch hier die Tauwirksamkeit mit dem absinken der Temperatur weiter sinkt. Die Gütemaße der Regressionsanalyse sind gut, da sie $R^2 \geq 0,8966$ (≥ 89%) sind.

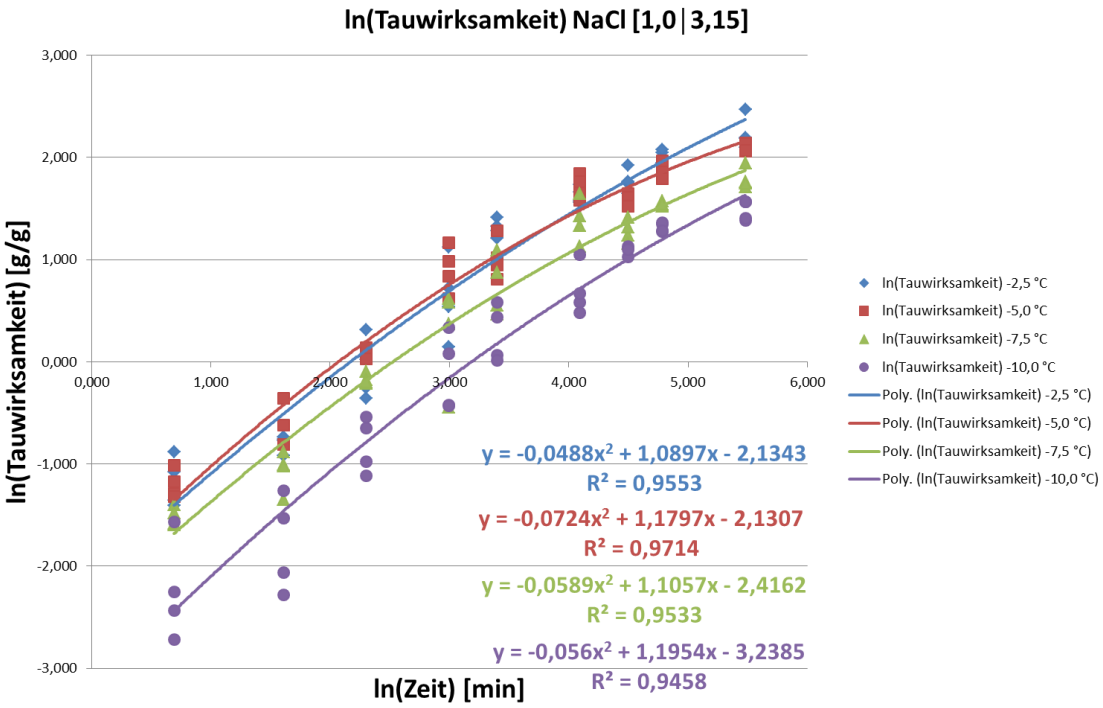


Abbildung 21: ln(Tauwirksamkeit) NaCl [1,0/3,15]

In Abbildung 21 ist die ln Tauwirksamkeit der mittleren Kornklasse dargestellt und es ist zu erkennen, dass sich die Verläufe der Tauwirksamkeit bei -2,5 °C & -5,0 °C kreuzen und teilweise die Tauwirksamkeit bei -5,0 °C höher ist. Die Gütemaße der Regressionsanalyse liegen in einem Bereich von $R^2 \geq 0{,}9458 \leq 0{,}9714$ ($\geq 94\% \leq 97\%$).

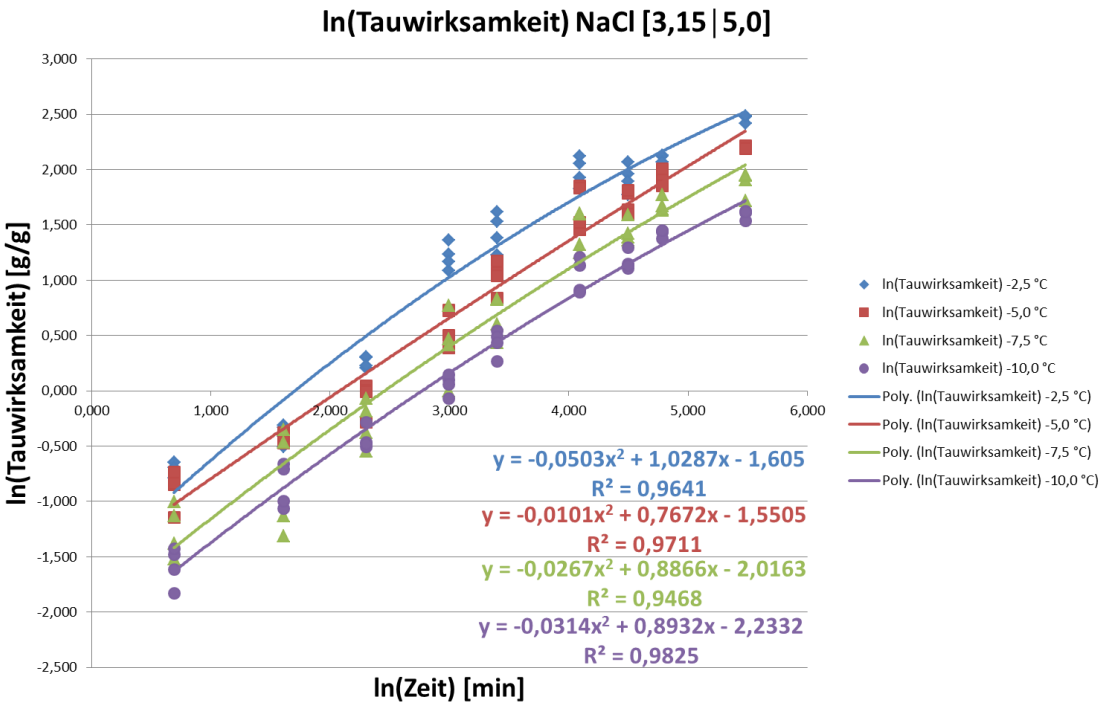


Abbildung 22: ln(Tauwirksamkeit) NaCl [3,15/5,0]

In Abbildung 23 ist die ln Tauwirksamkeit der groben Kornklasse dargestellt und es ist zu erkennen, dass die Verläufe nahezu parallel zueinander verlaufen. Die Gütemaße der Regressionsanalyse sind bei $R^2 \geq 0{,}9468$ (≥ 94%) sehr gut.

Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt durch die gemessene und errechnete Taumenge. Die Taumengen der verschiedenen Kornklassen, Einwirkzeiten und Temperaturen können nun miteinander verglichen werden.

Vergleicht man die Tauwirksamkeit aller Temperaturen und Kornklassen zu einer bestimmten Einwirkzeit, so ist zu erkennen, dass die Kornklassen 0,125/1,0 und 3,15/5,0 die höchsten Tauwirksamkeit bei allen Temperaturen und Einwirkzeiten erreichen. Um einen Überblick über den gesamten Versuch zu bekommen, wurden hierfür eine kurze, mittlere und lange Einwirkzeit gewählt. Generell sind sich die Tauwirksamkeit aller Einwirkzeiten sehr ähnlich und unterscheiden sich nur in der Menge, die sie tauen (siehe Abb. 23-25). Gerade bei einer Einwirkdauer von 240 Minuten sind die erzielten Werte der kleinsten und größten Körnung sehr nahe beieinander und unterscheiden sich um nicht mehr als 1g.

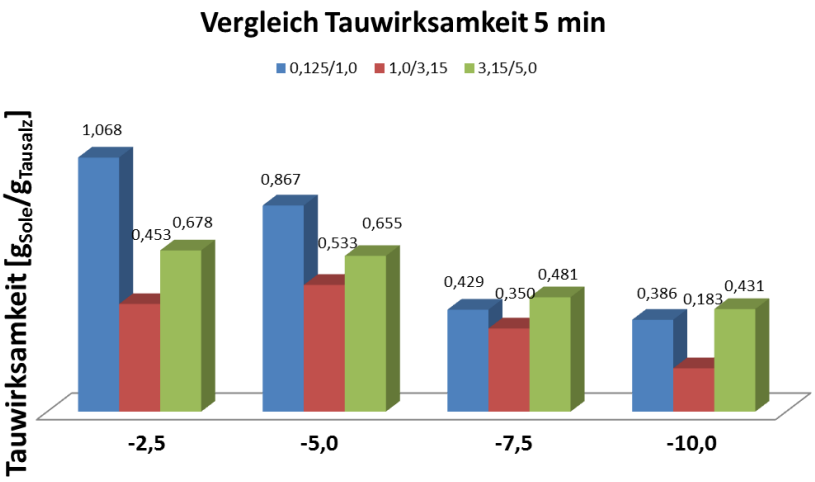


Abbildung 23: Tauwirksamkeit 5 min

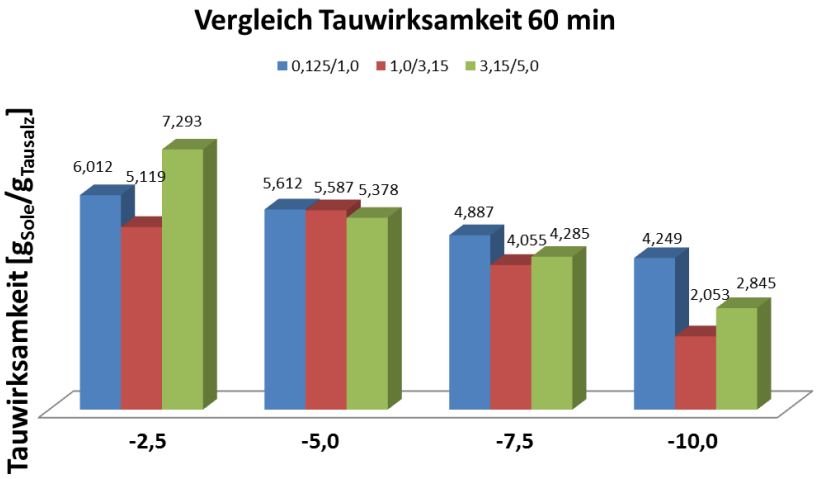


Abbildung 24: Tauwirksamkeit 60 min

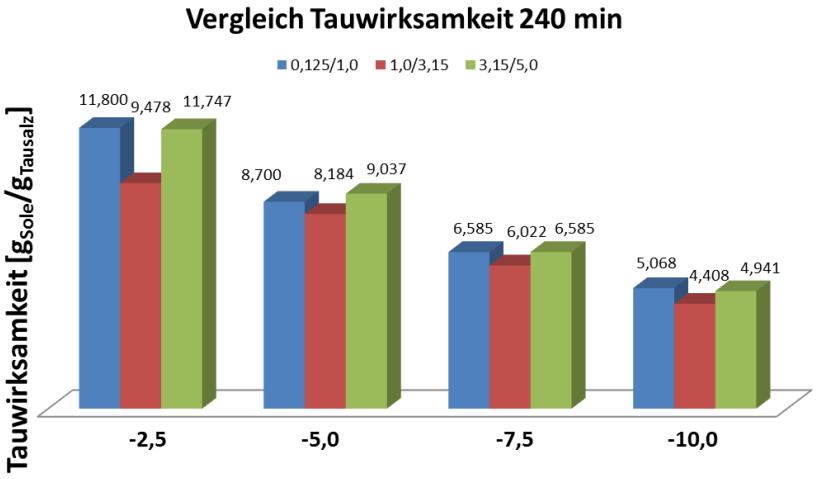


Abbildung 25: Tauwirksamkeit 240 min

Es ist zu erkennen, dass bei tieferen Temperaturen die Tauwirksamkeit abnimmt. Dies liegt daran, dass eine höhere Menge an Salz benötigt wird, damit die entstehende Sole nicht gefriert. Die Tauwirksamkeit nach 4 Stunden bei -2,5°C ist fast doppelt so hoch wie bei -10,0°C, da für diese lange Einwirkzeit zu wenig Salz für das Tauen zur Verfügung steht.

Der Unterschied in der Tauwirksamkeit zwischen der kleinsten und größten Korngröße erklärt sich durch die Wirkungsweise (Abb. 26). Das sehr feinkörnige Salz (linke Seite) bildet eine geschlossene Oberfläche, da die kleinen Körner miteinander verkleben. Sie bilden eine fünf Mal größere spezifische Oberfläche [2], die sehr schnell zum Tauvorgang und zu einem geschlossenen Solefilm führt. Die großen Körner > 2 mm hingegen (rechte Seit der Abb. 26) tauen zuerst säulenförmig bis zum Boden durch und bilden in horizontaler Richtung einen Solefilm zwischen Eis und Boden. Durch diese beiden Effekte erklärt sich auch die hohe Tauwirksamkeit, die in den Diagrammen sichtbar wird.

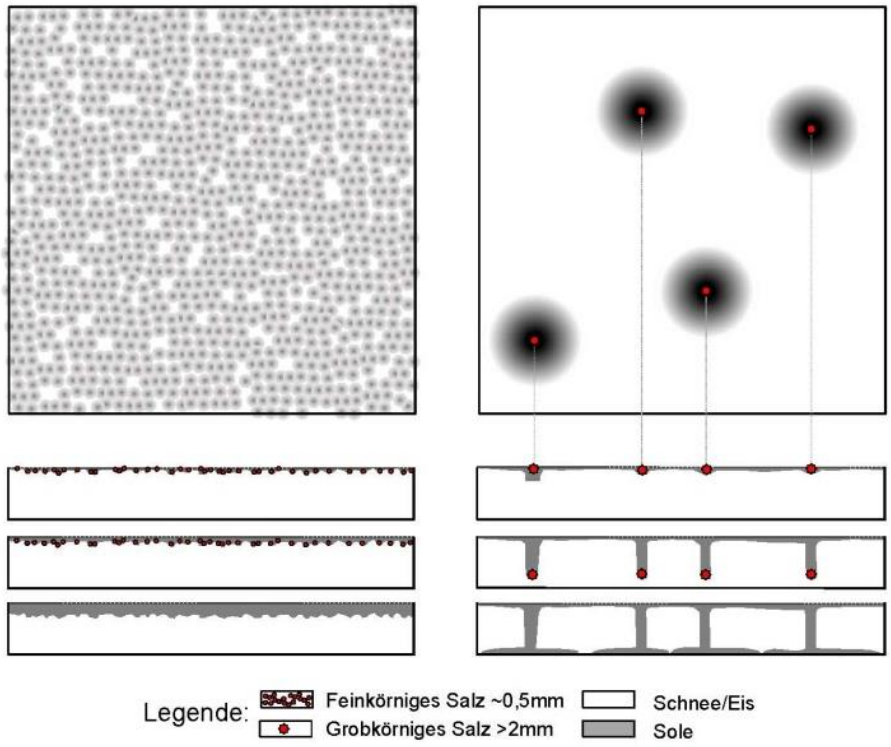


Abbildung 26: Tauverhalten in Abhängigkeit von der Korngröße [2]

Die Abbildungen (27-29) zeigen die Tauwirksamkeit in Abhängigkeit von der Zeit. Es ist zu erkennen, dass die Taumenge umso geringer ist, je tiefer die gewählte Prüftemperatur ist. Aber es zeigt sich auch, dass die Tauwirksamkeit während der geringeren Einwirkzeiten sehr hoch ist (in den ersten 30 Minuten mindestens 2g) und später, z.B. zwischen 210 und 240 Minuten, ist die Taumenge mit in den meisten Fällen nicht einmal mehr 1g geringer (siehe beispielhaft Abb. 26). Aber dennoch ist in den Diagrammen zu erkennen, dass die Tauwirksamkeitskurven trotz der unterschiedliche Korngrößen alle recht ähnlich verlaufen. Sie unterscheiden sich nur in den Taumengen, die wiederum von den gewählten Korngruppen abhängen.

Vergleicht man die Mittelwerte der Tauwirksamkeit aller Temperaturen für eine Solelösung miteinander, dann fällt auf, dass die Tauwirksamkeitskurven meist einen sehr regelmäßigen Abstand zueinander haben. Alle gewählten Prüftemperaturen haben immer einen Unterschied von je 2,5°C zueinander.

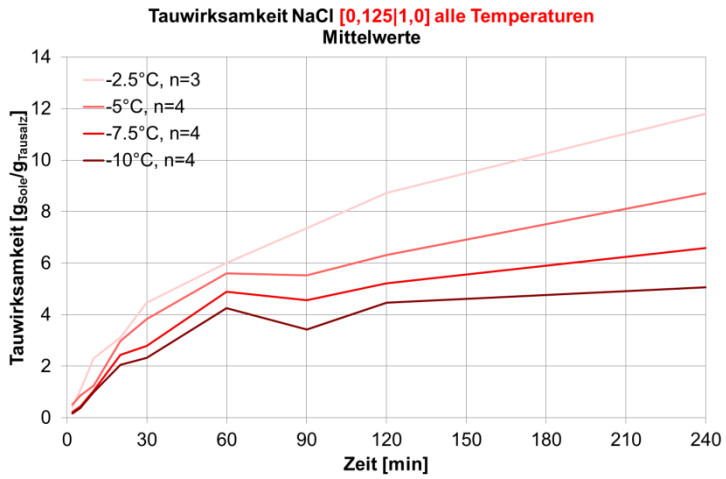


Abbildung 27: Mittelwerte [0,125/1,0]

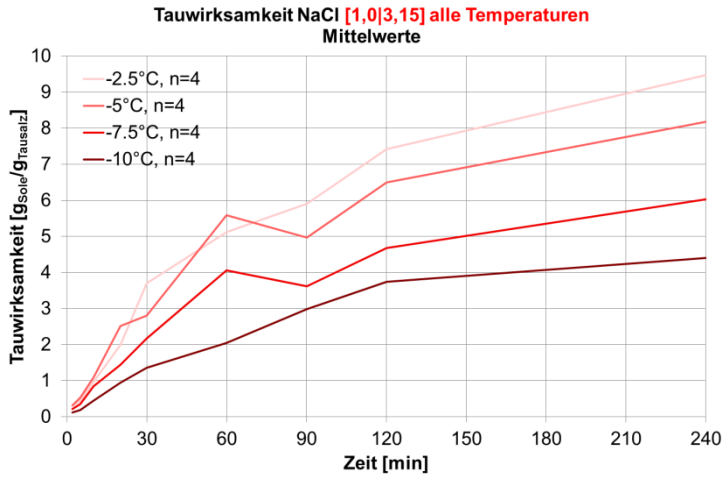


Abbildung 28: Mittelwerte [1,0/3,15]

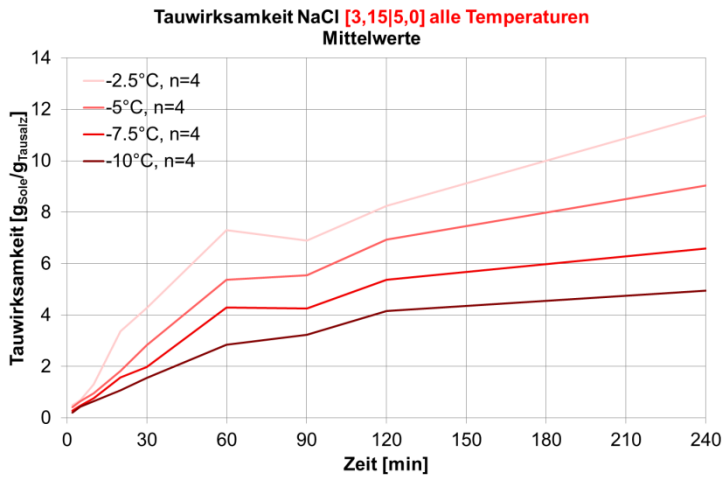


Abbildung 29: Mittelwerte [3,15/5,0]

Da beim Vergleich der Mittelwerte aller Kornklassen zu erkennen ist, dass bei -2,5°C die größte Menge getaut wird, können hier die Kornklassen im Zusammenhang mit ihrer

Tauwirksamkeit genauer miteinander verglichen werden (Abb. 30). Auch hier zeigt sich noch einmal deutlich, dass die Tauwirksamkeit der Kornklassen 0,125/1,0 und 3,15/5,0 fast identisch ist. Allerdings würde 3,15/5,0 in Österreich nicht zur Anwendung kommen, da laut RVS 12.04.16 das Größtkorn für $\underline{NaCl}$ bei 3,15 mm liegt und ein Überkorn von 5,0 mm nur zu 5% in dem Gemisch enthalten sein darf.

Die Abweichung, die sich bei 60 Minuten Einwirkdauer zeigt, wird im Folgenden noch einmal genauer untersucht (siehe Detaillierte Untersuchung der Tauwirksamkeit zwischen 30 und 120 Minuten).

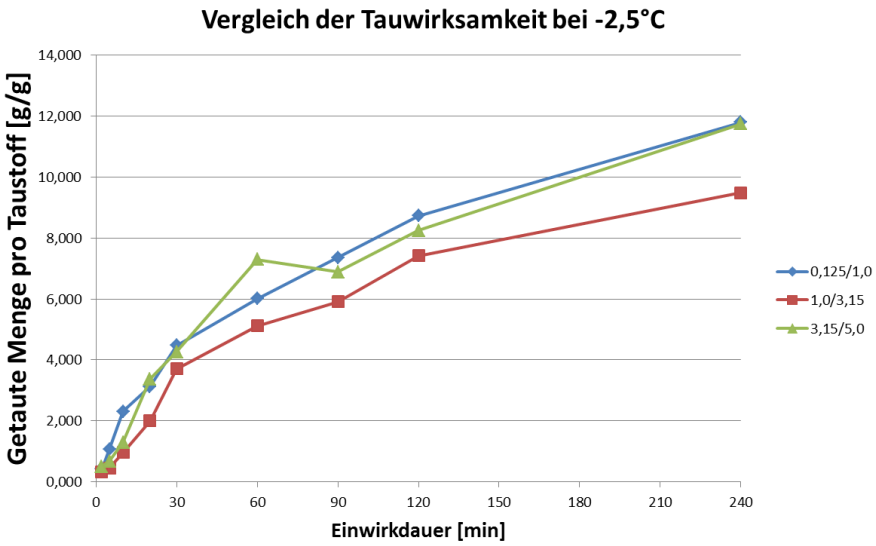


Abbildung 30: Tauwirksamkeit bei -2,5°C

Vergleicht man die Tauraten (Abb. 31-33) der verschiedenen Korngruppen miteinander, dann fällt auf, dass auch hier wie beim Vergleich der Tauwirksamkeit 0,125/1,0 gerade bei kurzen und mittleren Einwirkzeiten am besten getaut wird. Nur bei einer hohen Einwirkzeit zwischen 60 und 240 Minuten liegt die Taurate von 1,0/3,15 und 3,15/3,0 höher. Es zeigt sich, dass $NaCl$ 0,125/1,0 gerade bei kurzen Einwirkzeiten eine hohe Tauwirksamkeit und -rate besitzt.

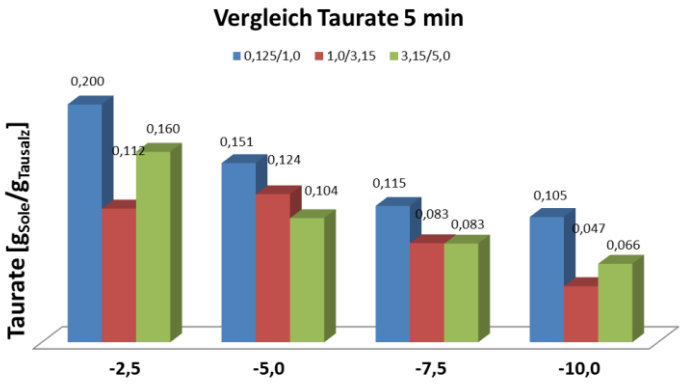


Abbildung 31: Taurate 5 min

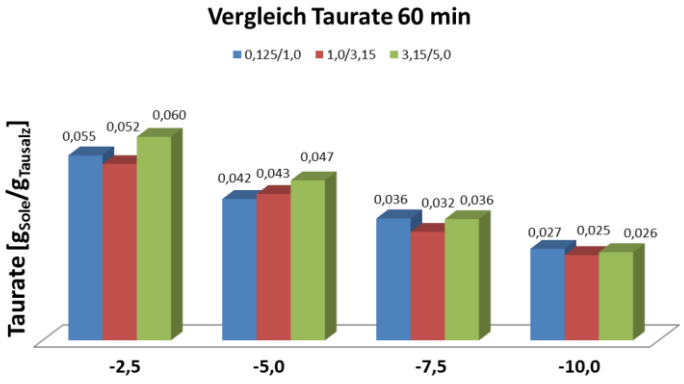


Abbildung 32: Taurate 60 min

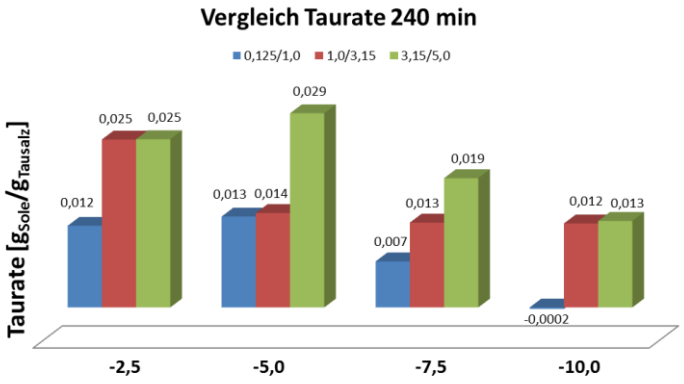


Abbildung 33: Taurate 240 min

<u>Detaillierte Untersuchung der Tauwirksamkeit zwischen 30 und 120 Minuten</u>

Des Weiteren wurde zu diesem Versuch noch ein Zusatzversuch durchgeführt, da beobachtet wurde, dass die Tauwirksamkeit zwischen 60 und 90 Minuten teilweise variiert. Das heißt, dass bei einigen Versuchen eine höhere Tauwirksamkeit bei 60 Minuten auftrat als bei 90 Minuten. Um dieses Merkmal genauer untersuchen zu können, wurde eine Doppelbestimmung mit veränderten und einem engeren Intervall der Einwirkzeiten durchgeführt.

Neue Einwirkzeiten: 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 Minuten

Temperatur: -10,0 °C

Die veränderten Einwirkzeiten des Versuchs ergaben folgende Tauwirksamkeitskurven (Abb. 34). Vergleicht man diese beiden miteinander, fällt auf, dass es im ersten Versuch (blaue Linie) wieder vorgekommen ist, dass bei 60 Minuten eine höhere Tauwirksamkeit auftrat. Im zweiten Versuch (rote Linie), parallel zum ersten Versuch im Klimaschrank stattfand, verläuft die Tauwirksamkeitskurve ansteigend.

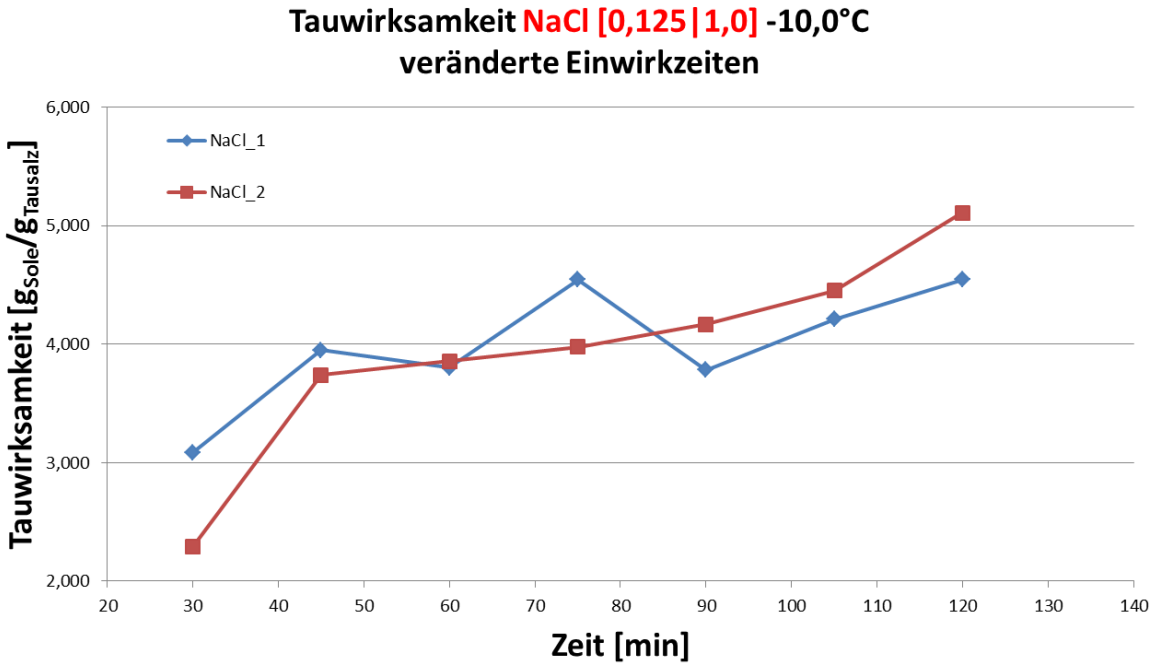


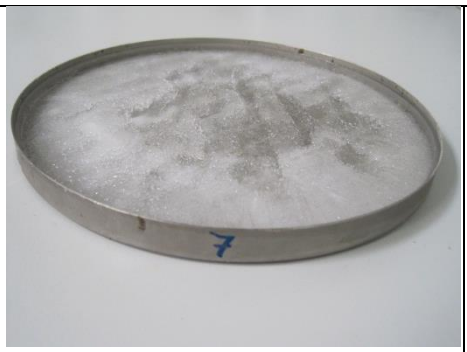
Abbildung 34: Vergleich der Tauwirksamkeit des Doppelversuchs (veränderter Einwirkzeit)

Insgesamt ist festzustellen, dass die Tauwirksamkeit im Einwirkbereich von 60 bis 90 Minuten stark variieren kann. Das könnte vor allem an dem Zeitpunkt liegen, wenn das Salz die Eisschicht komplett getaut hat und auf den Schalenboden trifft. Ist dieser Punkt bereits vor 60 Minuten erreicht, kann bis zum Abgießen bei 60 Minuten ein Solefilm unterhalb der Eisplatte erzeugt werden und von dort wird flächiger getaut. Ist der Zeitpunkt zum Auftreffen auf den Boden erst nach 60 Minuten erreicht, dann wird erst bei einer Einwirkzeit größer als 60 Minuten mehr und flächig durch den Solefilm getaut.

Die folgende Tabelle 12 zeigt noch einmal detailliert den Taufortschritt der veränderten Einwirkzeiten. Die Bemerkungen zu den jeweiligen Versuchen unterscheiden sich meist nur

in der Anzahl der Risse, aber sie haben meist dennoch dieselben Merkmale. Die Bilder nach der Einwirkzeit beider Versuche sehen nicht identisch aus, aber im Allgemeinen geben sie denselben Zustand wieder. Diese Unregelmäßigkeit hängt in erster Linie mit dem Aufbringen des Salzes zusammen. Da das Salz händisch auf der Eisfläche verteilt wird, kann es dazu kommen, dass auf eine Stelle etwas mehr Salz gestreut wird und sich dort Salzklumpen bilden weshalb dort dann eine größere Eisfläche (größeres Loch und nicht nur Risse) getaut wird.

Tabelle 12: Überblick und Dokumentation der Zusatzversuche

Einwirk-zeit [min]	Bemerkung	Foto NaCl_1	NaCl_2
30	Es ist nicht bis zum Boden durchgetaut - Salzklumpen		
45	Mittige kleine Risse (max. 2) bis zum Boden durchgetaut.		
60	NaCl_1: 4-5 schmale Risse bis zum Schalenboden . NaCl_2: Großteil nicht bis zum Boden getaut, nur 1 langer Riss.		

75	1-3 schmale Risse bis zum Boden durchgetaut. Großteil ist nicht bis zum Schalenboden getaut.		
90	Siehe 75 Min.		
105	<u>NaCl 1:</u> 1-2 schmale Risse und ein großes Loch bis zum Schalenboden . <u>NaCl_2:</u> 4-5 schmale Risse bis zum Boden durchgetaut.		
120	<u>NaCl 1:</u> Großflächig in der Mitte und schmale Risse bis Schalenboden . <u>NaCl 2:</u> Ca. 7 tiefe Stellen bis zum Boden durchgetaut.		

t-Test:

Der t-Test (Tab. 13) zu der Doppelbestimmung zeigt bei allen Einwirkzeiten, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Versuchen des Doppelversuchs bestehen.

Tabelle 13: t-Test des Doppelversuchs

Vergleich Einwirk-dauer bei -10,0°C	α
120/105	0,248
105/90	0,259
90/75	0,493
75/60	0,269
60/45	0,895
45/30	0,107

4.3. Tauwirksamkeit flüssiger Taumittel

Auswertungsmethoden

Die Auswertung der Versuche mit flüssigen Taumitteln bestehen auch aus der Auswertung der Tauwirksamkeit und der Taurate (Erklärung siehe 4.2 Tauwirksamkeit fester Taumittel).

t-Test

Mit Hilfe des t-Tests werden jeweils zwei Stichproben der gleichen Solelösung miteinander verglichen (hier -2,5°C und -5,0°C). Zudem werden die Unterschiede innerhalb einer Stichprobe zwischen den gewählten Einwirkzeiten auf Signifikanz untersucht. Für die Versuche wurde ein typisches Signifikanzniveau α<= 0,05 gewählt. Die Ergebnisse werden im Folgenden auszugsweise dargestellt.

- ***NaCl* 20% (Tab. 14)**

t-Test zum Vergleich von -2,5°C und -5,0°C: Für diesen t-Test werden die Taumengen pro g Taustoff bei gleicher Einwirkzeit zwischen denen von -2,5°C mit denen von -5,0°C verglichen. Es ist zu erkennen, dass es einen Unterschied macht, ob bei -2,5°C oder -5,0°C getestet wird, da das Signifikanzniveau α<= 0,05 ist. Lediglich bei einer Einwirkzeit von 30 Minuten ist der Unterschied knapp nicht signifikant. Bei einer Einwirkzeit von 2 Minuten findet sich – vermutlich auf Grund der geringen Einwirkzeit – kein signifikanter Unterschied.

t-Test bezüglich der Einwirkzeiten bei -2,5°C: Hinsichtlich der Einwirkzeiten bei -2,5°C ergibt der t-Test für die Zeiträume zwischen 5 und 20 Minuten signifikante Unterschiede (α= 0,0001 bzw. 0,00001).

t-Test bezüglich der Einwirkzeiten bei -5,0°C: Bei den Einwirkzeiten bei -5,0°C ergibt der t-Test für die Zeiträume zwischen 2 und 20 Minuten und bei einer Einwirkzeit von 30 Minuten signifikante Unterschiede (α< 0,05).

Tabelle 14: t-Test für NaCl 20%

Einwirk-dauer	Vergleich -2,5°C und -5,0°C α
240	0,0047
120	0,0015
90	0,0042
60	0,0024
30	0,0580
20	0,0014
10	0,0007
5	0,0003
2	0,1284

Vergleich Einwirk-dauer	bei -2,5°C α	bei -5,0°C α
240/120	0,4890	0,1977
120/90	0,1985	0,9290
90/60	0,0794	0,0991
60/30	0,1753	0,0186
30/20	0,2118	0,0993
20/10	0,0000	0,0083
10/5	0,0001	0,0003
5/2	0,1086	0,0067

- ***NaCl* 24% (Tab.15)**

t-Test zum Vergleich von -2,5°C und -5,0°C: Auch für eine 24%ige Natriumchloridsole macht es einen Unterschied, ob bei -2,5°C oder -5,0°C getestet wird, da das Signifikanzniveau α<0,05 fast immer unterschritten wird. Nur bei einer Einwirkzeit von 2 Minuten findet sich – vermutlich auf Grund der geringen Einwirkzeit – knapp kein signifikanter Unterschied.

t-Test bezüglich der Einwirkzeiten bei -2,5°C: Hinsichtlich der Einwirkzeiten bei -2,5°C ergibt der t-Test für die Zeiträume zwischen 2 und 30 Minuten und bei einer Einwirkzeit zwischen 60 und 90 Minuten signifikante Unterschiede (α≤ 0,05).

t-Test bezüglich der Einwirkzeiten bei -5,0°C: Bei den Einwirkzeiten bei -5,0°C ergibt der t-Test für die Zeiträume zwischen 2 und 60 Minuten signifikante Unterschiede (α<0,05).

Tabelle 15: t-Test für NaCl 24%

Einwirk-dauer	Vergleich -2,5°C und -5,0°C α
240	0,0142
120	0,0036
90	0,0009
60	0,0142
30	0,0225
20	0,0092
10	0,0211
5	0,0190
2	0,0705

Vergleich Einwirk-dauer	bei -2,5°C α	bei -5,0°C α
240/120	0,1658	0,1580
120/90	0,1450	0,1220
90/60	0,0064	0,3468
60/30	0,1309	0,0156
30/20	0,0497	0,0144
20/10	0,0020	0,0066
10/5	0,0029	0,0007
5/2	0,0053	0,0003

- **$CaCl_2$ 20% (Tab. 16)**

t-Test zum Vergleich von -2,5°C und -5,0°C: Bei einer 20%igen Calciumchloridsole zeigt sich ein signifikanter Unterschied, ob bei -2,5°C oder -5,0°C getestet wird. Nur bei den Einwirkzeiten von 120 und 240 Minuten gibt es keine signifikanten Unterschiede.

Bei 2 Minuten findet sich – vermutlich auf Grund der geringen Einwirkzeit – kein signifikanter Unterschied.

t-Test bezüglich der Einwirkzeiten bei -2,5°C: Bei den Einwirkzeiten bei einer Temperatur von -2,5°C ergibt der t-Test für die Zeiträume zwischen 2 und 20 Minuten und bei einer Einwirkzeit zwischen 30 und 60 Minuten signifikante Unterschiede ($\alpha<0,05$).

t-Test bezüglich der Einwirkzeiten bei -5,0°C: Bei den Einwirkzeiten bei -5,0°C ergibt der t-Test für die Zeiträume zwischen 2 und 10 Minuten und zwischen 20 und 30 Minuten signifikante Unterschiede ($\alpha<0,05$).

Tabelle 16: t-Test für CaCl 20%

Einwirk-dauer	-2,5°C und -5,0°C α
240	0,0687
120	0,0687
90	0,0012
60	0,0072
30	0,0241
20	0,0045
10	0,0015
5	0,0049
2	0,0829

Vergleich Einwirk-dauer	bei -2,5°C α	bei -5,0°C α
240/120	0,2760	0,6743
120/90	0,3861	0,1590
90/60	0,2766	0,7309
60/30	0,0067	0,0903
30/20	0,2393	0,0184
20/10	0,0211	0,1042
10/5	0,0005	0,0413
5/2	0,0005	0,0310

- **$CaCl_2$ 30% (Tab. 17)**

t-Test zum Vergleich von -2,5°C und -5,0°C: Bei einer 20%igen Calciumchloridsole zeigt sich in den Einwirkzeiten ab 5 Minuten ein signifikanter Unterschied. Nur bei den Einwirkzeiten von 2 und 5 Minuten zeigt sich – vermutlich auf Grund der geringen Einwirkzeit – kein signifikanter Unterschied.

t-Test bezüglich der Einwirkzeiten bei -2,5°C: Hinsichtlich der Einwirkzeiten ergibt der t-Test für die Zeiträume zwischen 60 und 120 Minuten keine signifikanten Unterschiede (α>0,05).

t-Test bezüglich der Einwirkzeiten bei -5,0°C: Hier ergibt der t-Test lediglich für die Zeiträume zwischen 90 und 120 Minuten keine signifikanten Unterschiede (α>0,05).

Tabelle 17: t-Test für CaCl 30%

Einwirk-dauer	Vergleich -2,5°C und -5,0°C α
240	0,0001
120	0,0000
90	0,0334
60	0,0009
30	0,0123
20	0,0339
10	0,0046
5	0,0748
2	0,6664

Vergleich Einwirk-dauer	bei -2,5°C α	bei -5,0°C α
240/120	0,0019	0,0281
120/90	0,6126	0,6254
90/60	0,2561	0,0009
60/30	0,0006	0,0029
30/20	0,0018	0,0004
20/10	0,0010	0,0007
10/5	0,0015	0,0014
5/2	0,0047	0,0006

Eine Regressionsanalyse (Abb.35-38) zeigt, dass die Abhängigkeit der Einwirkzeit der Taumittel und ihrer Tauwirksamkeit durch ein Polynom 2. Ordnung dargestellt werden kann ($R^2 > 0{,}88$) und zwar unabhängig vom angewandten Taumittel und der Versuchstemperatur.

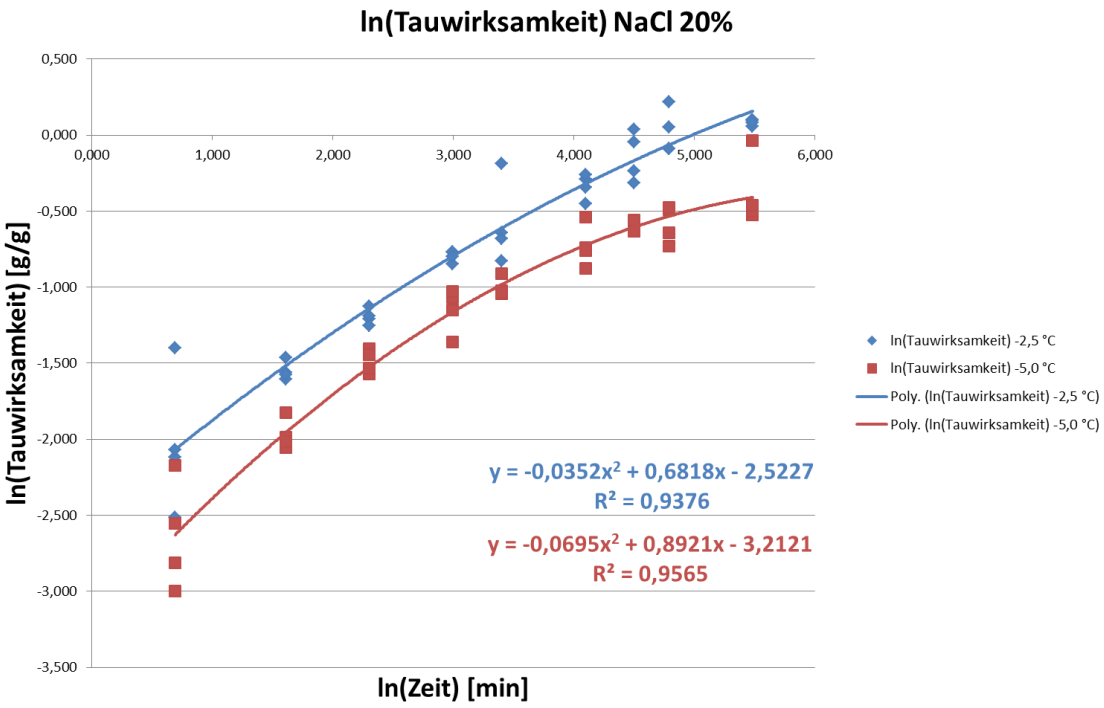


Abbildung 35: ln(Tauwirksamkeit) NaCl 20%

In Abbildung 35 ist die ln Tauwirksamkeit von $NaCl$ 20% dargestellt und es ist zu erkennen, dass die Verläufe sich fast nur um 0,5 g/g unterscheiden. Die Gütemaße der Regressionsanalyse sind bei $R^2 \geq 0{,}9376$ (≥ 93%) gut.

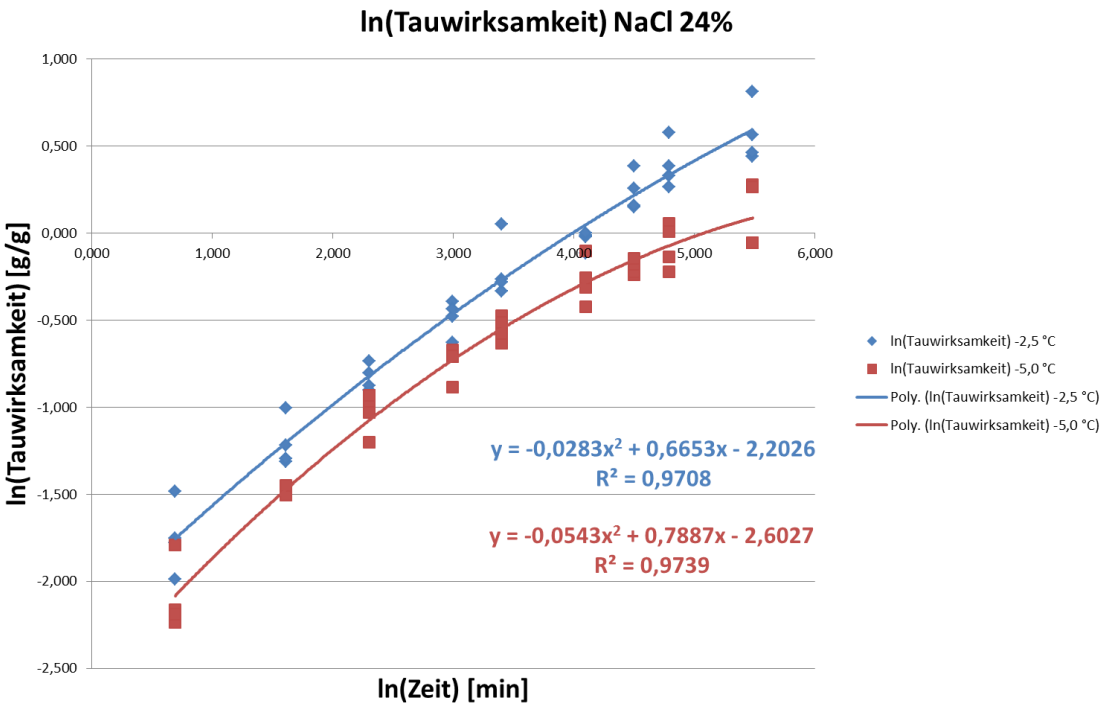


Abbildung 36: ln(Tauwirksamkeit) NaCl 24%

In Abbildung 36 ist die ln Tauwirksamkeit von $NaCl$ 24% dargestellt und es ist zu erkennen, dass die Streuung sehr gleichmäßg um die Trendlinie ist. Die Gütemaße der Regressionsanalyse sind bei $R^2 \geq 0{,}9708$ (≥ 97%) sehr gut.

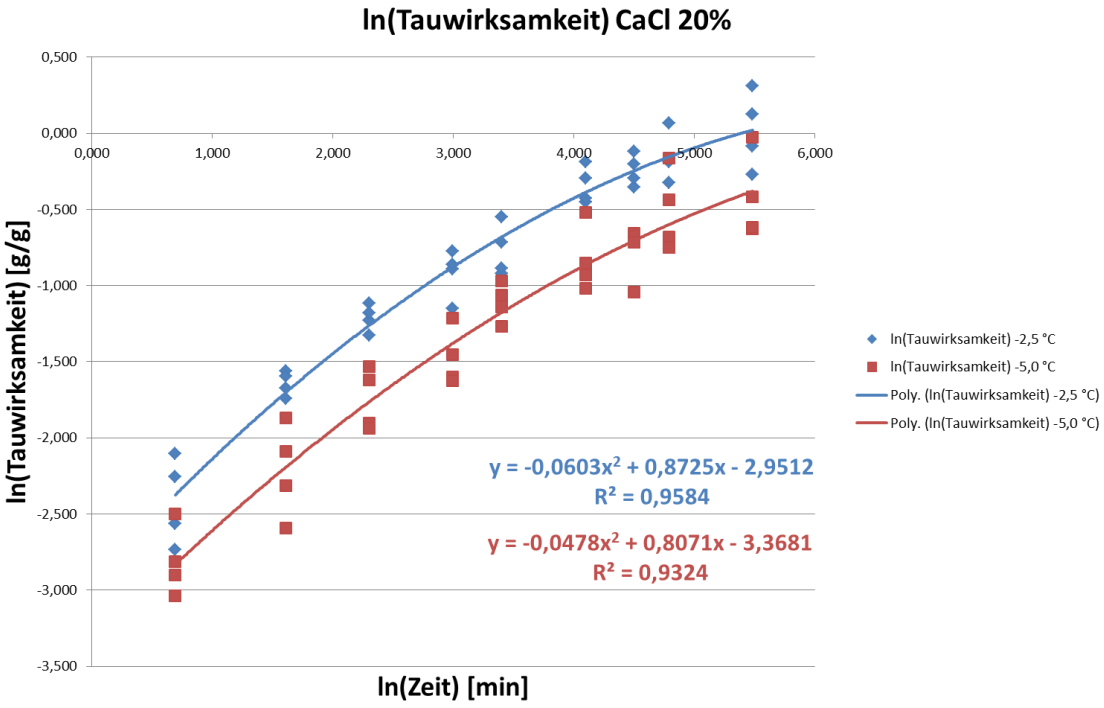


Abbildung 37: ln(Tauwirksamkeit) CaCl 20%

In Abbildung 37 ist die ln Tauwirksamkeit von $CaCl_2$ 20% dargestellt und es ist zu erkennen, dass sich die Verläufe fast nur um 0,5 g/g unterscheiden. Die Gütemaße der Regressionsanalyse sind bei $R^2 \geq 0{,}9324$ (≥ 93%) gut.

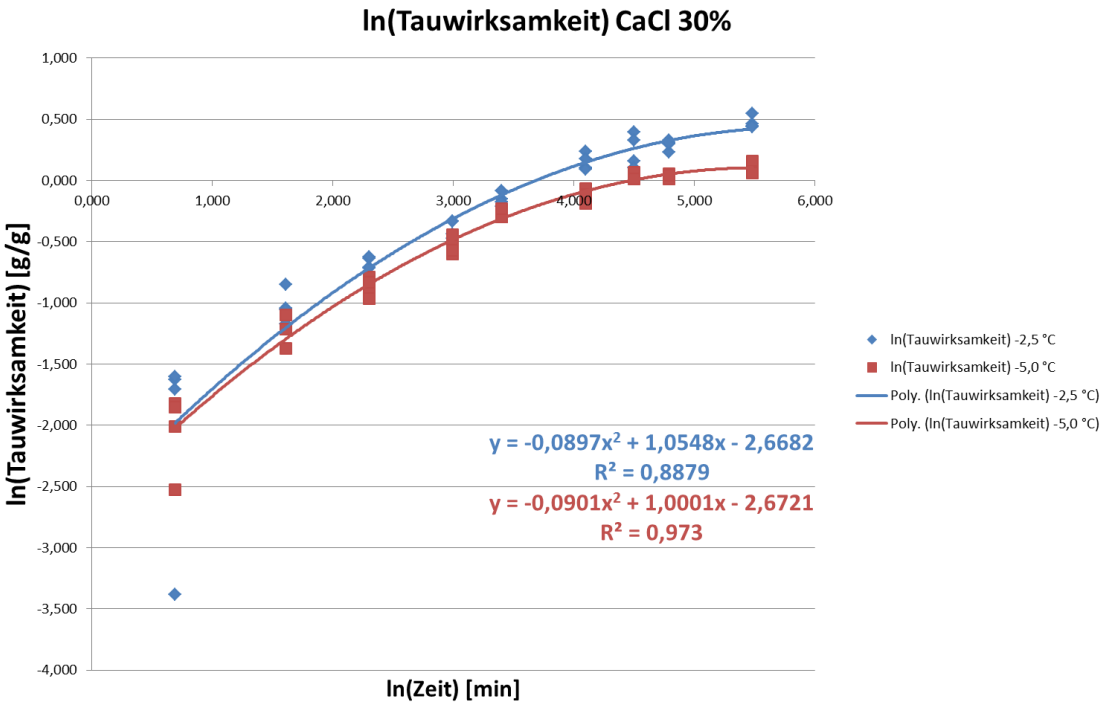


Abbildung 38: ln(Tauwirksamkeit) CaCl 30%

In Abbildung 38 ist die ln Tauwirksamkeit von $CaCl_2$ 30% dargestellt und es ist zu erkennen, dass die Streuung um die Trendlinie bei geringen Einwirkungszeiten höher ist. Die Gütemaße der Regressionsanalyse sind bei $R^2 \geq 0{,}8879$ (≥ 88%) gut.

Angesichts der logarithmischen Darstellung der Tauwirksamkeit flüssiger Taumittel ist ein deutlicher Unterschied zu der Regressionsanalyse der festen Taumittel erkennbar. Bei den festen Taumittel liegt sie ungefähr zwischen 2-3 g/g während der maximalen Einwirkzeiten.

Um einen Überblick über den gesamten Versuch zu bekommen, wurden hierfür eine kurze, mittlere und lange Einwirkzeit gewählt.

Vergleicht man die Tauwirksamkeit aller Temperaturen und Solekonzentrationen zu einer bestimmten Einwirkzeit, so ist zu erkennen, dass die Tauwirksamkeit mit der Zunahme der

Einwirkzeit zunimmt und sich $NaCl$ 20% und $CaCl_2$ 20% in ihrer Tauwirksamkeit über die gesamten verschiedenen Einwirkungszeiten sehr ähnlich sind (Abb. 39-41). Gerade bei einer Einwirkdauer von 60 Minuten sind die erzielten Werte sehr nahe beieinander und unterscheiden sich beispielsweise nur um 0,042 [g/g] bei -5,0 °C. Während sie bei -2,5 °C gleich sind (Abb. 50). Daher sind diese beiden flüssigen Taumittel bei gleicher Konzentration sehr vergleichbar, aber auf Grund des Kostenfaktors wird eher Natriumchlorid gewählt.

Der Unterschied zwischen $NaCl$ 24% und $CaCl_2$ 30% in der Tauwirksamkeit ist höher und er hängt von der Einwirkdauer ab. Bei einer langen Einwirkdauer von 240 Minuten ist die Tauwirksamkeit des Natriumchlorids höher, im Vergleich bei 60 und 5 Minuten überragt die Tauwirksamkeit des Calciumchlorids (Abb. 39 & 40). Auch wenn das Calciumchlorid im Tauwirksamkeitsvergleich bei 60 und 5 Minuten überlegen ist, wird es aufgrund seiner Kosten und des Wirkungsbereich nicht eingesetzt werden. Calciumchlorid wird erst bei viel tiefen Temperaturen eingesetzt (Tab. 5).

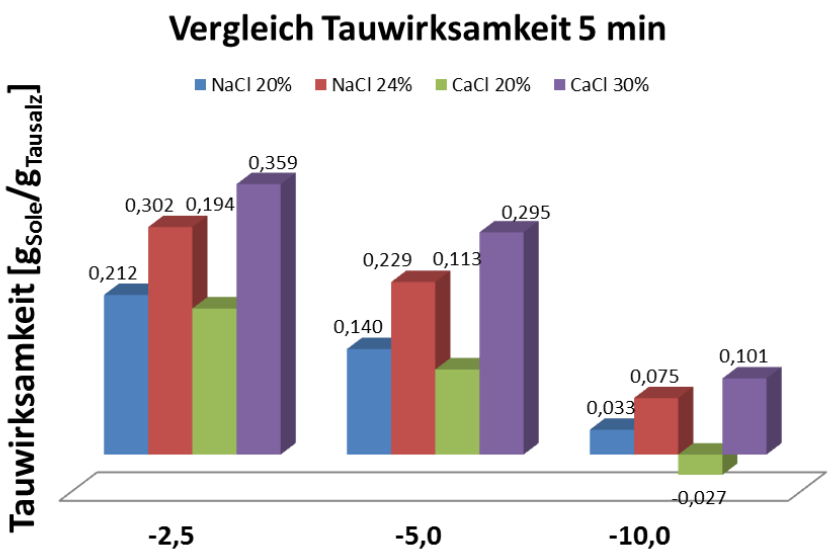


Abbildung 39: Tauwirksamkeit 5 min

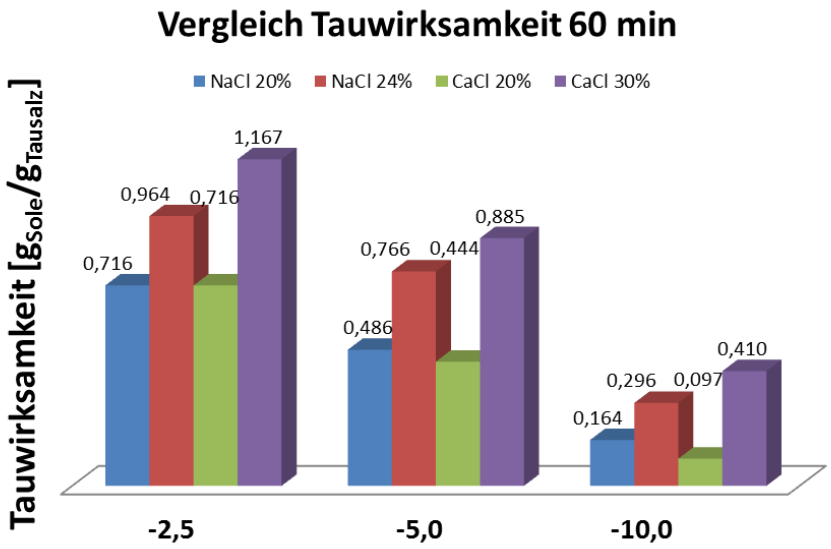


Abbildung 40: Tauwirksamkeit 60 min

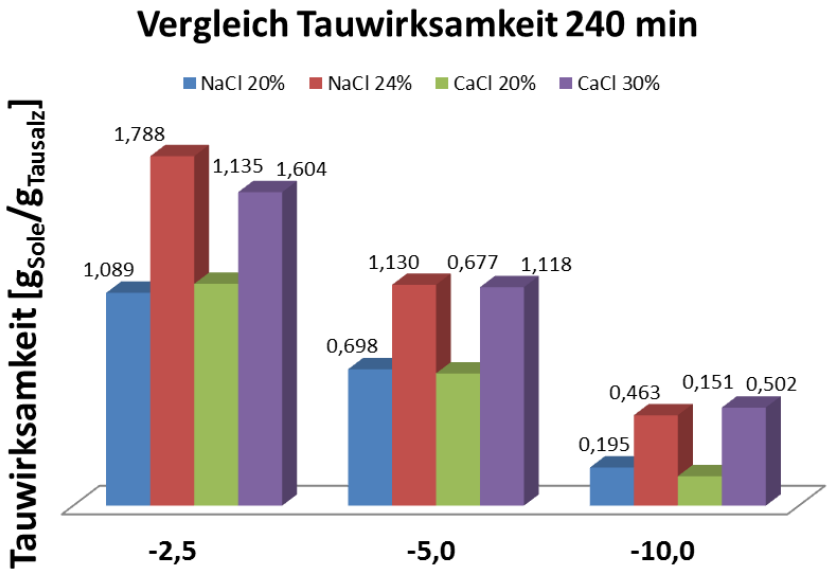


Abbildung 41: Tauwirksamkeit 240 min

Die Abbildungen zeigen, dass die Tauwirksamkeit umso geringer ist, je tiefer die gewählte Prüftemperatur ist. Aber dennoch ist in den Abbildungen 42-45 (siehe unten) zu erkennen, dass die Tauwirksamkeitskurven trotz unterschiedlicher Solekonzentrationen und Taumittel alle gleich verlaufen und sich nur in der Taumenge unterscheiden.

Wenn man die Mittelwerte der Tauwirksamkeit aller Temperaturen für eine Solelösung miteinander vergleicht, fällt auf, dass die mittlere Tauwirksamkeit bei einer Temperatur von -5,0 °C in den meisten Fällen genau zwischen den Mittelwerten von -2,5 °C und -10,0 °C liegt.

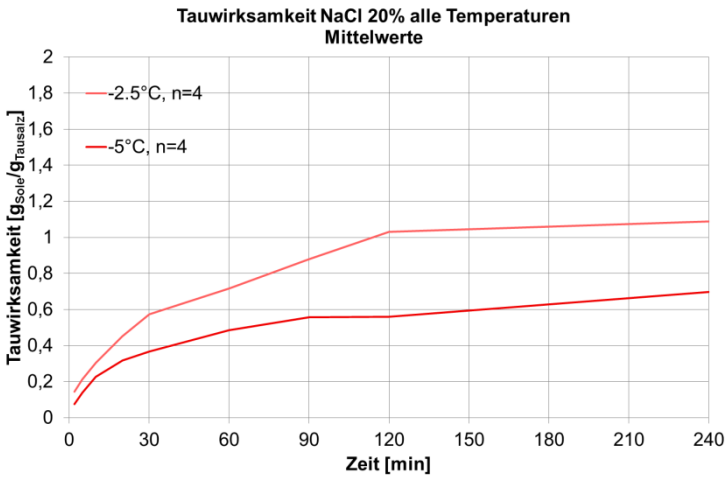


Abbildung 42: Mittelwerte NaCl 20%

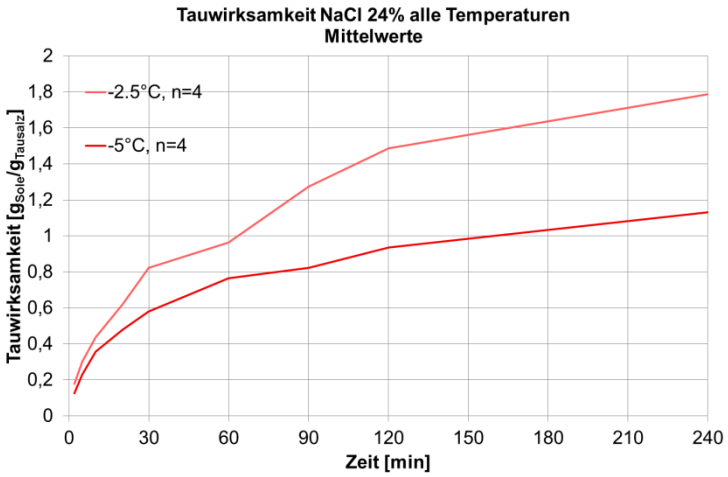


Abbildung 43: Mittelwerte NaCl 24%

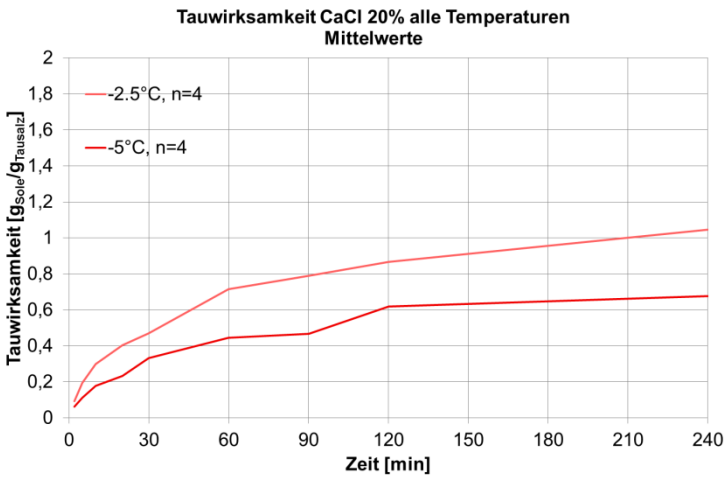


Abbildung 44: Mittelwerte CaCl 20%

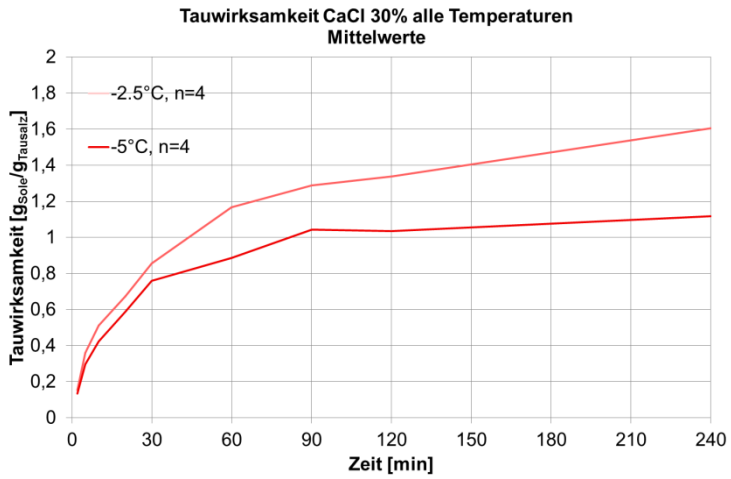


Abbildung 45: Mittelwerte CaCl 30%

Um eine geeignete Solekonzentration zu finden, ist der Vergleich aller geprüften Solemischungen bei einer gleichen Prüftemperatur wesentlich. In der folgenden Abbildung 46 ist die Tauwirksamkeit der Natrium- und Calciumchloridsolen dargestellt. Bei der Wahl der geeigneten Solekonzentration ist darauf zu achten, dass diese nicht zu gering ist, da diese bei tieferen Temperaturen im Tank oder auf dem Streuteller des Streufahrzeugs festfrieren kann. Bei zu hohen Konzentrationen kann es zu Rückständen kommen und das Produkt wäre nicht mehr wirtschaftlich. Der wichtigste Punkt ist allerdings, darauf zu achten, dass der Gefrierpunkt der Sole unterhalb der während der Streuung herrschenden Außentemperatur liegt [2].

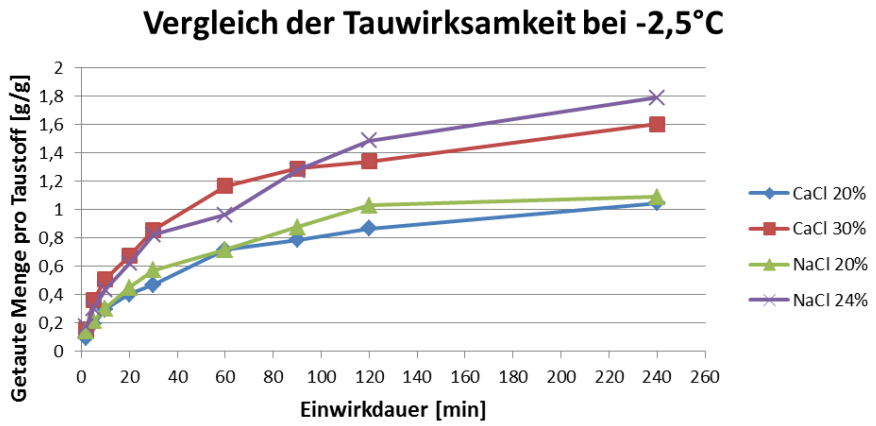


Abbildung 46: Tauwirksamkeit bei -2,5°C

In der Abbildung 46 fällt auf, dass die Tauwirksamkeit von $NaCl$ 20% nahezu der von $CaCl_2$ 20% entspricht. Wobei bei genauerem Hinsehen auffällt, dass das $CaCl_2$ 20% eine

schlechtere Tauwirksamkeit hat. Allgemein wird davon ausgegangen, dass $CaCl_2$ besser taut, die geringere Tauwirksamkeit in diesem Versuch liegt an der Prüftemperatur. Im österreichischen Winterdienst wird bei -2,5°C hauptsächlich $NaCl$ verwendet und $CaCl_2$ erst bei tieferen Temperaturen hinzu gegeben, wenn diese außerhalb des Wirkungsbereichs von $NaCl$ liegen.

Auch bei $NaCl$ 24% und $CaCl_2$ 30% liegen die Tauwirksamkeit sehr nahe beieinander, jedoch ist die Tauwirksamkeit von $NaCl$ bei längeren Einwirkzeiten höher.

Insgesamt ist zu der Abbildung 46 zu sagen, dass trotz der guten Tauwirksamkeit von $CaCl_2$ (hier $CaCl_2$ 30%) bei so geringen Temperaturen das Natriumchlorid vorgezogen wird, da die meisten Streufahrten bei Temperaturen um -2,5 °C durchgeführt werden, es eine ausreichende Wirkung besitzt und kostengünstiger ist.

Im nächsten Schritt wurden die erzielten Ergebnisse der getauten Menge pro Taustoff zusammengefasst und grafisch dargestellt, damit die Streuung der Ergebnisse leichter zu vergleichen ist. Dabei fiel eine besonders große Streuung bei der gewählten Temperatur von -10 °C auf. Hier hat sich gezeigt, dass die hier eingesetzte Sole nicht mehr wirksam ist. Die folgenden Grafiken (Abbildung 47 & 48) zeigen die gemessenen Taumengen pro g Taustoff und es ist zu sehen, dass die Streuung sehr breit ist, die Mengen sehr gering sind und es teils negative Werte gibt. Dieser Fall tritt sowohl für Natriumchlorid als auch für Calciumchlorid auf und daher wird die Temperatur von -10 °C nicht weiter betrachtet.

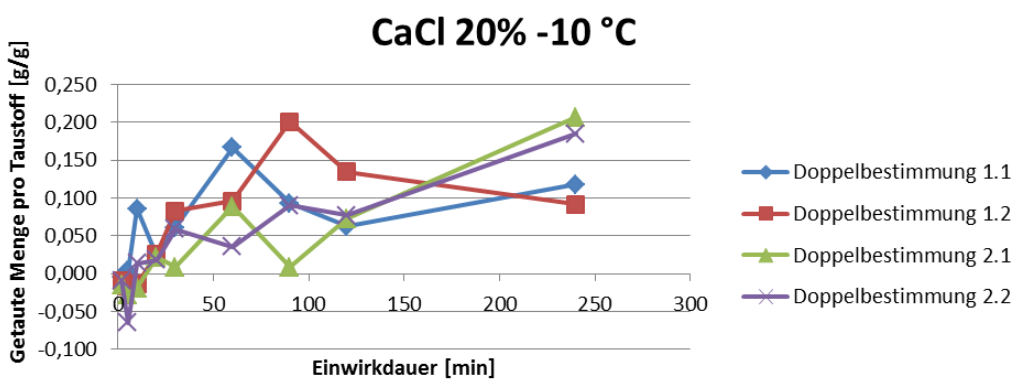


Abbildung 47: Tauwirksamkeit CaCl 20% -10,0°C

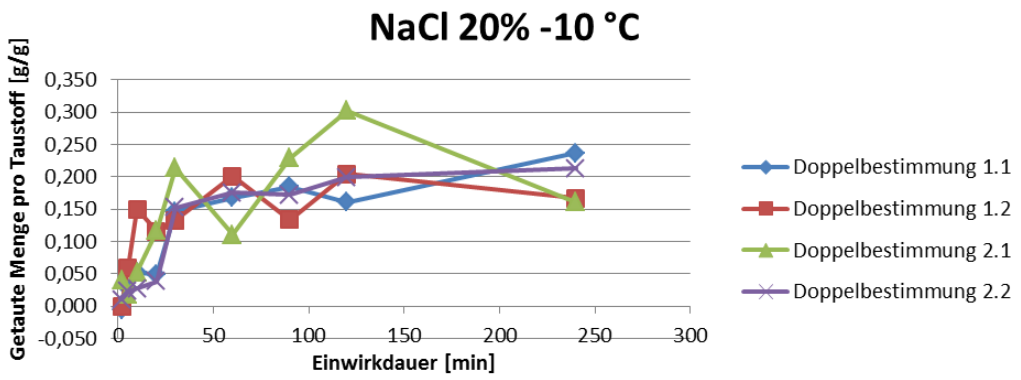


Abbildung 48: Tauwirksamkeit NaCl 20% -10,0°C

Vergleicht man die Taurate (Abb. 49-51) der verschiedenen Solekonzentrationen miteinander, dann fällt auf, dass auch hier wie beim Vergleich der Tauwirksamkeit auch die Natriumchloridsole 24% bei längeren Einwirkzeiten am besten taut. Nur bei einer geringen Einwirkzeit von 5 Minuten liegt die Taurate von $CaCl_2$ 30% über der von $NaCl$ 24%. Damit ist gezeigt, dass sowohl Taurate als auch Tauwirksamkeit von $NaCl$ 24% bei -2,5°C und -5,0°C am besten sind und diese Konzentration gerade für einen mittleren und langen Einwirkzeitraum sehr gut geeignet ist.

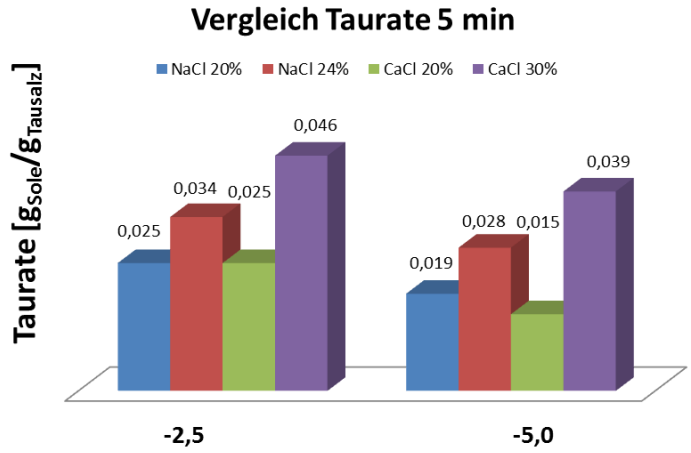


Abbildung 49: Taurate 5 min

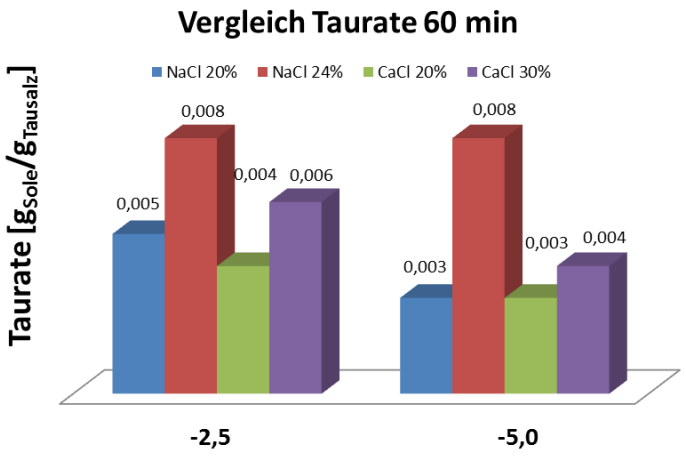


Abbildung 50: Taurate 60 min

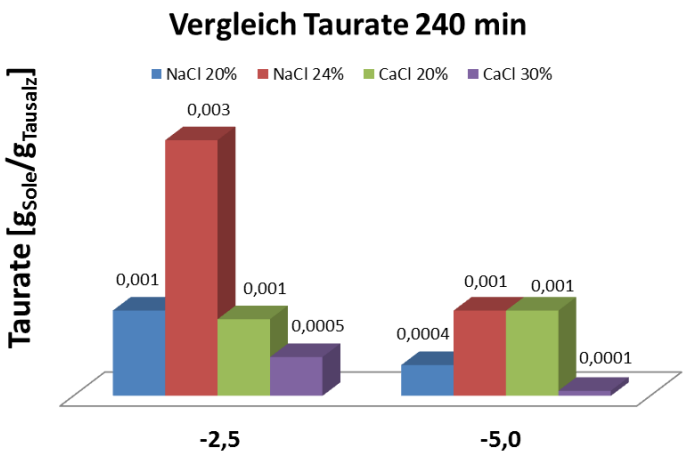


Abbildung 51: Taurate 240 min

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zu den Eignungskriterien für auftauende Streumittel können wie folgt zusammengefasst werden.

Gefrierpunktverlauf:

Der Versuch ist einfach und ohne großen Aufwand durchführbar, da die Datenlogger durch das jeweils angepasste Intervall (hier 15 Sekunden) den Verlauf sehr genau abbilden. Die Sensoren sind einfach in den Flaschen zu montieren und arbeiten sehr zuverlässig. Die Ergebnisse des Versuchs zum Gefrierpunktverlauf sind stetig und betrachtet man die Werte der Standardabweichung vom Mittelwert, so betragen diese nicht mehr als 2°C.

Probleme gibt es nur, wenn Konzentrationen über den eutektischen Punkt hinaus getestet werden sollen, da sich hier keine brauchbaren Ergebnisse erzielen lassen.

Es wurde gezeigt, dass $NaCl$ sich gut für die reguläre Streuung eignet, aber nur bis zu einer Temperatur von ca. -10,0°C und am kostengünstigsten ist. Herrschen tiefere Temperaturen, sollte bevorzugt auf $CaCl_2$ und $MgCl_2$ zurückgegriffen und diese hinzugemischt werden, da sie für einen Einsatz bei tieferen Temperaturen besser geeignet sind und hier ihren Wirkungsbereich haben.

Tauwirksamkeit fester Taumittel:

Die getesteten Kornklassen (0,125/1,0; 1,0/3,15; 3,15/5,0) haben verschiedene Tauwirksamkeiten, die von der Art und Größe der Körner abhängen und am besten bei höheren Temperaturen tauen. Kleinere Körner bilden eine größere spezifische Oberfläche und der Beginn des Tauvorgangs setzt schneller ein. Grobe Körner tauen bis auf den Boden durch und bilden einen Solefilm, der stark vereiste Flächen zum Tauen bringt, sodass diese gelöst werden können. Bei dieser Art des Versuchs ist zu beachten, dass die Kornklasse, so wie sie getestet wurden, nicht im Winterdienst verwendet werden. Das verwendete Salz in Österreich ist in der Regel eine Zusammensetzung mehrerer Kornklassen und der Anteil der Korngrößen ≤ 0,125 mm und zwischen 3,15 bis 5,00 mm darf nicht mehr als 5% betragen. Daher dürfte die getestete Korngruppe 3,15/5,0 mm in dieser Form nicht verwendet werden. Ein weiteres Problem ist die Art der Aufbringung des Salzes, da ein genaues und gleichmäßiges Aufbringen im Versuch nicht möglich ist. Weder mit einem Sieb noch händisch können Salznester vermieden werden.

Die Einwirkzeit von 4 Stunden bildet nahezu eine reguläre Umlaufzeit auf A+S-Straßen (in der Regel 3 Stunden) im Winterdienst ab. Mit diesem Versuch werden jedoch keine realitätsnahen Werte erzielt, da die tatsächlichen Umstände auf der Straße nicht berücksichtigt werden können. Eigentlich müssten die Fahrzeugüberrollungen nach dem Auftragen des Salzes berücksichtigt werden, da das Salz dadurch nach und nach abgetragen wird und die Menge des zur Verfügung stehenden Salzes bei längeren Einwirkzeiten immer geringer wird. Des Weiteren werden die Salzkörner auch durch den Wind und den Fahrtwind der Fahrzeuge verweht, aber auch dieser Effekt kann in diesem Rahmen nicht simuliert werden.

Es wurde gezeigt, dass die Unterschiede in der Tauwirksamkeit entsprechend der Kornklassen gering sind. Die Tauwirksamkeit von 0,125/1,0 und 3,15/5,0 ist im Allgemeinen am effektivsten. Gerade bei geringen Einwirkzeiten überwiegt jedoch die Tauwirksamkeit der feinen Kornklasse 0,125/1,0, da diese die größte spezifische Oberfläche haben und der Tauvorgang daher schneller einsetzt.

Tauwirksamkeit flüssiger Taumittel:

Der Versuch besitzt eine gute Wiederholbarkeit, da die Solelösung mit Hilfe einer Spritze genau aufgetragen werden kann. Die höchste Tauwirksamkeit aller Taumittel wird bei -2,5°C erzielt. Liegen die Temperaturen kleiner -10,0°C sollte Calciumchlorid hinzugefügt werden, da Calciumchlorids hier seinen Wirkungsbereich hat. Reines Calciumchlorid wird nicht verwendet, da dieses zu teuer wäre.

Die Versuche haben gezeigt, dass sie bei -10,0°C nicht erfolgreich waren, da hier die Streuung zu groß war bzw. bei einigen Versuchen die Sole gefroren ist. Die Taurate von $NaCl$ 24% ist bei -2,5°C höher als bei -5,0°C und im Allgemeinen ist die Taurate von $NaCl$ 20% geringer. Bei sehr geringen Einwirkzeiten ist die Taurate von $CaCl_2$ am höchsten und bei mittleren bis langen Einwirkzeiten ist die Taurate von $NaCl$ höher.

Literaturverzeichnis

[1] „ BMVIT, Statistik Straße & Verkehr, August 2011, Seite 40“
[Online] Available:
ww.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/statistik/downloads/viz_2011_kap_3.pdf+&cd=1&hl=de&ct=clnk&gl=at&client=firefox-a [Stand: 22.08.2014]

[2] Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab, Univ. Ass. Dipl. Ing. Dr. techn. Markus Hoffmann, Univ. Ass. Dipl.-Ing. Peter Nutz, Technische Universität Wien, Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbericht Optimierung der Feuchtsalzstreuung, Wien, 2011

[3] Univ. Ass. Dipl.-Ing. Peter Nutz, Vorlesung 230.016 Straßenbetrieb, TU Wien Wintersemester 2013/2014, Wien, 2014

[4] „Technische Universität Wien, Institut für Verkehrswissenschaften“
[Online] Available: http://www.ivws.tuwien.ac.at/print/forschungprojekte/projekte-planungbetrieb/winterdienst.html [Stand: 28.08.2014]

[5] Gesellschaft für Straßen- & Verkehrswesen (GSV), „GSV-Fact Sheet Salzstreuung“
[Online] Available:
http://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCcQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.gsv.co.at%2Fwp-content%2Fuploads%2FFACT%2520SHEET%2520SALZSTREUUNG%2520WEB.pdf&ei=Vzw1VJLGGOi6ygOZlYCABg&usg=AFQjCNFTZnBMAQhA7ZTvj8CFpAYlyufzHQ&bvm=bv.76943099,d.bGQ [Stand: 28.09.2014]

[6] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), RVS 12.04.11: Winterdienst, Ausgabe 2011

[7] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), RVS 12.04.12: Schneeräumung und Streuung, Ausgabe 2010

[8] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), RVS 12.04.15: Minimierung von Umweltauswirkungen beim Einsatz von Streumitteln im Winterdienst, Ausgabe 2012

[9] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV), RVS 12.04.16: Streumittel, Ausgabe 2011

[10] „Wikipedia-Winterdienst“
[Online] Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Winterdienst [Stand: 25.08.2014]

[11] Gesellschaft für Straßen- & Verkehrswesen (GSV), GSV Bericht: Splitt keine Alternative, 2012

[12] „Wikipedia-Winterstreu“
[Online] Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Winterstreu [Stand: 25.08.2014]

[13] „Wikipedia-Auftausalz“
[Online] Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Auftausalz [Stand: 25.08.2014]

[14] „Wikipedia-Natriumchlorid“
[Online] Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Natriumchlorid [Stand: 28.08.2014]

[15] „Wikipedia-Calciumchlorid“
[Online] Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Calciumchlorid [Stand: 28.08.2014]

[16] „Wikipedia-Magnesiumchlorid“
[Online] Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Magnesiumchlorid [Stand: 28.08.2014]

[17] „Road Salts & Alternatives“
[Online] Available: http://water.greenventure.ca/road-salts-alternatives
[Stand: 28.09.2014]

[18] „Eco Traction“
[Online] Available: http://www.ecotraction.com [Stand: 01.10.2014]

[19] „Wikipedia-Harnstoff“
[Online] Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Harnstoff [Stand: 01.10.2014]

[20] „Wikipedia- Ammoniumsulfat “
[Online] Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Ammoniumsulfat [Stand: 01.10.2014]

[21] K+S Kali GmbH, „Grafik des Monats“
[Online] Available: http://www.kali-gmbh.com/dede/company/news/charts/chart-of-the-month-201212-magnesium-chloride.html [Stand: 01.09.2014]

[22] Kühlmeyer M., Kühlmeyer C., Statistische Auswertungsmethoden für Ingenieure: mit Praxisbeispielen, Springer Verlag, Deutschland, 2001

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anforderungen an Streumittel [2] 8
Abbildung 2: Griffigkeitsbeiwert [2] 13
Abbildung 3: Einfluss der Wasserfilmdicke zwischen Reifen und Fahrbahn [2] 14
Abbildung 4: Abtragung von Splitt und Salz [2] 17
Abbildung 5: Phasendiagramm einer NaCl-Lösung [14] 19
Abbildung 6: Klimaschrank 22
Abbildung 7: Wirkungsbereiche der drei Taumittel [21] 23
Abbildung 8: Versuchsaufbau bei geöffnetem Klimaschrank 25
Abbildung 9:Auswertung Schneefallereignisse 2005-2010 [2] 28
Abbildung 10: Wirkung von kleinen und großen Salzkörnern [2] 29
Abbildung 11: Versuchsaufbau für eine Doppelbestimmung (Skizze) 30
Abbildung 12: Versuchsaufbau bei geöffnetem Klimaschrank 30
Abbildung 13: Skizze der verwendeten Metallschalen [2] 33
Abbildung 14: Ermittlung des Gefrierpunkts [2] 35
Abbildung 15: Bestimmung des Gefrierpunktes von NaCl durch eine Häufigkeitsverteilung . 36
Abbildung 16: Grafische Bestimmung der Gefrierpunkte von NaCl 36
Abbildung 17: Gefrierpunktverlauf NaCl 37
Abbildung 18: Gefrierpunktverlauf CaCl 37
Abbildung 19: Gefrierpunktverlauf MgCl 38
Abbildung 20: ln(Tauwirksamkeit) NaCl [0,125/1,0] 42
Abbildung 21: ln(Tauwirksamkeit) NaCl [1,0/3,15] 43
Abbildung 22: ln(Tauwirksamkeit) NaCl [3,15/5,0] 43
Abbildung 23: Tauwirksamkeit 5 min 44
Abbildung 24: Tauwirksamkeit 60 min 45
Abbildung 25: Tauwirksamkeit 240 min 45
Abbildung 26: Tauverhalten in Abhängigkeit von der Korngröße [2] 46
Abbildung 27: Mittelwerte [0,125/1,0] 47
Abbildung 28: Mittelwerte [1,0/3,15] 47
Abbildung 29: Mittelwerte [3,15/5,0] 47
Abbildung 30: Tauwirksamkeit bei -2,5°C 48
Abbildung 31: Taurate 5 min 49

Abbildung 32: Taurate 60 min 49
Abbildung 33: Taurate 240 min 49
Abbildung 34: Vergleich der Tauwirksamkeit des Doppelversuchs (veränderter Einwirkzeit) 50
Abbildung 35: ln(Tauwirksamkeit) NaCl 20% 57
Abbildung 36: ln(Tauwirksamkeit) NaCl 24% 58
Abbildung 37: ln(Tauwirksamkeit) CaCl 20% 58
Abbildung 38: ln(Tauwirksamkeit) CaCl 30% 59
Abbildung 39: Tauwirksamkeit 5 min 60
Abbildung 40: Tauwirksamkeit 60 min 61
Abbildung 41: Tauwirksamkeit 240 min 61
Abbildung 42: Mittelwerte NaCl 20% 62
Abbildung 43: Mittelwerte NaCl 24% 62
Abbildung 44: Mittelwerte CaCl 20% 62
Abbildung 45: Mittelwerte CaCl 30% 63
Abbildung 46: Tauwirksamkeit bei -2,5°C 63
Abbildung 47: Tauwirksamkeit CaCl 20% -10,0°C 64
Abbildung 48: Tauwirksamkeit NaCl 20% -10,0°C 65
Abbildung 49: Taurate 5 min 65
Abbildung 50: Taurate 60 min 66
Abbildung 51: Taurate 240 min 66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen an die Streumittel 11
Tabelle 2: Reibungsbeiwert bei verschiedenen Fahrbahnzuständen 13
Tabelle 3: Winterdienstkategorien [3] 15
Tabelle 4: Eutektische Punkte [Abb. 7] 23
Tabelle 5: Empfohlene Einsatzbereiche der Taumittel [9] 24
Tabelle 6: Verwendete Solekonzentrationen 24
Tabelle 7: Korngrößen- und Temperatureinteilungen 27
Tabelle 8: Prüfprogramm 32
Tabelle 9: t-Test für 0,125/1,0 40
Tabelle 10: t-Test für 1,0/3,15 41
Tabelle 11: t-Test für 3,15/5,0 42
Tabelle 12: Überblick und Dokumentation der Zusatzversuche 51
Tabelle 13: T-Test des Doppelversuchs 53
Tabelle 14: t-Test für NaCl 20% 54
Tabelle 15: t-Test für NaCl 24% 55
Tabelle 16: t-Test für CaCl 20% 56
Tabelle 17: t-Test für CaCl 30% 56

Formelverzeichnis

Formel 1: Formel zur Berechnung des Reibungsbeiwerts μ [2]

Formel 2: Formel zur Bestimmung der Salzmenge [2]

Formel 3: Tauwirksamkeit

Formel 4: Taurate

Anhang

AA <Nr.> - Bestimmung des Gefrierpunktverlaufs von Lösungen in Abhängigkeit der Konzentration

Inhalt

1 Überblick 2
2 Geräte, Hilfsmittel und Gefässe 2
3 Probekörpervorbereitung 8
4 Durchführung 14
5 Auswertung 20

1 ÜBERBLICK

Diese Arbeitsanweisung beschreibt die Bestimmung des Gefrierpunktverlaufs von Lösungen mit unterschiedlicher Konzentration. Dazu werden in geeigneten Kunststoffflaschen Lösungen (z.B. von Natriumchlorid in Wasser) in 8 unterschiedlichen Konzentrationen hergestellt. In die Flaschen wird jeweils ein Temperaturfühler eingeführt, der mit einem Datenlogger verbunden ist. Anschließend werden die Proben in den Klimaschrank gestellt, der bereits auf -45 °C gekühlt ist. Nachdem sie vollständig durchgefroren sind und der Gefrierpunkt aufgezeichnet wurde, werden die Temperaturwerte der Datenlogger auf einen Computer ausgelesen und der Gefrierpunkt anhand des erkennbaren Halteplateaus bestimmt.

2 GERÄTE, HILFSMITTEL UND GEFÄSSE

2.1 Klimaschrank

In dem Klimaschrank (Abb. 1) MKF 720 können Temperaturen von -50 °C bis +180 °C und relative Luftfeuchtigkeiten von 0-100 % (bei Temperaturen ≥ ± 5 °C) mit einer Auflösung von 0,1 °C bzw. 0,1 % Luftfeuchte angefahren werden. Der Klimaschrank ist mit einem Display (Abbildung 1, rechts) ausgerüstet, auf dem Soll- und Ist-Werte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit, eingestellt und abgelesen werden können.

Abbildung 1: Der Klimaschrank (links) und sein Display (rechts)

2.2 Datalogger

Die Datalogger messen Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit über die Zeit im Klimaschrank und speichern sie. Das Messintervall und die Zeitabstände können vom Nutzer selbst gewählt und eingestellt werden. Zum Auslesen der Datenlogger werden diese mittels eines USB-Kabels mit dem Computer verbunden und die Messwerte mit Hilfe der Software „elproLOG ANALYZE“ ausgelesen und übertragen.

Es stehen zwei Datalogger mit 4 Temperaturfühlern (Abb. 2) und ein weiterer (Abb. 4) mit 2 Sensoren zur Verfügung. Es ist zu beachten, dass die Datalogger eine begrenzte Speicherkapazität haben und ihre bisher gespeicherten Informationen überschreiben, wenn der Speicher voll sein sollte oder die Einstellungen nicht richtig programmiert wurden. Daher ist es sinnvoll, die Datenlogger so zu programmieren, dass sie nach einer bestimmten Zeit automatisch mit der Aufzeichnung stoppen.

2.2.1 Datalogger mit 4 Temperaturfühlern

Abbildung 2: Datalogger mit 4 Temperaturfühlern

Je ein Temperaturfühler (Abb. 3) wird in jeder Kunststoffflasche in die Lösung eingetaucht und mittels Flaschenverschlüssen vertikal befestigt. Die Fühler werden mit einem Datenlogger verbunden und haben die Funktion, die Temperatur der Lösung in der Kunststoffflasche laufend zu messen und aufzuzeichnen.

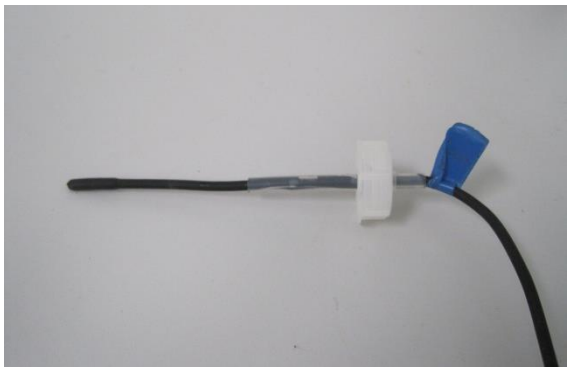


Abbildung 3: Temperaturfühler

2.2.2 Datalogger mit 2 Sensoren für Temperatur und relative Luftfeuchte

Es stehen zwei Sensoren zur Verfügung, die jeweils Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit messen. Ein Sensor befindet sich im Klimaschrank in der Nähe der Proben, der andere außerhalb des Klimaschrankes, um die Umgebungstemperatur zu überwachen. Dieser Datalogger dient der Routineüberwachung und kann im Bedarfsfall in regelmäßigen Abständen ausgelesen werden.

Abbildung 4: Datalogger mit Sensor

2.3 Kunststoffflaschen

Die Kunststoffflaschen haben ein Nennvolumen von 500ml. Sie werden für den Versuch mit (375±10) g Lösung gefüllt, die Temperaturfühler eingesteckt und verschraubt. Um eine leichtere Erkennung der unterschiedlichen Messproben zu gewährleisten, sind die Flaschen nummeriert und mit Farben (Abb. 5, Nummer 1) gekennzeichnet. Die Reihenfolge der Farben ist beim Anstecken der Temperaturfühler an den Datenlogger einzuhalten (blau, grün, rot und lila), da in dieser festgelegten Reihenfolge die Daten später am Computer dargestellt werden.

Abbildung 5: Gefäße und Hilfsmittel

2.4 Glasschale

Die Glasschale (Abb. 5, Nummer 2) mit einem Volumen von 150 ml dient zur Herstellung von Sollösungen aus festen Stoffen (etwa NaCl) und Wasser. Mit ihr wird die notwendige Menge Salz eingewogen, die für die Herstellung einer Lösung mit bestimmter Konzentration notwendig ist.

2.5 Trichter

Ein kleiner Glastrichter (Abb. 5, Nummer 3) dient dazu, das Salz der Schale ohne Verluste in die Kunststoffflaschen umzufüllen.

2.6 Verbindungskabel

Das Verbindungskabel (Abb. 5, Nummer 4) hat die Funktion, die Datenlogger mit einem PC zu verbinden und eine Übertragung der Daten zu ermöglichen.

2.7 Elektronische Waage

Die elektronische Waage (Abb. 6) wird dazu verwendet, die Massen von Gefäßen, Wasser und Salz zu bestimmen. Die Messgenauigkeit der zu verwendenden Waage liegt bei 0,1g und sie funktioniert bis zu einer Temperatur von -10 °C.

Abbildung 6: Die elektronische Waage

2.8 Zusätzlich benötigte Materialen für Stoffe, die beim Lösen in Wasser zu exothermer Reaktion führen

Während des Mischens von Stoffen, die exotherm bei der Lösung in Wasser reagieren (etwa Calcium- und Magnesiumchlorid), entsteht beim Lösevorgang Wärme und kann es zu Schaum- und Blasenbildung kommen. Damit die Salz-Wasser-Mischung nicht übersprudelt, sollte erst das Taumittel mit Hilfe eines Trichters (Abb. 7, Nummer 1) in einem Erlenmeyerkolben (Abb. 7, Nummer 2) eingewogen werden, dann nach und nach die entsprechende Wassermenge mit Hilfe eines Becherglases (Abb. 7, Nummer 4) bzw. einer Spritzflasche (Abb. 7, Nummer 3) unter einem Abzug hinzugegeben werden. Schließlich ist die Lösung im Erlenmeyerkolben abzukühlen. Dieser muss dabei mit einer Abdeckung versehen werden, damit keine Dämpfe während des Auskühlens austreten können.

Damit dieser Vorgang etwas beschleunigt wird, kann der Erlenmeyerkolben in einem Wasserbad abgekühlt werden. Anschließend wird jede Mischung in gesonderte Kunststofffaschen (Abb. 8, mit einem grünen Deckeln) abgefüllt, was durch die breite Öffnung ohne Hilfe eines Trichters gut möglich ist. Dort können die Proben noch weiter bis zur Raumtemperatur auskühlen und der Erlenmeyerkolben kann nach dem sorgfältigen Ausspülen und durch den Einsatz von Druckluft, um Wasserrückstände zu entfernen, für die Vorbereitung der nächsten Probe verwendet werden. Durch einen zusätzlichen Kunststoffflaschensatz ist das Vorbereiten einer weiteren Charge möglich.

Abbildung 7: Gefäße und Hilfsmittel

Abbildung 8: Kunststoffflaschen für exotherme Streumittel

3 PROBEKÖRPERVORBEREITUNG

3.1 Bei Stoffen mit endothermer Reaktion während der Lösung

- Leere Kunststoffflasche auf die Waage stellen und die Waage tarieren

Abbildung 9: Waage tarieren

- Kunststoffflasche mit Leistungswasser füllen und erneut wiegen

Abbildung 10: Flaschen befüllen (links) und wiegen (rechts)

- Gewicht des eingefüllten Wassers auf 0,1 g gerundet in den Handzettel (siehe Anhang) eintragen

- Salzmenge bestimmen
  - Die Salzmenge wird in Abhängigkeit von der angestrebten Konzentration und der Wassermenge mittels der folgenden Formel berechnet.

$$SM = \frac{\frac{SK}{100} \cdot WM}{1 - \frac{SK}{100}}$$

SM – Salzmenge in [g]

SK – Solenkonzentration in [M-%]

WM – Wassermenge in [g]

- Leere Glasschale auf die Waage stellen und die Waage tarieren
- Die oben ermittelte Salzmenge in der Schale einwiegen
- Tatsächlich eingewogene Salzmenge auf 0,1 g gerundet in den Handzettel eintragen

- Salz aus der Glasschale mittels eines Trichters in die mit Wasser gefüllten Kunststofffla-schen einbringen und lösen

Abbildung 11: Salz abwiegen (links) und Umfüllen (rechts)

- Temperaturfühler in die Kunststoffflasche einstecken und Flaschen durch den Schraubverschluss verschließen

Abbildung 12: fertige Kunststoffflasche

- Kunststoffflasche mehrmals schütteln, damit sich Wasser und Salz gut vermischen
- Den Temperatursensor in der Flasche so positionieren, dass der Sensor in etwa den gleichen Abstand vom Flaschenmantel hat und vollständig in die Sole eingetaucht ist. Ein Abstand zum Boden der Flasche von (5±1) cm ist einzuhalten.

3.2 Bei Stoffen mit exothermer Reaktion während der Lösung

- Zielwassermenge in den Handzettel (Vorlage Anhang) eintragen

- Die Salz-SOLL-Menge bestimmen

    - Die Salzmenge wird in Abhängigkeit von der angestrebten Konzentration und der Wassermenge mittels der folgenden Formel berechnet:

$$SM = \frac{\frac{SK}{100} \cdot WM}{1 - \frac{SK}{100}}$$

SM – Salzmenge in [g]

SK – Solenkonzentration in [M-%]

WM – Wassermenge in [g]

- Leeren Erlenmeyerkolben auf die Waage stellen und die Waage tarieren

- Einbringen des Taumittels in den Erlenmeyerkolben mittels eines Trichters

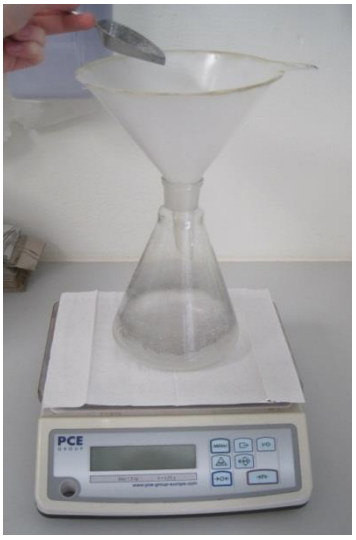


Abbildung 13: Taumittel abwiegen

- Nachdem der Salz-IST-Gehalt im Handzettel eingetragen wurde, kann die Wasser-SOLL-Menge errechnet werden und hinzu gegeben werden

- Die Wassermenge wird in Abhängigkeit von der angestrebten Konzentration und der Salz-IST-Menge mittels folgender Formel berechnet:

$$WM = \frac{\mathrm{SM} * 1 - \frac{SK}{100}}{\frac{SK}{100}}$$

SM – Salzmenge in [g]

SK – Solenkonzentration in [M-%]

WM – Wassermenge in [g]

- Langsames Auffüllen mit der jeweiligen Menge an Wasser mit Hilfe eines Becherglases bzw. mit einer Spritzflasche unter einem Abzug, da es zu Gasentwicklungen kommen kann.

Abbildung 14: Wassermenge abwiegen

- Den Erlenmeyerkolben gut schwenken, sodass das Salz gelöst wird und nicht mehr an der Gefäßwand klebt und ihn anschließend zum Auskühlen mit einem Deckel abdecken. Auf (40±2)°C abkühlen lassen.

- Umfüllen in die Aufbewahrungsflaschen (Kunststoffflaschen mit dem grünem Deckel) zum vollständigen Auskühlen auf Raumtemperatur

- Umfüllen mittels eines Trichters in die Probenflaschen

Abbildung 15: fertige Sole umfüllen

- Temperaturfühler in die Kunststoffflasche einstecken und Flaschen verschließen

Abbildung 16: fertige Kunststoffflasche

- Kunststoffflasche mehrmals schütteln, damit sich Wasser und Salz gut vermischen

- Den Temperatursensor so in der Flasche positionieren, dass der Sensor in etwa den gleichen Abstand vom Flaschenmantel hat und vollständig in die Sole eingetaucht ist. Ein Abstand zum Boden der Flasche von (5±1) cm ist einzuhalten.

4 DURCHFÜHRUNG

4.1 Klimaschrank einschalten

Abbildung 17: Schalter zum Ein- und Ausschalten

Der Knopf zum Ein- und Ausschalten befindet sich auf der rechten unteren Seite des Klimaschranks (Abb. 17). Falls es beim Einschalten zu einem Pfeifton und der Anzeige „Please restart“ in der LCD-Anzeige kommt, ist der Klimaschrank noch einmal aus- und neu anzuschalten.

4.2 Sollwerte für Temperatur und Luftfeuchtigkeit eingeben

Die Eingabe der Soll-Werte erfolgt über das Eingabemodul in der linken oberen Ecke des Klimaschranks (Abb. 18). Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit werden über die vierte Taste „HAND W“ (von links nach rechts) ausgewählt. Mit den Pfeiltasten erfolgt die Eingabe der gewünschten Werte und mittels der Taste „Enter“ wird dieser Wert bestätigt. Über die Taste „Exit“ kehrt die Anzeige wieder zurück in das Hauptmenü.

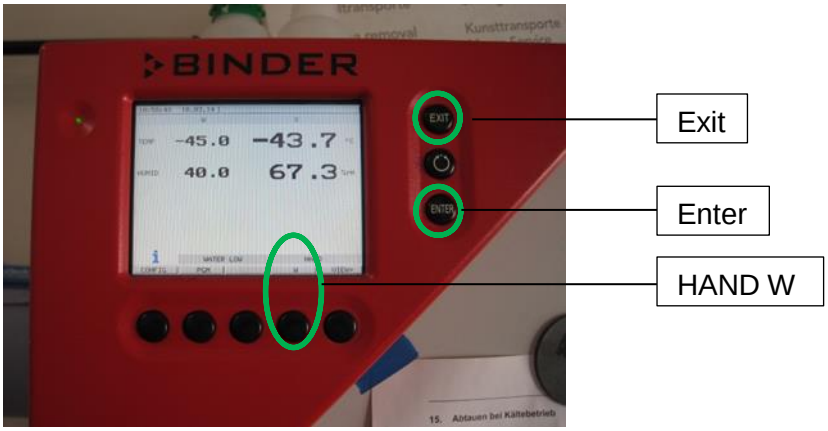


Abbildung 18: Display Klimaschrank

Für die Bestimmung von Gefrierpunkten sind eine Temperatur von **-45,0°C** und eine relative Luftfeuchtigkeit von **40,0%** einzustellen. Der Klimaschrank ist bereits vor dem Hineinstellen der Proben auf die oben genannten Werte zu temperieren, da der Abkühlvorgang im tiefen Temperaturbereich langsamer voran geht und es dadurch zu Problemen während des Versuchs kommen kann.

4.3 Datenlogger mit PC verbinden

Die Datalogger werden über ein USB-Kabel an den PC angeschlossen. Dazu muss auf dem Computer der Treiber für das Datenkabel installiert sein.

4.4 Datenlogger einrichten

Damit der Datenlogger neu eingerichtet werden kann, muss dieser vorher ausgelesen werden (siehe dazu 4.11 Messergebnisse vom Datenlogger auslesen und speichern). Wenn dieser Schritt übersprungen wird, dann sind die bereits vorhandenen Daten durch die Neueinrichtung gelöscht. Das Einrichten des Datenloggers erfolgt mit Hilfe der „elproLOG ANALYZE“-Software. Unter „Datei -> Datalogger einrichten” können diese neu programmiert werden. Damit ein Überschreiben der bisherigen Daten und ein Endloslaufen verhindert werden, sollte der Modus auf „Start/Stop“ eingestellt sein (Abb. 19). Für eine Aufzeichnung des Gefrierverlaufs wird das Aufzeichnungsintervall auf 15 Sekunden eingestellt. Um diese getätigten Einstellungen zu übernehmen, muss der Vorgang durch „Programmieren“ abgeschlossen werden.

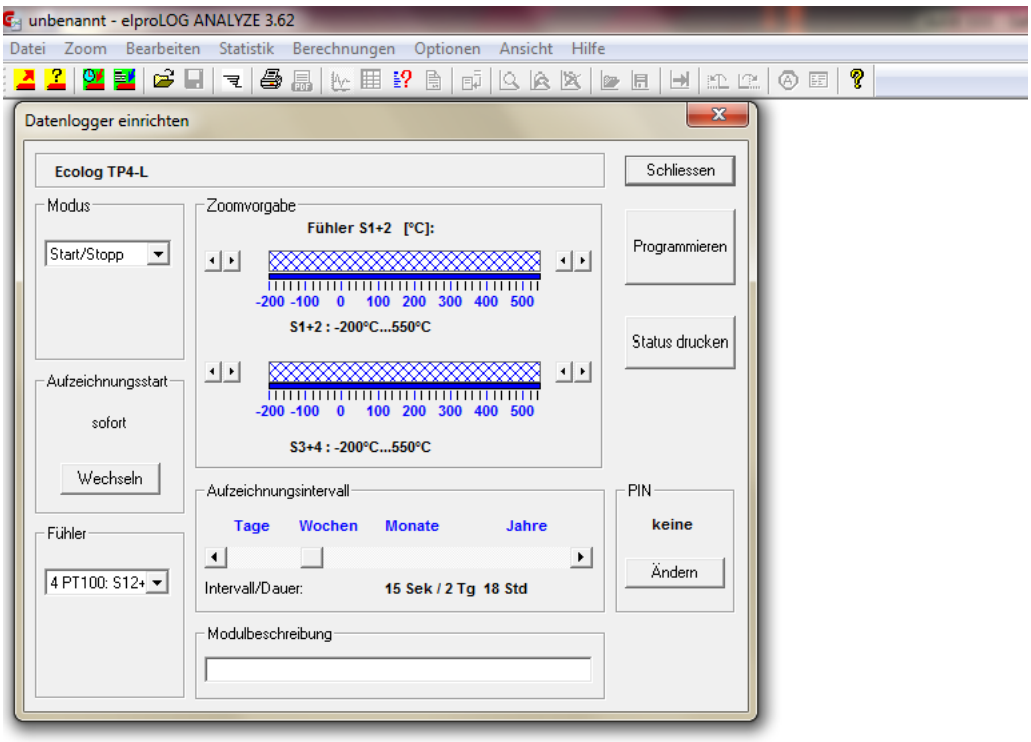


Abbildung 19: „elproLOG ANALYZE“-Software Datenlogger einrichten

Sollte es zu Verbindungsproblemen kommen, so muss unter „Optionen -> Anschluss“ im Fenster „serieller Anschluss“ ein anderer COM-Port gewählt werden.

4.5 Probekörper versetzt in den Klimaschrank stellen

Bei der Positionierung der Probekörper im Klimaschrank sind folgende Punkte zu beachten (Abb. 20):

1) Das Gitter ist in der Mitte des Schranks zu positionieren.
2) Die Flaschen sollten gleichmäßig, mittig und versetzt aufgestellt werden. Der Abstand der Flaschen zueinander sollte mindestens 7,5 cm betragen.
3) Die richtige Lage der Temperaturfühler in den Flaschen muss noch einmal überprüft werden.
4) Gleiche Abstände zu den Seitenwänden des Klimaschranks sind einzuhalten.

Abbildung 20: versetztes Aufstellen der Probekörper

4.6 Verschließen des Klimaschranks

Die Enden der Temperaturfühler, die sich in den Kunststoffflaschen befinden, durch die seitlichen Öffnungen des Klimaschrankes mit den außen an der Seite liegenden Datenloggern verbinden. Im nächsten Schritt werden die seitlichen Öffnungen wieder mit dem Gummipfropfen verschlossen und die Klimaschranktür geschlossen.

4.7 Überprüfung aller Temperaturfühler

Jeder Datenlogger stellt nach dem Verbinden mit den vier Temperaturfühlern die Temperaturen dar. Ist dies nicht der Fall, bedeutet es, dass entweder der Temperaturfühler nicht funktioniert oder dass die einzelnen Temperaturfühler nicht vollständig mit dem Datenlogger verbunden sind (Abb. 21). Beim Anstecken der Temperaturfühler ist darauf zu achten, dass die roten Punkte in einer Linie liegen, denn nur so ist ein richtiges und fehlerfreies Verbinden möglich. Die Farbreihenfolge (blau, grün, rot, violett) ist zu beachten, da in dieser festgelegten Reihenfolge die Daten (Temperaturverläufe) später am Computer dargestellt werden.

Der Datalogger schaltet im Normalbetrieb alle 4 Messkanäle der Reihe nach durch, sodass jeder Kanal, an dem ein Fühler angeschlossen ist, einen Temperaturwert anzeigt. Im linken unteren An-

zeigebereich werden für die Sensoren 1 bis 4 der jeweils aktuelle Messkanal und sein dazugehöriger Messwert angezeigt.

Abbildung 21: Datenlogger fehlerhaft (links) und Datenlogger funktionierend (rechts)

4.8 Proben frieren

Der Gefriervorgang dauert je nach Probenmenge 3-9 h. Um sicherzustellen, dass alle Proben tatsächlich gefrieren, müssen diese mindestens 12 Stunden im Klimaschrank verweilen.

4.9 Temperaturfühler von Datenloggern trennen

Zuerst werden die Kabel der Temperaturfühler von den Datenloggern getrennt. Die Kabel der Temperaturfühler sind durch die tiefen Temperaturen spröde und mit entsprechender Vorsicht durch die seitlichen Öffnungen zu bewegen. Anschließend werden auch die Proben aus dem Klimaschrank entfernt.

4.10 Proben auftauen lassen

Die Temperaturfühler können erst aus den Probeflaschen gezogen werden, wenn die Proben komplett aufgetaut sind. Der Tauvorgang kann durch ein warmes Wasserbad beschleunigt werden. Allerdings ist darauf zu achten, dass die Flaschen nicht in zu heißes Wasser getaucht werden, da sie sonst beschädigt werden können.

4.11 Messergebnisse vom Datenlogger auslesen und speichern

Das Auslesen und Speichern der Messwerte wird mittels der „elproLOG ANALYZE“-Software durchgeführt. Unter „Datei -> Datalogger auslesen” können die Werte vom Datenlogger auf den PC übertragen und darstellt werden. Das Speichern erfolgt über „Datei -> Speichern”, wobei der Name der Datei direkt angepasst werden kann.

Sollte es zu Verbindungsproblemen kommen, so muss unter „Optionen -> Anschluss“ im Fenster „serieller Anschluss“ ein anderer COM-Port gewählt werden und der Datenlogger kann ausgelesen werden.

4.12 Datalogger zurücksetzen

Die Datalogger sollten nach jedem Auslesen der Daten neu eingerichtet werden, um Platz für neue Daten zu machen. Dies geschieht über den Menüpunkt „Datei -> Datalogger einrichten“. Dort kann das Messintervall eingestellt und die Aufnahmedauer gewählt werden. Zur Gefrierpunktbestimmung wird das Messintervall auf 15s eingestellt.

Ist der Speicher des Dataloggers voll, werden die ältesten gespeicherten Daten mit den neu aufgenommenen überschrieben und gehen somit verloren.

5 AUSWERTUNG

Gerade ausgelesene Werte der Datenlogger werden sofort vom Programm dargestellt und bereits vorhandene Daten können über „Datei -> Öffnen“ wieder geöffnet werden. Die Oberfläche von Elprolog zeigt die gesamte gespeicherte Zeitperiode (auch wenn keine Fühler angeschlossen waren). Über die Oberfläche des Programms können die Gefrierpunkte aber nur sehr ungenau bestimmt werden.

Zur genauen Bestimmung der Gefrierpunkte werden die Dateien der Datenlogger in Textdokument-Dateien umgewandelt und abgespeichert.

Die Textdokument-Dateien können in Excel eingelesen werden und die genauen Gefrierpunkte können mit Hilfe einer Häufigkeitsverteilung bestimmt werden, die angibt, wie oft eine Gefrierpunkttemperatur aufgetreten ist. Der Gefrierpunkt ist statistisch betrachtet schließlich der Wert, der am häufigsten gemessen wurde. Zur Kontrolle der Werte kann der Gefrierpunkt grafisch ausgewertet werden. Dies geschieht an Hand der Temperaturverläufe, die mit Hilfe der Datenlogger aufgezeichnet worden sind. Der Gefrierpunkt liegt an der Stelle, an der die Kurve annähernd in die Horizontale übergeht und ein kleines Halteplateau besitzt (Abb.22 (a)). Der Prozess, dass die Temperatur einer Flüssigkeit unter ihren Gefrierpunkt sinkt, ohne zu gefrieren, wird „Super Cooling“ genannt und der Gefrierpunkt befindet sich nach diesem Punkt (Abb. 22 (b)).

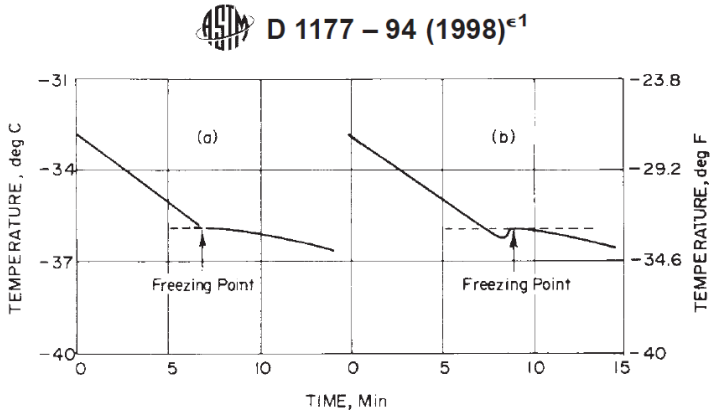


Abbildung 22: Grafische Ermittlung des Gefrierpunkts

In den folgenden Abbildungen 23 & 24 sind die Gefrierpunkte beispielhaft für Natriumchlorid sowohl mit Hilfe einer Häufigkeitsverteilung als auch durch grafische Auswertung dargestellt.

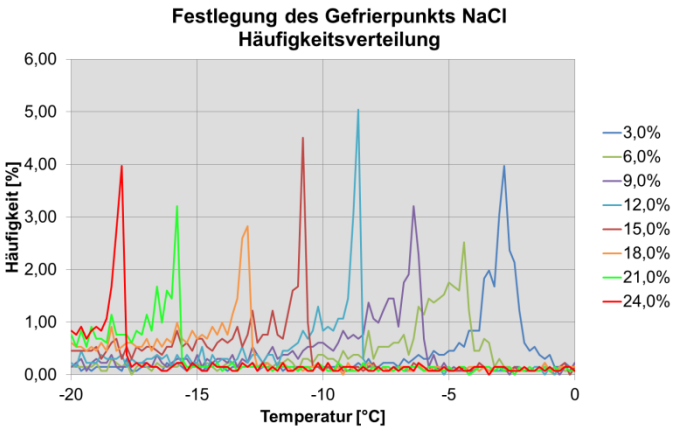


Abbildung 23: Beispielhaft Auswertung über Häufigkeitsverteilung

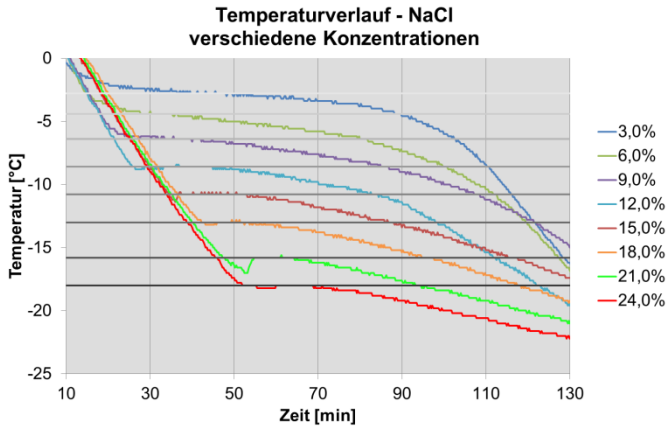


Abbildung 24: Beispielhaft grafische Auswertung

Der Prüfbericht muss folgende Informationen beinhalten:

- Projektinformation (Auftraggeber, Projektnummer, Projektleiter)
- Datum
- Sachbearbeiter
- Genaue Angaben zu Ist-Menge von Wasser und zu Soll- und Ist-Menge des Salzes
- Soll- und Ist-Werte der Konzentration
- Gefrierpunkt

Beispiele eines solchen Prüfprotokolls befinden sich im Anhang.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Der Klimaschrank (links) und sein Display (rechts) 2
Abbildung 2: Datalogger mit 4 Temperaturfühlern 3
Abbildung 3: Temperaturfühler 4
Abbildung 4: Datalogger mit Sensor 4
Abbildung 5: Gefäße und Hilfsmittel 5
Abbildung 6: Die elektronische Waage 6
Abbildung 7: Gefäße und Hilfsmittel 7
Abbildung 8: Kunststoffflaschen für exotherme Streumittel 7
Abbildung 9: Waage tarieren 8
Abbildung 10: Flaschen befüllen (links) und wiegen (rechts) 8
Abbildung 11: Salz abwiegen (links) und Umfüllen (rechts) 9
Abbildung 12: fertige Kunststoffflasche 10
Abbildung 13: Taumittel abwiegen 11
Abbildung 14: Wassermenge abwiegen 12
Abbildung 15: fertige Sole umfüllen 13
Abbildung 16: fertige Kunststoffflasche 13
Abbildung 17: Schalter zum Ein- und Ausschalten 14
Abbildung 18: Display Klimaschrank 15
Abbildung 19: „elproLOG ANALYZE“-Software Datenlogger einrichten 16
Abbildung 20: versetztes Aufstellen der Probekörper 17
Abbildung 21: Datenlogger fehlerhaft (links) und Datenlogger funktionierend (rechts) 18
Abbildung 22: Grafische Ermittlung des Gefrierpunkts 20
Abbildung 23: Beispielhaft Auswertung über Häufigkeitsverteilung 21
Abbildung 24: Beispielhaft grafische Auswertung 21

ANHANG

Beispiel eines Prüfprotokolls Natriumchlorid

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN Vienna University of Technology

Institut für Verkehrswissenschaften
Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen
Gußhausstraße 28/E230/3
1040 WIEN
Tel.: +43-1-58801-23301
Fax: +43-1-58801-23399
DVR:0005886

Prüfprotokoll: Gefrierpunkt	**F000-0** **Seite 1 von 1**

Auftraggeber
Datum
Projekt
Projektleiter
Sachbearbeiter
Arbeitsanweisung
Datenfile Name
Geprüftes Salz

Messungen

Probe №	Sole - Soll [M-%]	Wasser [g]	Salz SOLL [g]	Salz IST [g]	Sole - Ist [M-%]	Gefrierpunkt [°C]	Bemerkungen
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

Beispiel eines Prüfprotokolls Calcium- und Magnesiumchlorid

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Institut für Verkehrswissenschaften
Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen
Gußhausstraße 28/E230/3
1040 WIEN
Tel.: +43-1-58801-23301
Fax: +43-1-58801-23399
DVR:0005886

Prüfprotokoll: Gefrierpunkt	F000-0 Seite 1 von 1

Auftraggeber
Datum
Projekt
Projektleiter
Sachbearbeiter
Arbeitsanweisung
Datenfile Name
Geprüftes Salz

Messungen

Probe №	Sole - Soll [M-%]	Wasser ZIEL [g]	Salz SOLL [g]	Salz IST [g]	Wasser SOLL [g]	Wasser IST [g]	Sole - Ist [M-%]	Gefrierpunkt [°C]	Bemerkungen
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

AA <Nr.> - Bestimmung der Tauwirksamkeit von festen Taumitteln

Inhalt

1 Überblick 2
2 Geräte, Hilfsmittel und Gefässe 2
3 Versuchsaufbau 3
4 Versuchsvorbereitung / Probekörperherstellung 7
5 Versuchsdurchführung 10
6 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 13

1 ÜBERBLICK

Diese Arbeitsanweisung beschreibt die Bestimmung der Tauwirksamkeit von festen Taumitteln in Abhängigkeit von verschiedenen Korngruppen bei vier verschiedenen Temperaturen (Tab. 1). Dadurch soll die Menge an getauter Sole [g] pro Taustoffmenge [g] ermittelt werden. Der Versuch findet mit Hilfe von PE-Handschuhen im geschlossenen Klimaschrank statt, damit eine konstante Temperatur gehalten werden kann. Um einen Datenpool für einen Bewertungshintergrund des Salzes zu bekommen, wird der Versuch jeweils in Vierfachbestimmung durchgeführt.

Tabelle 1: Versuchsumfang

Korngruppe	Temperatur			
0,125/1,0	-2,5 °C	-5,0 °C	-7,5 °C	-10,0 °C
1,0/3,15	-2,5 °C	-5,0 °C	-7,5 °C	-10,0 °C
3,15/5,0	-2,5 °C	-5,0 °C	-7,5 °C	-10,0 °C

Es werden im geschlossenen Klimaschrank Eisplatten in Metallschalen erzeugt, auf denen 10,1 g Tausalz gleichmäßig aufgebracht werden. Das Salz wird auf insgesamt neun Platten mit verschieden Einwirkzeiten aufgestreut. Die Eisplatten werden inklusive der Schalen vor dem Aufstreuen des Salzes, mit Salz und nach der Wirkung des Salzes (darauf befindliche Tauflüssigkeit wird abgegossen) gewogen. Aus der Differenz der beiden Gewichte ist die Menge an abgegossener Sole in [g Sole/ g Taustoff] zu bestimmen. Daraus können Aussagen bezüglich der Tauwirksamkeit und Taurate des Salzes getroffen werden (Handzettel Anhang).

2 GERÄTE, HILFSMITTEL UND GEFÄSSE

2.1 Klimaschrank

Im Klimaschrank (Abb. 1) können Temperaturen von -50 °C bis +180 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 0-100% (bei Temperaturen ≥ ± 5 °C) eingestellt werden. Er ist mit einem Display ausgerüstet, auf dem Soll- und Ist-Werte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit abzulesen sind. Des Weiteren hat der Klimaschrank die Funktion, deren Verläufe über die Zeit darzustellen. Der Klimaschrank ist ein MKF 720-Modell der Firma Binder.

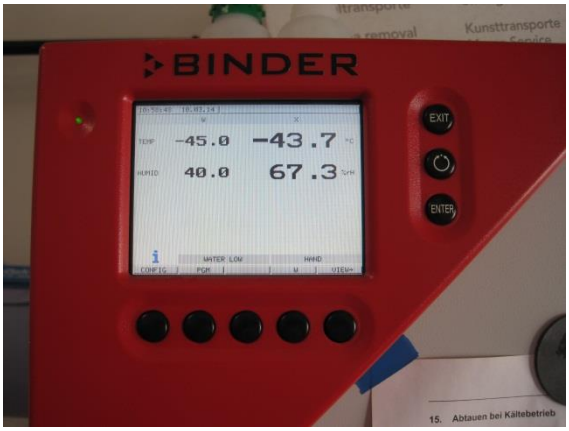


Abbildung 1: Der Klimaschrank (links) und sein Display (rechts)

3 VERSUCHSAUFBAU

Bei dem Versuchsaufbau müssen einige Umstände / Besonderheiten beachtet werden. Die Anzahl und der Aufbau der im Folgenden aufgelisteten Materialen (Tab. 2 und Abb. 3) hängen von der Art der Bestimmung ab. Der Versuch kann als Einzelbestimmung durchgeführt werden, allerdings bietet der Klimaschrank genug Platz zwei Versuche parallel (Doppelbestimmung) durchzuführen.

Tabelle 2: Materialliste

	Einzelbestimmung	**Doppelbestimmung**
A1 / A2	**9** Metallschalen Ø205mm	**18** Metallschalen Ø205mm
B	**11** kleine Matalldosen	**20** kleine Matalldosen
C	**1** Prüfprotokoll	**2** Prüfprotokolle
D	1 Elektronische Waage	1 Elektronische Waage
E	1 Metallgefäß	1 Metallgefäß
F	1 Plastikkiste	1 Plastikkiste

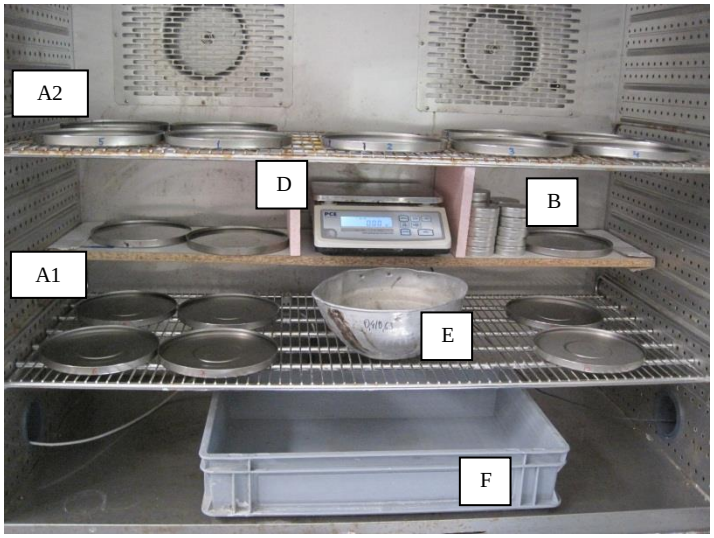


Abbildung 2: Gefäße und Hilfsmittel (bei geöffnetem Klimaschrank)

Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass alle Gegenstände so angeordnet werden, dass sie während der Arbeiten gut mit den PE-Handschuhen erreichbar sind.

3.1 Metallschalen

Eine sorgfältige Beschriftung der Metallschalen (Abb. 3 A1/A2) ist notwendig, da diese sonst leicht durcheinander gebracht werden können und die einzuhaltende Reihenfolge vertauscht werden kann. Daher sollten sie mit einem wasserfesten Stift an der Außenseite sichtbar beschriftet werden. Dies erfolgt zur besseren Unterscheidung am besten durch zwei verschiedene Farben, da der Versuch in einer Doppelbestimmung durchgeführt wird. Die Metallschalen werden mit 250 g ±5 g Wasser befüllt, eingewogen und entsprechend des Versuchsaufbaus angeordnet (Abb. 3). Dies geschieht im Klimaschrank damit der Transportweg wegfällt, kein Wasser verschüttet werden kann und die Wege kurz sind.

3.2 Elektronische Waage

Die elektronische Waage (Abb. 3 D) wird dazu verwendet, einerseits die Eisplatten inklusive der Metallschalen vor und nach der Wirkung des Tausalzes zu wiegen sowie andererseits das Gewicht des aufgebrachten Salzes zu bestimmen. Damit die elektronische Waage nicht auf den Luftstrom innerhalb des Klimaschranks reagiert, muss diese durch eine Styroporkonstruktion abgeschirmt werden. Sie kann bei einer Temperatur von bis zu -10 °C zuverlässig arbeiten, wird über ein Netzteil an den Strom angeschlossen und ist somit fürs Arbeiten im Klimaschrank geeignet.

Abbildung 3: Elektronische Waage

3.3 Kleine Metalldosen

Es werden statt 10,0 g Salz 10,1 g des zu prüfenden Tausalzes in kleinen Metalldosen (Abb. 3 B) abgewogen, da beim Auftragen des Salzes im Klimaschrank ein kleiner Rest an der Dosenwand hängen bleiben kann. Die Metalldosen werden mit einem Deckel verschlossen, damit sie bereits vor Versuchsbeginn im Klimaschrank bereit stehen können, das Salz nicht verklumpt und der Vorgang des Abwiegens nicht noch zusätzlich während des Versuchs im Klimaschrank stattfinden muss.

Abbildung 4: Kleine Metalldosen

3.4 Prüfprotokoll und Schreibmittel

Es ist ratsam, in der Nähe des Klimaschranks einen kleinen Tisch zu haben, auf dem die Schreibmaterialien liegen und so schnell nach dem Abwiegen zu erreichen sind (Handzettel Anhang).

3.5 Metallgefäß

Das Metallgefäß (Abb. 3 E) wird zum Abgießen der getauten Sole von den Eisplatte nach der Einwirkungszeit des Salzes verwendet.

3.6 Plastikkiste

Die Plastikkiste (Abb. 3 F) steht im unteren Bereich des Klimaschranks (am Boden) und in diese sind die bereits benutzten Metalldosen und Metallplatten abzulegen. Sie sollte so angeordnet werden, dass sie direkt an der Klimaschranktür und direkt unterhalb der Arbeitshandschuhe steht.

4 VERSUCHSVORBEREITUNG / PROBEKÖRPERHERSTELLUNG

4.1 Kleine Metalldosen mit Salz befüllen

- Leere Metalldosen auf die Waage stellen und die Waage tarieren

Abbildung 5: Waage tarieren

- Abwiegen von 10,1 g Tausalz in den kleinen Metalldosen, die anschließend mit dem Deckel zu verschließen sind. Es ist ratsam, zwei Dosen mehr zu befüllen als gebraucht werden, falls eine Dose herunterfällt oder beschädigt wird.

Abbildung 6: Füllen der Metalldose (links) und geschlossene Metalldose (rechts)

4.2 Versuchsaufbau

Versuchsaufbau wie folgt aufbauen:

- **Einfachbestimmung**

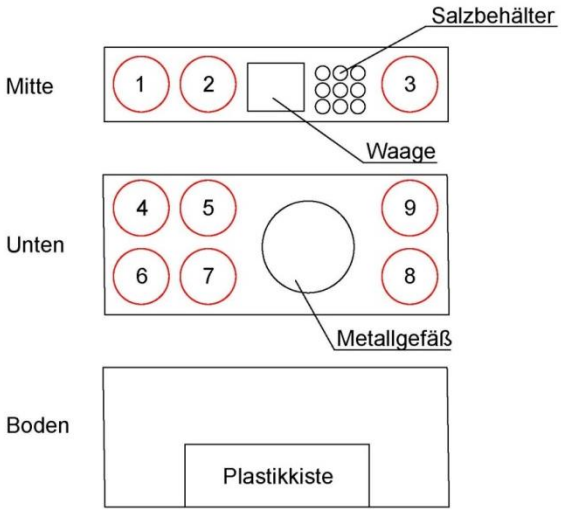


Abbildung 7: Einzelbestimmung

- **Parallele Doppelbestimmung**

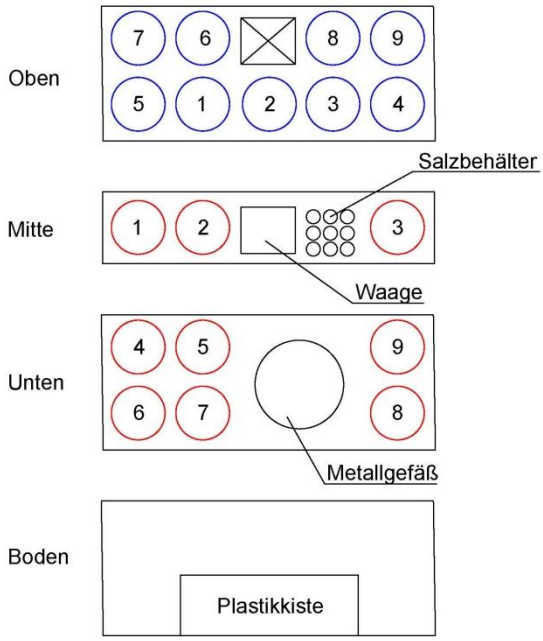


Abbildung 8: Doppelbestimmung

4.3 Metallschalen vorbereiten

- Leere Metallschale auf die Waage stellen und die Waage tarieren

Abbildung 9: Waage tarieren

- Anschließend die einzelnen Metallschalen mit 250 g ±5 g Wasser befüllen und an ihren vorgesehenen Platz stellen (siehe 3.2 Versuchsaufbau).

Abbildung 10: Füllen der Metallschale

5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

5.1 Klimaschrank einschalten

Der Knopf zum Ein- und Ausschalten befindet sich an der rechten unteren Seite des Klimaschranks (Abb. 12). Falls es beim Einschalten zu einem Pfeifton und der Anzeige „Please restart“ in der LCD-Anzeige kommt, ist der Klimaschrank noch einmal aus- und neu anzuschalten.

Abbildung 11: Schalter zum Ein- und Ausschalten

5.2 Sollwerte für Temperatur und Luftfeuchtigkeit eingeben

Die Eingabe der Soll-Werte erfolgt über das Eingabemodul in der linken oberen Ecke des Klimaschranks (Abb. 12). Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit wählt man über die vierte Taste „HAND W“ (von links nach rechts) aus. Mit den Pfeiltasten erfolgt die Eingabe der gewünschten Werte und mittels der Taste „Enter“ wird dieser Wert bestätigt. Über die Taste „Exit“ gelangt man wieder zurück in das Hauptmenü.

Für die Bestimmung von Gefrierpunkten sind Temperaturen von **-2,5 bis -10,0°C** und eine relative Luftfeuchtigkeit von **65,0%** einzustellen.

5.3 Warten, bis die Proben frieren

Der Versuch sollte am besten einen Tag vor der Versuchsdurchführung aufgebaut werden und der Klimaschrank über Nacht laufen, damit die Proben sicher am nächsten Tag durchgefroren sind. Denn es kann über 3 Stunden dauern, bis die Probekörper komplett gefroren sind.

5.4 Einzelbestimmung

- **Elektronische Waage einschalten und auf „Tara“ setzen**

- **Metallschale mit Eisplatte wiegen**
  Den entsprechenden Wert im Handzettel (Anhang) unter „Gewicht Wasser inkl. Schale“ eintragen.

- **Tausalz aufbringen und Startzeit aufschreiben**

  Die kleinen Metalldosen werden im Klimaschrank geöffnet und das Tausalz wird gleichmäßig auf die Eisfläche der bereits vorher abgewogenen Metallschale aufgebracht. Die Uhrzeit (Wirkungsbeginn), zu der das Salz aufgebracht wurde, ist auf dem Display des Klimaschranks oder auf einer Uhr abzulesen und auf dem Handzettel unter „Uhrzeit Beginn“ (Anhang) zu notieren. Die „Uhrzeit Ende-SOLL“ auch gleich errechnen und eingetragen, damit sie nicht verpasst wird.

- **Metallschale inkl. Tausalz wiegen**

  Der gesamte Probekörper ist nun zu wiegen und der Wert im Handzettel „Gewicht Wasser inkl. Schale + Salz“ (Anhang) einzutragen.

- **Vorgang für alle Probekörper wiederholen und in der Zwischenzeit darauf achten, dass die SOLL-Endzeiten nicht überschritten werden**

- **Soll-Endzeit erreicht**

  Sobald die Uhr oder auf dem Display des Klimaschranks die vorher ermittelte Soll-Endzeit anzeigt wird, wird das getaute Sole-Eis-Gemisch von den Probekörpern in das Metallgefäß ausgeleert, die Waage auf „Tara“ gesetzt und der Probekörper erneut gewogen. Der neue Wert wird auf dem Handzettel „Gewicht nach Tauwirkung inkl. Schale“ (Anhang) notiert.

5.5 Doppelbestimmung

Gesonderten Versuchsaufbau beachten (Kapitel 3.2)

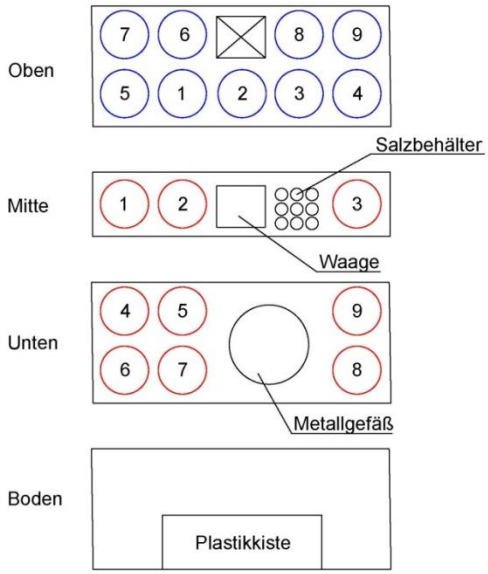


Abbildung 12: Aufbau Doppelbestimmung

- **Paralleler Start des zweiten Versuchs**
  Sobald Metallschale Nr. 5 des ersten Versuchs abgegossen wurde, kann der zweite Versuch gestartet werden, da nun genug Platz auf der unteren Ebene für den zweiten Versuch. Hierbei gelten die selben Arbeitsschritte, aber es muss eine neue Aufstellung im Klimaschrank beachtet werden, damit die Schalen nicht vertauscht werden (Abb. 14).

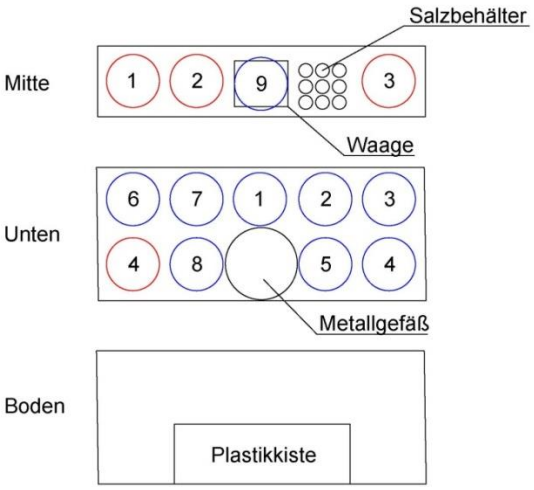


Abbildung 13: Parallel gestarteter Versuch

6 AUSWERTUNG UND DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Nachdem der Handzettel vollständig ausgefüllt ist, kann aus der Differenz der Gewichte der Eisplatte inkl. Glasschale vor und nach der Wirkung des Tausalzes die abgegossene Sole berechnet werden. Da die aufgebrachte Salzmenge auch bekannt ist, kann die abgegossene Sole pro Gramm Taustoff bestimmt und kann für alle Einwirkzeiten bestimmt werden (Handzettel siehe Anhang).

Zur Auswertung der Ergebnisse wird die Tauwirksamkeit und die Taurate ermittelt und für je eine kurze, mittlere und lange Einwirkzeit zum Vergleich der einzelnen Werte dargestellt.

Tauwirksamkeit: Die TW ist definiert durch die Arbeit pro Zeiteinheit und kann durch die folgende Formel ausgedrückt werden:

$$TL = \frac{W}{t}$$

W – Arbeit [J]

t – Zeiteinheit [min]

Taurate: Die TR ist definiert als die nach der Zeit abgeleitete Tauwirksamkeit und wird durch folgende Formel ausgedrückt:

$$TR = \frac{d\,TW}{dt}$$

dTW – Tauwirksamkeit

dt – Ableitung nach der Zeit

Eine Regressionsanalyse zeigt, dass zwischen der Einwirkzeit der Taumittel und ihrer Tauwirksamkeit ein annähernd ein Zusammenhang besteht, der mit einem Polynom 2. Ordnung dargestellt werden kann. Das Gütemaß R^2 zeigt, dass die Streuung zu R^2 [in %] durch die Polynomen-Gleichung erklärt werden kann.

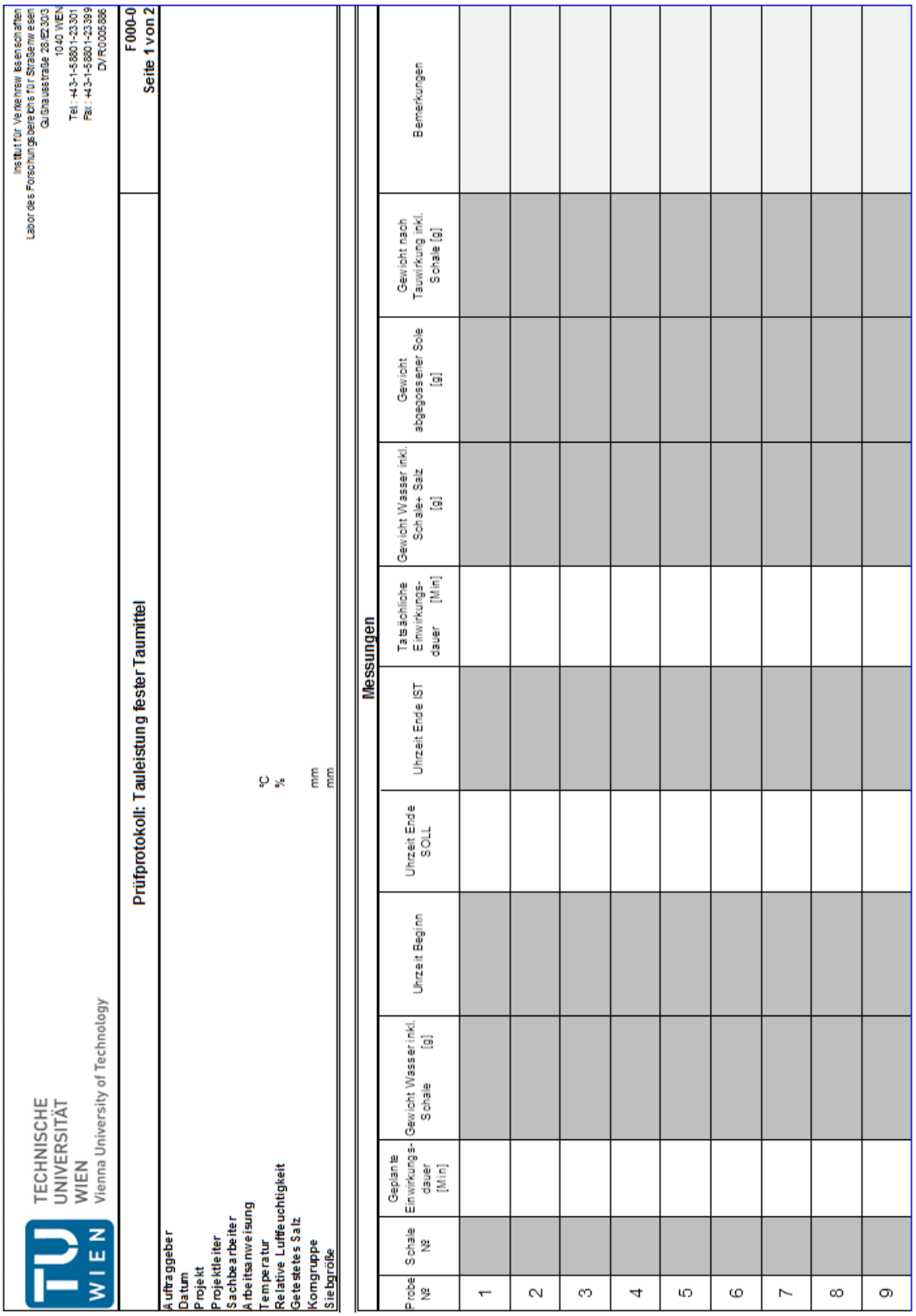
ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Der Klimaschrank (links) und sein Display (rechts) 3
Abbildung 2: Gefäße und Hilfsmittel (bei geöffnetem Klimaschrank) 4
Abbildung 3: Elektronische Waage 5
Abbildung 4: Kleine Metalldosen 5
Abbildung 5: Waage tarieren 7
Abbildung 6: Füllen der Metalldose (links) und geschlossene Metalldose (rechts) 7
Abbildung 7: Einzelbestimmung 8
Abbildung 8: Doppelbestimmung 8
Abbildung 9: Waage tarieren 9
Abbildung 10: Füllen der Metallschale 9
Abbildung 11: Schalter zum Ein- und Ausschalten 10
Abbildung 12: Aufbau Doppelbestimmung 12
Abbildung 13: Parallel gestarteter Versuch 12

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Versuchsumfang 2
Tabelle 2: Materialliste 3

ANHANG



Institut für Verkehrswissenschaften
Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen
Gußhausstraße 28/E232/3
1040 WIEN
Tel.: +43-1-58801-23301
Fax: +43-1-58801-23399
DVR:0005886

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

F000-0
Seite 1 von 2

Prüfprotokoll: Tauleistung fester Taumittel

Auftraggeber
Datum
Projekt
Projektleiter
Sachbearbeiter
Arbeitsanweisung
Temperatur °C
Relative Luftfeuchtigkeit %
Getestetes Salz
Korngruppe mm
Siebgröße mm

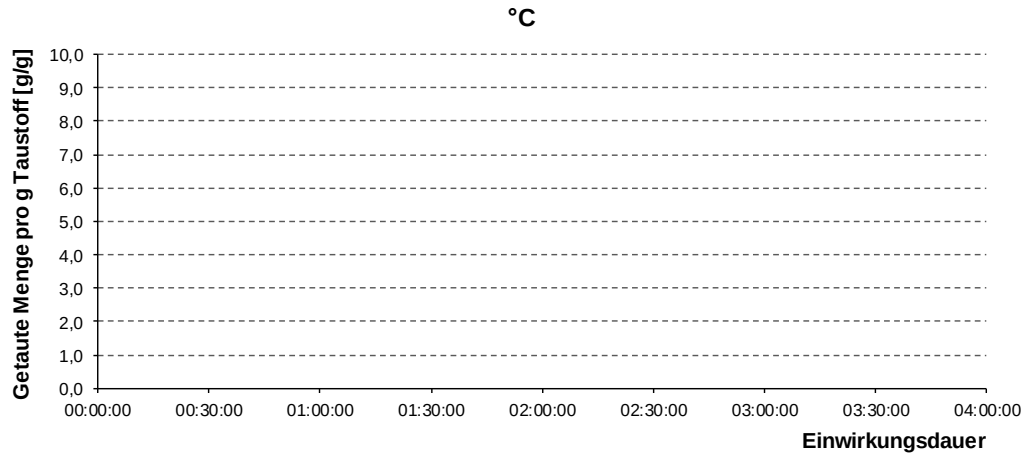
Messungen

Probe №	Schale №	Geplante Einwirkungs-dauer [Min]	Gewicht Wasser inkl. Schale [g]	Uhrzeit Beginn	Uhrzeit Ende SOLL	Uhrzeit Ende IST	Tatsächliche Einwirkungs-dauer [Min]	Gewicht Wasser inkl. Schale+ Salz [g]	Gewicht abgegossener Sole [g]	Gewicht nach Tauwirkung inkl. Schale [g]	Bemerkungen
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Institut für Verkehrswissenschaften
Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen
Gußhausstraße 28/E230/3
1040 WIEN
Tel.: +43-1-58801-23301
Fax: +43-1-58801-23399
DVR:0005886

Prüfprotokoll: Tauleistung fester Taumittel | **F000-0** **Seite 2 von 2**



Messungen

Probe №	Einwirkungsdauer	Aufgebrachte Salzmenge [g]	Gewicht abgegossener Sole [g]	Getaute Sole berechnet [g]	Messabweichung bezogen auf der gesamten Masse [%]	Abgetaute Menge pro g Taustoff [g_{Sole}/g_{TS}]	Bemerkungen
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							

AA <Nr.> - Bestimmung der Tauwirksamkeit von flüssigen Taumitteln

Inhalt

1 Beschreibung 2
2 Geräte, Hilfsmittel und Gefässe 2
3 Versuchsvorbereitung / Probekörperherstellung 6
4 Versuchsdurchführung 13
5 Auswertung und Darstellung der Ergebnisse 16

1 BESCHREIBUNG

Diese Arbeitsanweisung beschreibt die Bestimmung der Tauwirksamkeit von flüssigen Taumitteln in Abhängigkeit von verschiedenen Temperaturen. Dadurch soll die Menge an getauter Sole [g] pro flüssigem Taumittel [g] ermittelt werden. Der Versuch findet mit Hilfe von PE-Handschuhen im geschlossenen Klimaschrank statt, damit eine konstante Temperatur gehalten werden kann. Um einen Datenpool für einen Bewertungshintergrund des Salzes zu bekommen, wird der Versuch mit verschiedenen Solekonzentrationen jeweils in Vierfachbestimmung durchgeführt.

Es werden im geschlossenen Klimaschrank in Metalldosen Eisplatten mit einer Vertiefung erzeugt und 10 ml Sole mit Hilfe einer Einwegspritze aufgebracht. Die Sole wird auf insgesamt neun Eisplatten mit verschieden Einwirkzeiten aufgetragen. Die Eisplatten werden inklusive der Schalen vor dem Auftragen der Sole, mit der Sole und nach der Einwirkzeit der Sole (darauf befindliche Tauflüssigkeit wird abgegossen) gewogen. Aus der Differenz der beiden Gewichte ist die Menge an abgegossener Sole in [g getaute Sole/ g flüssiger Taustoff] zu bestimmen. Daraus können Aussagen bezüglich der Tauwirksamkeit und Taurate des Salzes getroffen werden (Anhang).

2 GERÄTE, HILFSMITTEL UND GEFÄSSE

2.1 Klimaschrank

Im Klimaschrank (Abb. 1) können Temperaturen von -50 °C bis +180 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 0-100% (bei Temperaturen ≥ ± 5 °C) eingestellt werden. Er ist mit einem Display ausgerüstet, auf dem Soll- und Ist-Werte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit abzulesen sind. Des Weiteren hat der Klimaschrank die Funktion, deren Verläufe über die Zeit darzustellen. Der Klimaschrank ist ein MKF 720-Modell der Firma Binder.

Abbildung 1: Der Klimaschrank (links) und sein Display (rechts)

2.2 Materialien und Versuchsaufbau

Der Versuch kann als Einzelbestimmung durchgeführt werden, allerdings bietet der Klimaschrank genug Platz zwei Versuche parallel (Doppelbestimmung) durchzuführen. Im Folgenden sind die benötigten Materialen je nach Art des Versuchs aufgelistet (Tab. 2/Abb.2).

Tabelle 1: Materialliste

	Einzelbestimmung	**Doppelbestimmung**
A1 / A2	**9** Metalldosen Ø90mm	**18** Metalldosen Ø90mm
B	**11** Einwegspritzen	**20** Einwegspritzen
C	**1** Prüfprotokoll	**2** Prüfprotokolle
D	1 Elektronische Waage	1 Elektronische Waage
E	1 Metallgefäß	1 Metallgefäß
F	1 Plastikkiste	1 Plastikkiste

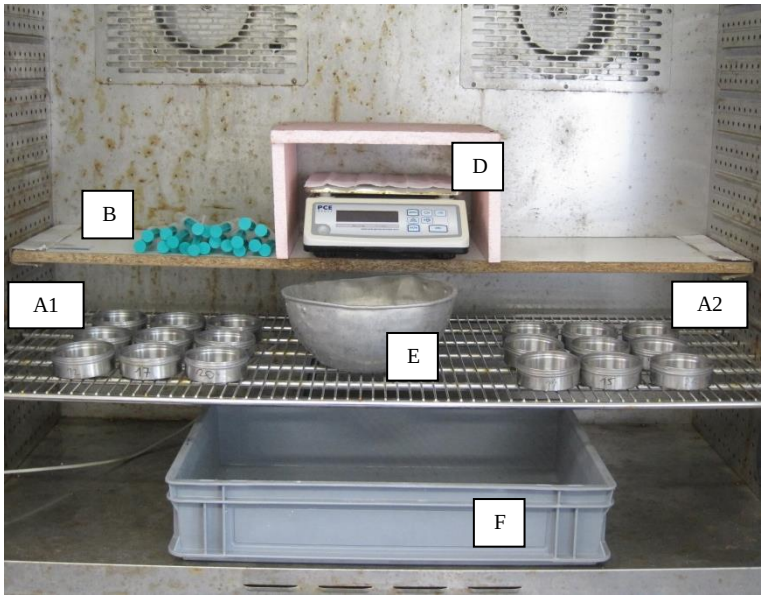


Abbildung 2: Gefäße und Hilfsmittel (bei geöffnetem Klimaschrank)

Des Weiteren muss darauf geachtet werden, dass alle Gegenstände so angeordnet werden, dass sie während der Arbeiten gut mit den PE-Handschuhen erreichbar sind und nicht herunterfallen.

2.3 Metalldosen

Die Eisplatten in den Metalldosen haben für diesen Versuch keine glatte Oberfläche, sondern eine definierte Vertiefung (Abb. 3), damit eine gleichmäßige Angriffsfläche entsteht. Die Vertiefung wird mit Hilfe des Dosendeckels erzeugt, an dessen Unterseite eine formengebende Schale angebracht ist und das Wasser an dieser Stelle verdrängt wird.

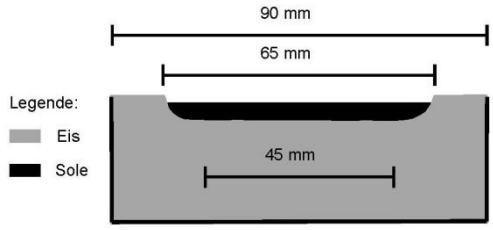


Abbildung 3: Skizze einer Metalldose

Eine sorgfältige Beschriftung der Metallschalen (Abb. 2 A1/A2) ist notwendig, da diese sonst leicht durcheinander gebracht werden könnten und die einzuhaltende Reihenfolge vertauscht werden kann. Daher sollten sie mit einem wasserfesten Stift an der Außenseite sichtbar beschriftet werden. Die Metalldosen werden mit Leitungswasser befüllt, mit einem Deckel verschlossen und gefroren

2.4 Elektronische Waage

Die elektronische Waage (Abb. 2D) wird dazu verwendet, einerseits die Eisplatten inklusive der Metallschalen vor und nach der Wirkung des Tausalzes zu wiegen sowie andererseits das Gewicht des aufgebrachten Salzes zu bestimmen. Damit die elektronische Waage nicht auf den Luftstrom innerhalb des Klimaschranks reagiert, muss diese durch eine Styroporkonstruktion abgeschirmt werden. Sie kann bei einer Temperatur von bis zu -10 °C zuverlässig arbeiten, wird über ein Netzteil an den Strom angeschlossen und ist somit fürs Arbeiten im Klimaschrank geeignet.

2.5 Einwegspritzen

Die Spritzen (Abb. 2 B) werden mit 10,0 ml der Sole gefüllt und bereits vor Versuchsbeginn im Klimaschrank bereit gestellt, damit der Vorgang des Abfüllens nicht noch zusätzlich während des Versuchs im Klimaschrank stattfinden muss.

2.6 Prüfprotokoll und Schreibmittel

Es ist ratsam, in der Nähe des Klimaschranks einen kleinen Tisch zu haben, auf dem die Schreibmaterialien liegen und so schnell nach dem Abwiegen zu erreichen sind (Vorlage Anhang).

2.7 Metallgefäß

Das Metallgefäß (Abb. 2 E) wird zum Abgießen der getauten Sole von den Eisplatte nach der Einwirkzeit des Salzes verwendet.

2.8 Plastikkiste

Die Plastikkiste (Abb. 2 F) steht im unteren Bereich des Klimaschranks (am Boden) und in diese sind die bereits benutzten Metalldosen und Metallplatten abzulegen. Sie sollte so angeordnet werden, dass sie direkt an der Klimaschranktür und direkt unterhalb der Arbeitshandschuhe steht.

3 VERSUCHSVORBEREITUNG / PROBEKÖRPERHERSTELLUNG

3.1 Benötigte Hilfsmittel zur Versuchsvorbereitung

Ehe mit der Versuchsvorbereitung begonnen werden kann, müssen einige Gefäße und Hilfsmittel (Abb. 6) vorhanden sein.

1. Erlenmeyerkolben zum Mischen der Solelösung
2. Becherglas zum Einfüllen von Leitungswasser
3. Spritzflasche zum genauen Abwiegen der Wassermenge
4. Glastrichter zum Einfüllen von Salz
5. Großer Plastiktrichter zum Einfüllen von exotherm reagierenden Stoffen
6. Magnetrührer zum Mischen der Solelösung
7. Glasschale zum Abfüllen der Solelösung
8. Arbeitshandschuhe zum Öffnen der Dosen (siehe 4 Versuchsdurchführung)

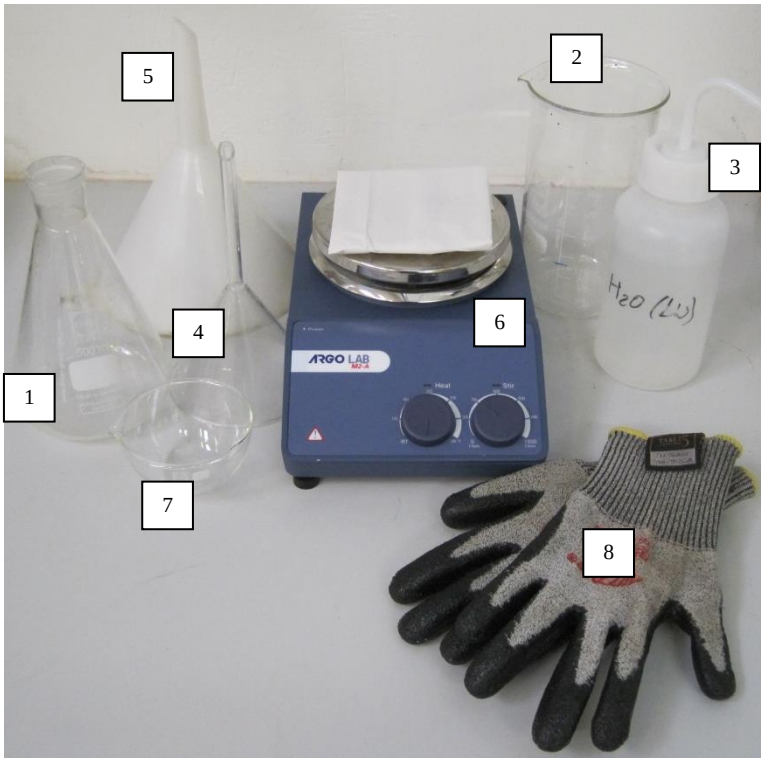


Abbildung 4: Hilfsmittel zur Versuchsvorbereitung

3.2 Solelösung herstellen

- Leeren Erlenmeyerkolben auf die Waage stellen und die Waage tarieren

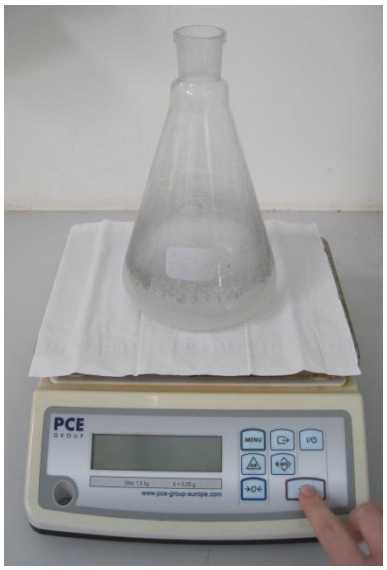


Abbildung 5: Waage tarieren

- Abwiegen von 220 g Leitungswasser zum Befüllen von 20 Spritzen a 10 ml. Es ist ratsam, mehr Spriten aufzuziehen als gebraucht werden, falls eine Spritze herunterfällt oder beschädigt wird.

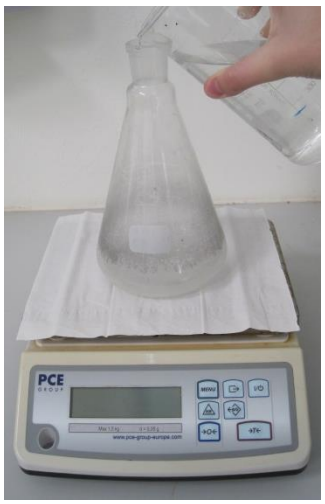


Abbildung 6: Leitungswasser einwiegen

- Die Salzmenge je nach entsprechender ZIEL-Konzentration wird nach folgender Formel berechnet:

$$SM = \frac{\frac{SK}{100} \cdot WM}{1 - \frac{SK}{100}}$$

SM – Salzmenge in [g]

SK – Solenkonzentration in [M-%]

WM – Wassermenge in [g]

- Die entsprechende Salzmenge wird abgewogen und mit Hilfe eines Glastrichters in den Erlenmeyerkolben gefüllt.

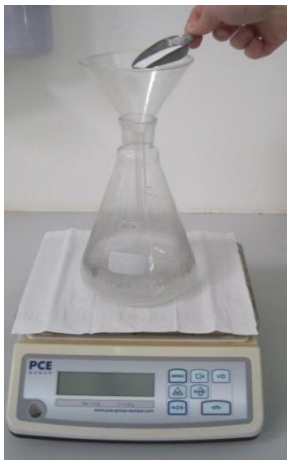


Abbildung 7: entsprechende Salzmenge einwiegen

3.3 Salze mit exothermer Reaktion

Hier ist beim Mischen auf die Reihenfolge zu achten. Es sollte im ersten Schritt die jeweilige Salzmenge mit Hilfe eines Trichters eingewogen und dann nach und nach das Leitungswasser hinzu gegeben werden. Alle Arbeiten sollten auf Grund der Dampf- und Wärmeentwicklung unter einem Abzug stattfinden. Ehe die Lösung gemischt werden kann, muss diese noch Auskühlen. Zur schnelleren Abkühlung kann ein Wasserbad verwendet werden.

Abbildung 8: Salzmenge abwiegen (links) und Wasser hinzugeben (rechts)

- Damit das Salz in dem Gemisch sich komplett auflöst, wird dieses mit Hilfe eines Magnetrührers bei 700 Umdrehungen /Minute so lange gemischt, bis eine einheitliche, klare Solelösung entsteht.
-

Abbildung 9: Mischen mit dem Magnetrührer

3.4 Spritzen aufziehen

- Zum leichteren Abfüllen in die Einwegspritzen wird die Lösung in eine kleine Glasschale umgefüllt. Nun lassen sich die Spritzen mit je 10 ml leicht aufziehen.

Abbildung 10: Einwegspritzen aufziehen

- Anschließend können diese im Klima-schrank positioniert werden (Abb. 13).

Abbildung 11: Positionierung der Einwegspritzen

3.5 Metalldosen vorbereiten

- Leere Metalldosen fast bis zum Dosenrand mit Leitungswasser füllen.

Abbildung 12: Metalldosen mit Leitungswasser befüllen

- Anschließend die Metalldosen mit einem Deckel verschließen. Auch hier lieber ein paar mehr Dosen vorbereiten, da sich nicht alle öffnen lassen werden (siehe 4. Versuchsdurchführung).

Abbildung 13: geschlossene Metalldose

- Ggf. die Dose noch mit Hilfe einer Spritze auffüllen, sodass das Wasser bis knapp unter dem Deckel steht aber noch nicht überläuft.

Abbildung 14: Wasser auffüllen

- Metalldosen zum Frieren im Klimaschrank auf der untersten Ebene anordnen.

Abbildung 15: Positionierung der Metalldosen

4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.1 Klimaschrank einschalten

Der Knopf zum Ein- und Ausschalten befindet sich an der rechten unteren Seite des Klimaschranks (Abb. 18). Falls es beim Einschalten zu einem Pfeifton und der Anzeige „Please restart“ in der LCD-Anzeige kommt, ist der Klimaschrank noch einmal aus- und neu anzuschalten.

Abbildung 16: Schalter zum Ein- und Ausschalten

4.2 Sollwerte für Temperatur und Luftfeuchtigkeit eingeben

Die Eingabe der Soll-Werte erfolgt über das Eingabemodul in der linken oberen Ecke des Klimaschranks (Abb. 18). Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit wählt man über die vierte Taste „HAND W“ (von links nach rechts) aus. Mit den Pfeiltasten erfolgt die Eingabe der gewünschten Werte und mittels der Taste „Enter“ wird dieser Wert bestätigt. Über die Taste „Exit“ gelangt man wieder zurück in das Hauptmenü.

Für die Bestimmung von Gefrierpunkten sind Temperaturen von **-2,5 bis -10,0°C** und eine relative Luftfeuchtigkeit von **65,0%** einzustellen.

4.3 Warten, bis die Proben frieren

Der Versuch sollte am besten einen Tag vor der Versuchsdurchführung aufgebaut werden und der Klimaschrank über Nacht laufen, damit die Proben sicher am nächsten Tag durchgefroren sind. Denn es kann über 3 Stunden dauern, bis die Probekörper komplett gefroren sind.

4.4 Metalldosen öffnen

Ehe mit dem Versuch begonnen werden kann, muss der Klimaschrank geöffnet werden und die Deckel der Metalldosen müssen entfernt werden. Da die Dosen über Nacht gefroren wurden und kalt sind, ist es hilfreich, Arbeitshandschuhe dabei zu tragen.

4.5 Erneut frieren

Da es während des Öffnens durch die Körperwärme zu einem Tauvorgang kommt, müssen die geöffneten Dosen nun noch einmal für weitere 2-3 Stunden gefroren werden. Erst nach dem erneuten vollständigen Frieren kann mit dem Versuch begonnen werden.

4.6 Einzelbestimmung

- **Elektronische Waage einschalten und auf „Tara“ setzen**

- **Metalldose mit Eisplatte wiegen**

  Den entsprechenden Wert im Handzettel (Anhang) unter „Gewicht Wasser inkl. Schale“ eintragen.

- **Sole aufbringen und Startzeit aufschreiben**

  Der Inhalt einer Einwegspritze wird gleichmäßig auf die Vertiefung in der Eisfläche aufgebracht. Die Uhrzeit (Wirkungsbeginn), zu der das Salz aufgebracht wurde, ist auf dem Display des Klimaschranks oder auf einer Uhr abzulesen und auf dem Handzettel unter „Uhrzeit Beginn“ (Anhang) zu notieren. Die „Uhrzeit Ende-SOLL“ auch gleich errechnen und eintragen, damit sie nicht verpasst wird.

- **Metalldose inkl. Sole wiegen**

  Der gesamte Probekörper ist nun zu wiegen und der Wert im Handzettel „Gewicht Wasser inkl. Schale + Salz“ (Anhang) einzutragen.

- **Vorgang für alle Probekörper wiederholen und in der Zwischenzeit darauf achten, dass die SOLL-Endzeiten nicht überschritten werden**

- **Soll-Endzeit erreicht**

  Sobald auf der Uhr oder auf dem Display des Klimaschranks die vorher ermittelte Soll-Endzeit angezeigt wird, wird das getaute Sole-Eis-Gemisch von den Probekörpern in das Metallgefäß ausgeleert, die Waage auf „Tara“ gesetzt und der Probekörper erneut gewogen. Der neue Wert wird auf dem Handzettel „Gewicht nach Tauwirkung inkl. Schale“ (Anhang) notiert.

4.7 Doppelbestimmung

Abbildung 17: Anordnung zur Doppelbestimmung

- **Paralleler Start des zweiten Versuchs**

Sobald Metalldose Nr. 5 des ersten Versuchs abgegossen wurde, kann der zweite Versuch gestartet werden, da nun genügend Zeit zum Start des zweiten Versuchs zwischen den Endzeiten des ersten Versuchs ist. Hierbei gelten dieselben Arbeitsschritte. Am besten werden die Metalldosen des ersten Versuchs links im Klimaschrank positioniert und die des zweiten Versuchs rechts. So können die Dosen nicht vertauscht werden.

5 AUSWERTUNG UND DARSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Nachdem der Handzettel vollständig ausgefüllt ist, kann aus der Differenz der Gewichte der Eisplatte inkl. Glasschale vor und nach der Wirkung des Tausalzes die aufgetaute Sole berechnet werden. Da die aufgebrachte Taumittelmenge auch bekannt ist, kann die abgegossene Sole pro Gramm Taustoff bestimmt und kann für alle Einwirkzeiten bestimmt werden (Handzettel siehe Anhang).

Zur Auswertung der Ergebnisse werden die Tauwirksamkeit und die Taurate ermittelt und für je eine kurze, mittlere und lange Einwirkzeit zum Vergleich der einzelnen Werte dargestellt.

Tauwirksamkeit: Die TW ist definiert durch die Arbeit pro Zeiteinheit und kann durch die folgende Formel ausgedrückt werden:

$$TL = \frac{W}{t}$$

W – Arbeit [J]

t – Zeiteinheit [min]

Taurate: Die TR ist definiert als die nach der Zeit abgeleitete Tauwirksamkeit und wird durch folgende Formel ausgedrückt:

$$TR = \frac{d\,TW}{dt}$$

dTW – Tauwirksamkeit
dt – Ableitung nach der Zeit

Eine Regressionsanalyse zeigt, dass zwischen der Einwirkzeit der Taumittel und ihrer Tauwirksamkeit ein annähernd ein Zusammenhang besteht, der mit einem Polynom 2. Ordnung dargestellt werden kann. Das Gütemaß R^2 zeigt, dass die Streuung zu R^2 [in %] durch die Polynomen-Gleichung erklärt werden kann.

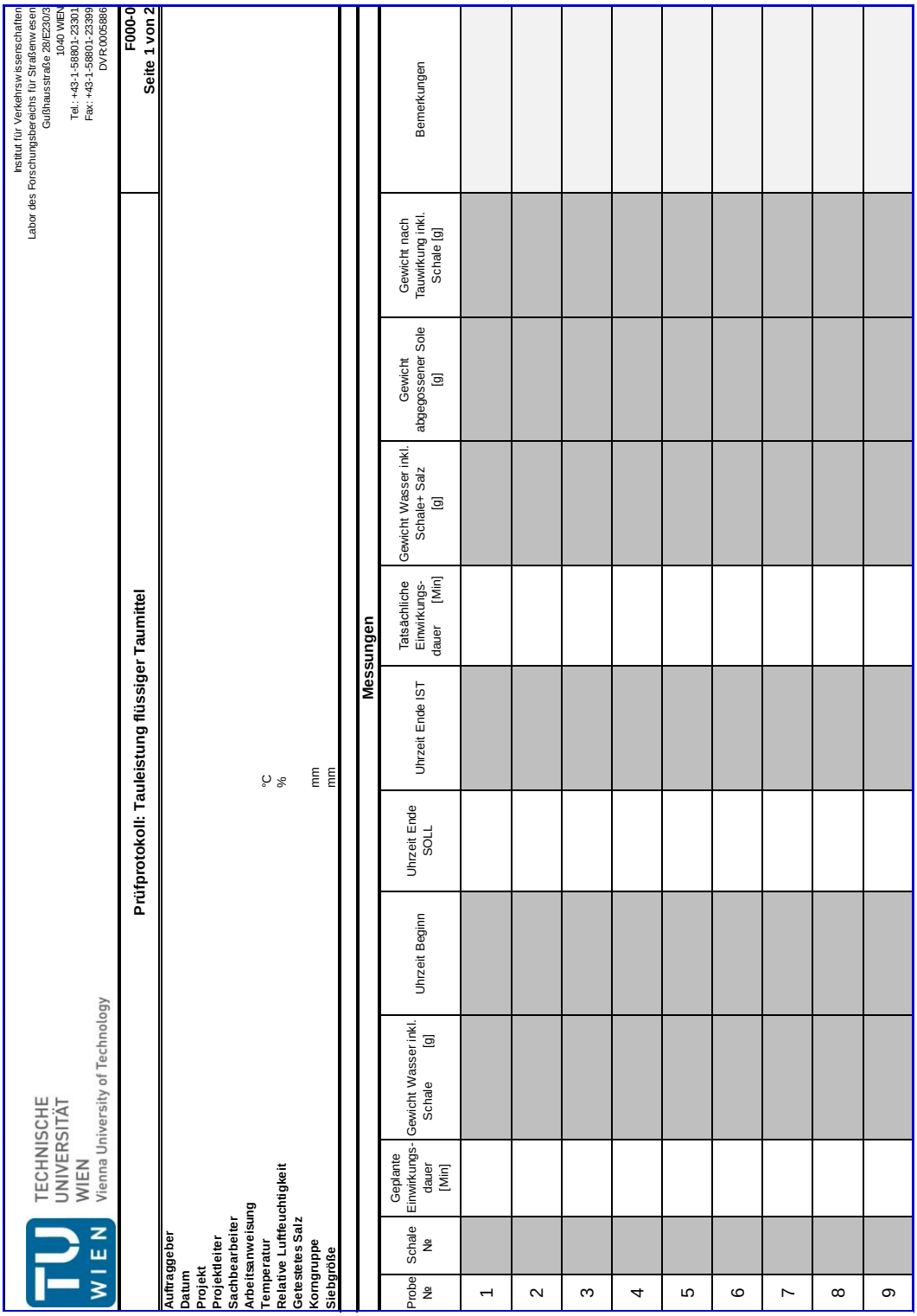
ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Der Klimaschrank (links) und sein Display (rechts) 2
Abbildung 2: Gefäße und Hilfsmittel (bei geöffnetem Klimaschrank) 3
Abbildung 3: Skizze einer Metalldose 4
Abbildung 4: Hilfsmittel zur Versuchsvorbereitung 6
Abbildung 5: Waage tarieren 7
Abbildung 6: Leitungswasser einwiegen 7
Abbildung 7: entsprechende Salzmenge einwiegen 8
Abbildung 8: Salzmenge abwiegen (links) und Wasser hinzugeben (rechts) 9
Abbildung 9: Mischen mit dem Magnetrührer 9
Abbildung 10: Einwegspritzen aufziehen 10
Abbildung 11: Positionierung der Einwegspritzen 10
Abbildung 12: Metalldosen mit Leitungswasser befüllen 11
Abbildung 13: geschlossene Metalldose 11
Abbildung 14: Wasser auffüllen 11
Abbildung 15: Positionierung der Metalldosen 12
Abbildung 16: Schalter zum Ein- und Ausschalten 13
Abbildung 17: Anordnung zur Doppelbestimmung 15

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Materialliste 3

ANHANG



Institut für Verkehrswissenschaften
Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen
Gußhausstraße 28/E230/3
1040 WIEN
Tel.: +43-1-58801-23301
Fax: +43-1-58801-23399
DVR:0005886

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

F000-0
Seite 1 von 2

Prüfprotokoll: Tauleistung flüssiger Taumittel

Auftraggeber
Datum
Projekt
Projektleiter
Sachbearbeiter
Arbeitsanweisung
Temperatur °C
Relative Luftfeuchtigkeit %
Getestetes Salz
Korngruppe mm
Siebgröße mm

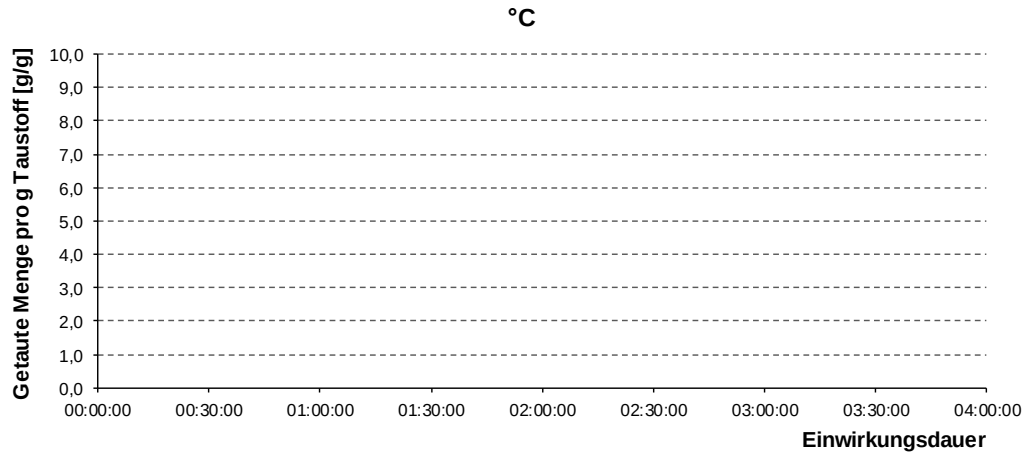
Messungen

Probe №	Schale №	Geplante Einwirkungs-dauer [Min]	Gewicht Wasser inkl. Schale [g]	Uhrzeit Beginn	Uhrzeit Ende SOLL	Uhrzeit Ende IST	Tatsächliche Einwirkungs-dauer [Min]	Gewicht Wasser inkl. Schale+ Salz [g]	Gewicht abgegossener Sole [g]	Gewicht nach Tauwirkung inkl. Schale [g]	Bemerkungen
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Institut für Verkehrswissenschaften
Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen
Gußhausstraße 28/E230/3
1040 WIEN
Tel.: +43-1-58801-23301
Fax: +43-1-58801-23399
DVR:0005886

Prüfprotokoll: Tauleistung flüssiger Taumittel | **F000-0** **Seite 2 von 2**



Messungen

Probe №	Einwirkungsdauer	Aufgebrachte Salzmenge [g]	Gewicht abgegossener Sole [g]	Getaute Sole berechnet [g]	Messabweichung bezogen auf der gesamten Masse [%]	Abgetaute Menge pro g Taustoff [g_{Sole}/g_{TS}]	Bemerkungen
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							