

Diplomarbeit

Eignungsprüfungen von auftauenden Streumitteln im Straßenwinterdienst

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Performance testing of deicing agents for winter road maintenance

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

von

Bledi Kryeziu

Matr.Nr.: 1622529

Betreuung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. **Bernhard Hofko**
Dipl.-Ing. Dr.techn. **Michael R. Gruber**
Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/E230-3, 1040 Wien, Österreich

Anmerkung

Ich bestätige, dass zur Verbesserung dieser Arbeit mit dem Titel "Eignungsprüfungen von auftauenden Streumitteln im Straßenwinterdienst" das von OpenAI entwickelte Sprachmodell ChatGPT, ein Werkzeug für künstliche Intelligenz, verwendet wurde. ChatGPT unterstützte mich bei der Formulierung von Sätzen, lieferte nützliche Vorschläge und korrigierte das Manuskript. Obwohl ChatGPT sich als nützliches Werkzeug zur Unterstützung meiner Arbeit erwiesen hat, bin ich mir darüber im Klaren, dass die generierten Beiträge algorithmisch erstellt wurden und die Arbeit von menschlichen Forschern oder Experten nicht ersetzen können. Darüber hinaus übernehme ich die volle Verantwortung für den endgültigen Inhalt und die Analyse meiner Arbeit. Ich erkläre, dass alle Abschnitte meiner Diplomarbeit, einschließlich der Teile, die aus der Interaktion mit ChatGPT resultieren, den akademischen Standards in Bezug auf Integrität, Zitierung und Originalität entsprechen, die von der TU Wien gefordert werden.

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurden umfassende Versuche durchgeführt, um die Effizienz und Effektivität von Taumitteln für den Winterdienst eingehend zu analysieren. Dabei wurden zahlreiche Schlüsselaspekte berücksichtigt, die für die praktische Anwendung der Taumittel von entscheidender Bedeutung sind.

Zur Wahrung der Anonymität der Hersteller wurden die getesteten Taumittel mit den Bezeichnungen A, B, C, D und E gekennzeichnet.

Zu den durchgeführten Analysen gehörten die Ermittlung der Tauleistung, die die Fähigkeit eines Taumittels beschreibt, Eis effektiv zu schmelzen, sowie die Bestimmung des Gefrierpunkts, der aufzeigt, bei welchen Temperaturen das jeweilige Taumittel optimal eingesetzt werden kann. Darüber hinaus wurde der Feuchtigkeitsgehalt der Taumittel gemessen, um eine fundierte Einschätzung ihrer Lagerfähigkeit im Lieferzustand vornehmen zu können.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Untersuchung war die Analyse der Lagerfeuchtigkeit, bei der untersucht wurde, wie sich die Taumittel unter realistischen Lagerbedingungen verhalten. Dies ist besonders relevant, um sicherzustellen, dass die Taumittel ihre gewünschten Eigenschaften über einen längeren Zeitraum beibehalten.

Die Untersuchung der Korngrößenverteilung spielte ebenfalls eine zentrale Rolle, da sie wertvolle Einblicke in die physikalischen Eigenschaften und die Handhabung der Taumittel vermittelt. Zudem wurde die Rieselfähigkeit getestet, um zu analysieren, inwiefern unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalte die Lagerfähigkeit der Taumittel beeinflussen um die Gleichmäßigkeit der Ausbringung zu beurteilen.

Abschließend wurde auch die Korrosivität der Taumittel analysiert, um mögliche Auswirkungen auf die Infrastruktur und Fahrzeuge zu bewerten und Risiken zu minimieren. Diese umfangreichen Tests ermöglichen eine fundierte und differenzierte Bewertung der Taumittel sowie ihrer potenziellen Anwendungen in der Praxis.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den durchgeführten Versuchen wurden die verschiedenen Taumittel sorgfältig miteinander verglichen und umfassend ausgewertet.

Summary

In this study, comprehensive experiments were conducted to thoroughly analyze the efficiency and effectiveness of the deicing agents used in winter maintenance. Numerous key aspects that are crucial for the practical application of the deicing agents were taken into consideration.

To ensure an anonymous comparison of the deicing agents, the materials tested were labeled A, B, C, D and E.

The analyses performed included the determination of the deicing performance, which describes the ability of a deicing agent to effectively melt ice, as well as the determination of the freezing point, which indicates the optimal temperatures at which each deicing agent can be applied. Additionally, the moisture content of the deicing agents was measured in order to be able to make a well-founded assessment of their storage capabilities in the delivered state.

Another important part of the study was the analysis of the storage moisture content, which examined how the deicing agents behave under realistic storage conditions. This is particularly relevant to ensure that the deicing agents retain their desired properties over a longer period of time.

The examination of the grading curve also played a central role, as it provides valuable insights into the physical properties and handling of the deicing agents. Furthermore, the flowability was tested to analyze the extent to which different moisture contents influence the storability of the deicing agents in order to assess the uniformity of application.

Finally, the corrosiveness of the deicing agents was also analyzed in order to evaluate possible effects on the infrastructure and vehicles and to minimize risks. These extensive tests facilitate a well-founded and nuanced evaluation of the deicing agents and their potential applications in practice.

Taking into account the results from the experiments conducted, the various deicing agents were thoroughly compared with each other and comprehensively evaluated.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Arten der Streumittel	7
1.1.1	Auftauende Streumittel	7
1.1.2	Abstumpfende Streumittel	9
1.2	Wirkungsweise der auftauende Streumittel	10
2	Prüfmethodik	12
2.1	Prüfprogramm	14
3	Tauleistung	15
3.1	Bisheriger Versuchsmethode	15
3.2	Neue Versuchsmethode	16
3.3	Vorgangswise Methodenverbesserung	21
3.4	Ergebnisse	28
4	Einsatztemperatur (Gefrierpunkt)	34
4.1	Versuchsmethode	34
4.2	Ergebnisse	37
5	Lagerfähigkeit und Streuung	42
5.1	Feuchtigkeitsgehalt	43
5.1.1	Versuchsmethode	43
5.1.2	Ergebnisse	44
5.2	Lagerfeuchtigkeit	47
5.2.1	Versuchsmethode	47
5.2.2	Ergebnisse	48
5.3	Korngrößenverteilung/Sieblinie	52
5.3.1	Versuchsmethode	52
5.3.2	Ergebnisse	54
5.4	Rieselfähigkeit	57
5.4.1	Versuchsmethode	57
5.4.2	Ergebnisse	60
6	Korrosion	62
6.1	Versuchsmethode	63
6.2	Ergebnisse	70
7	Zusammenfassung und Empfehlungen	74
	Literaturverzeichnis:	77
	Abbildungsverzeichnis:	78
	Tabellenverzeichnis:	80

1 Einleitung

Der Begriff Straßenwinterdienst bezieht sich auf alle Aufwendungen und Maßnahmen, die erforderlich sind, um die Befahrbarkeit von Straßen auch unter winterlichen Bedingungen zu gewährleisten. Dazu zählen alle Maßnahmen, die während der kalten Jahreszeit oder bereits im Vorfeld getroffen werden müssen, um sicherzustellen, dass die Straßen frei von Hindernissen und sicher befahrbar sind.

Zu den wichtigsten Maßnahmen im Winterdienst zählen eine Vielzahl von Aktivitäten, die darauf abzielen, die Sicherheit und Befahrbarkeit von Straßen und Gehwegen während der winterlichen Bedingungen zu gewährleisten. Dazu gehört unter anderem das gründliche Räumen von Schnee, um sicherzustellen, dass die Verkehrswege für Fahrzeuge und Fußgänger frei und sicher sind. Ebenso wichtig ist das gezielte Ausbringen von Streumitteln, um die Bildung von Glätte zu verhindern und die Griffigkeit auf rutschigen Oberflächen zu erhöhen. Darüber hinaus umfasst der Winterdienst auch die regelmäßige Reinigung der Verkehrsanlagen, um sicherzustellen, dass diese in einem optimalen Zustand bleiben und potenzielle Gefahren durch Eis oder Schnee vermieden werden. Diese Maßnahmen tragen nicht nur zur Verbesserung der Verkehrssicherheit bei, sondern auch zur Aufrechterhaltung der allgemeinen Mobilität in der kalten Jahreszeit.

In dieser Arbeit wurden verschiedene Eignungsprüfungen an auftauenden Taumitteln durchgeführt. Zur Wahrung der Anonymität der Hersteller wurden die Taumittel mit den Buchstaben A, B, C, D und E entsprechend benannt. Die durchgeführten Prüfungen umfassten die Bestimmung der Tauleistung, des Gefrierpunkts, der Feuchtigkeit, der Korngrößenverteilung, der Rieselfähigkeit und der Korrosivität der Taumittel, um ein umfassendes Bild ihrer physikalischen Eigenschaften und potenziellen Einsatzmöglichkeiten zu erhalten.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Untersuchung war die Analyse der Lagerfeuchtigkeit, bei der untersucht wurde, wie sich die Taumittel unter realistischen Lagerbedingungen verhalten. Dies ist besonders relevant, um sicherzustellen, dass die Taumittel ihre gewünschten Eigenschaften über einen längeren Zeitraum beibehalten. Diese systematische Herangehensweise ermöglicht es, die Taumittel auf einer soliden Datenbasis miteinander zu vergleichen und fundierte Entscheidungen für deren zukünftige Anwendung zu treffen. Diese Aspekte sind entscheidend, um die Effektivität der Taumittel beim Auftauen von Eis und Schnee zu bewerten und deren Leistungsfähigkeit unter unterschiedlichen Bedingungen zu analysieren.

Eine der wesentlichen Aufgaben des Winterdienstes besteht darin, die Griffigkeit auf rutschigen Oberflächen zu erhöhen, um die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten. Die Griffigkeit ist ein Maß für den Reibungswiderstand sowie der Kraftübertragung, die zwischen den Reifen eines Fahrzeugs und der Fahrbahn stattfindet. Die Griffigkeit von Straßen bezieht sich auf die Fähigkeit der Fahrbahn, den Reifen von Fahrzeugen ausreichend Halt zu bieten, und ist besonders wichtig für die Stabilität und Kontrolle von Fahrzeugen. Diese Fähigkeit wird insbesondere unter schwierigen Witterungsbedingungen wie Regen, Schnee oder Eis auf die Probe gestellt, in denen die Gefahr von Rutschen und Schleudern erheblich steigt.

Eine hohe Griffigkeit verbessert nicht nur die Kontrolle über das Fahrzeug, sondern trägt auch zur Verringerung von Unfällen und gefährlichen Situationen im Straßenverkehr bei. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, Maßnahmen zu ergreifen, um die Griffigkeit aufrechtzuerhalten und zu optimieren, insbesondere in der kalten Jahreszeit.

Die Griffigkeit wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Dazu gehören die Art der Straßenoberfläche (etwa Asphalt, Beton oder spezielle rutschfeste Materialien) und der Zustand der Fahrbahn, einschließlich der Präsenz von Schnee oder Eis (siehe Abbildung 1), Rissen oder anderen Beschädigungen. Auch die aktuellen Witterungsbedingungen haben einen großen Einfluss; beispielsweise kann Nässe die Griffigkeit beeinträchtigen, während trockene Bedingungen im Allgemeinen zu besseren Haftungseigenschaften führen.

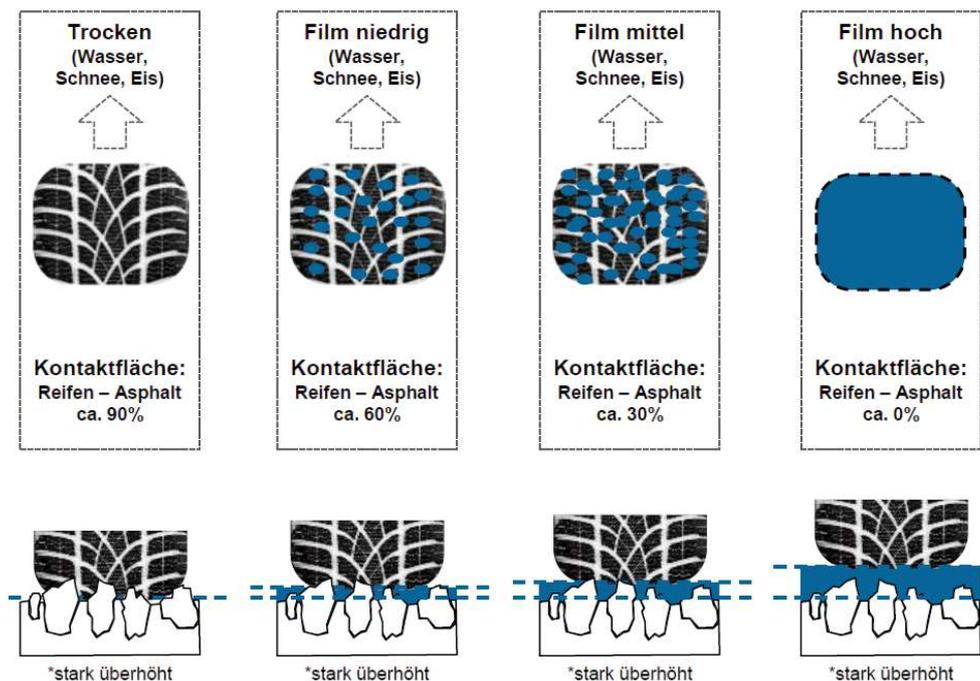


Abbildung 1. Einfluss der winterlichen Bedingungen auf die Griffigkeit [1]

Ein tiefes Verständnis dieser Faktoren ist entscheidend für die Planung und Durchführung effektiver Winterdienstmaßnahmen. Durch gezielte Einsätze, wie das Räumen von Schnee, das Ausbringen von Streumitteln und die regelmäßige Wartung der Fahrbahnen, kann der Winterdienst dazu beitragen, gefährliche Situationen zu minimieren, die Mobilität im Straßenverkehr zu sichern und letztlich das Wohlbefinden aller Verkehrsteilnehmer zu fördern. In diesem Zusammenhang ist die kontinuierliche Überwachung der Straßenbedingungen ebenfalls von großer Bedeutung, um rechtzeitig auf Veränderungen reagieren zu können.

Daher ist es von größter Bedeutung, unter den unterschiedlichsten winterlichen Bedingungen das passende Streumittel auszuwählen, um die Griffigkeit auf Eis oder Schnee effektiv aufrechtzuerhalten. Ein ungünstiges oder unangemessenes Taumittel kann nicht nur die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer gefährden, sondern auch die Effektivität der Winterdienstmaßnahmen er-

heblich beeinträchtigen. Die Auswahl des geeigneten Streumittels hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die spezifischen Wetterverhältnisse, die Art der Straßenoberfläche und die jeweiligen Anforderungen an die Verkehrssicherheit.

Diese Arbeit widmet sich genau diesem Thema und hat das Ziel, das jeweils optimal geeignete Taumittel zu bestimmen, um die Griffigkeit in verschiedenen winterlichen Szenarien zu maximieren. Durch umfassende Tests und Analysen sollen die Eigenschaften und Leistungen der verschiedenen Taumittel untersucht werden, um fundierte Empfehlungen für ihren Einsatz im Winterdienst zu geben. Solche Erkenntnisse sind entscheidend, um nicht nur die Sicherheit auf den Straßen zu erhöhen, sondern auch um die Effizienz und Wirksamkeit des Winterdienstes insgesamt zu verbessern.

Angesichts einer Straßennetzlänge von über 128.000 km in Österreich [2] und einer jährlichen Salzstreuung von über 200.000 Tonnen während der Wintermonate ist es von großer Bedeutung, die geeigneten Taumittel sorgfältig auszuwählen und sie unter den richtigen Bedingungen anzuwenden. Eine präzise Anpassung der Streumittel an die jeweiligen Witterungsverhältnisse sorgt nicht nur für die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer, sondern trägt auch dazu bei, die ökologischen Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren. Die richtige Anwendung von Taumitteln kann somit einen entscheidenden Beitrag zur Verkehrssicherheit und zum Umweltschutz leisten.

Im Vergleich zu Österreich, hat Deutschland eine Straßennetzlänge von ungefähr 830.000 km [3]. Während der Wintermonate streut Deutschland zwischen 1,5 und 2 Millionen Tonnen Salz [4], um die Straßen von Schnee und Eis zu befreien und die Verkehrssicherheit zu gewährleisten. Diese bedeutende Menge an Streusalz ist entscheidend für die Aufrechterhaltung der Mobilität in einem Land mit einem so großen Straßennetz und unterschiedlichen klimatischen Bedingungen. Der Vergleich der beiden Länder zeigt die unterschiedlichen Herausforderungen und Strategien im Winterdienst, wobei Deutschland aufgrund seiner größeren Infrastruktur mit einem erheblich höheren Bedarf an Streumitteln konfrontiert ist.

Die Schweiz besitzt ein umfangreiches Straßennetz von über 88.000 km [3] und verwendet in den Wintermonaten zwischen 300.000 und 350.000 Tonnen Salz [5], um die Straßenverhältnisse zu optimieren. Angesichts der alpinen Geografie und der damit verbundenen winterlichen Wetterbedingungen ist der Einsatz einer solch hohen Menge an Streusalz von besonderer Bedeutung. Dieser Einsatz trägt nicht nur zur Sicherheit der Verkehrsteilnehmer bei, indem er das Risiko von Unfällen aufgrund von Glätte und Schnee verringert, sondern auch zur Sicherstellung der Mobilität in einem Land, das für seine herausragende Verkehrsinfrastruktur bekannt ist. Die gezielte Anwendung von Taumitteln in der Schweiz verdeutlicht die Notwendigkeit, eine effektive Winterdienststrategie zu verfolgen, um den Herausforderungen von Schnee und Eis bestmöglich zu begegnen.

Bevor auf die verschiedenen Arten von Streumitteln und deren Ausbringung eingegangen wird, soll zuerst auf die rechtlichen Grundlagen des Straßenwinterdienstes und wichtige Umweltauswirkungen von Streumitteln eingegangen werden.

Die rechtlichen Grundlagen für den Winterdienst in Österreich beinhalten unter anderem auf den folgenden Vorschriften:

- Wegehalterhaftung im § 1319a ABGB regelt und thematisiert die Verantwortung von Straßen- und Wegehaltern für Schäden, die durch Mängel an öffentlichen Verkehrsflächen entstehen. Nach dieser Bestimmung haftet der Wegehalter, wenn eine Person aufgrund eines Fehlers oder eines unzureichenden Zustands des Weges zu Schaden kommt. Diese Haftung tritt jedoch nur dann ein, wenn der Wegehalter nicht nachweisen kann, dass ihn kein Verschulden oder eine derartige Pflichtverletzung trifft. Ziel dieser Regelung ist es, die Sicherheit der Nutzer öffentlicher Verkehrsflächen zu gewährleisten und die Betreiber dazu anzutreiben, ihre Infrastruktur angemessen zu warten und instand zu halten, um die Risiken für die Verkehrsteilnehmer zu minimieren.
- Straßenverkehrsordnung (StVO): Diese regelt die allgemeinen Verkehrsbedingungen und beinhaltet Bestimmungen zur Benutzung von Straßen während winterlicher Verhältnisse. Die StVO verpflichtet die Straßenverkehrsbehörden, Maßnahmen zur Gewährleistung der Verkehrssicherheit zu ergreifen. Dazu gehört die Räumung von Schnee und das Streuen von Eis auf Fahrbahnen und Gehwegen. Diese Maßnahmen sind notwendig, um Gefahren für alle Verkehrsteilnehmer zu minimieren. Anlieger sind gemäß den örtlichen Verordnungen verpflichtet, die Gehsteige vor ihren Grundstücken von Schnee und Eis zu räumen. Die Nichteinhaltung dieser Pflicht kann mit Bußgeldern geahndet werden. Die StVO schreibt vor, dass geeignete Maßnahmen, wie Streuen mit Salz oder Sand, getroffen werden müssen, um die Rutschgefahr zu vermindern. In extremen Wetterlagen können zusätzlich Verkehrsbeschränkungen eingeführt werden.
- Richtlinien für die Verkehrsauffassung (RVS): Diese Richtlinien definieren Standards und Vorgaben für die Gestaltung, den Bau und die Instandhaltung von Straßen. Im Kontext des Winterdienstes beinhalten sie Empfehlungen zur Schneeräumung und zum Streuen von Gehwegen, Straßen und anderen Verkehrsflächen. Beispiel: RVS:12.04.11 Winterdienst Allgemeines, RVS12.04.12 Schneeräumung und Streuung, RVS 12.04.15 Minimierung Umweltauswirkung, RVS 12.04.16 Streumittel etc..
- Bundesstraßengesetz und Straßenverkehrsgesetze der jeweiligen Bundesländer: Diese Gesetze bieten einen weiteren rechtlichen Rahmen für die Durchführung von Winterdienstmaßnahmen auf Bundes- und Landesstraßen. Die Straßenbehörden sind dafür verantwortlich, für die Verkehrssicherheit auf Bundesstraßen zu sorgen, was die Räumung und das Streuen von Schnee und Eis bei winterlichen Bedingungen einschließt. Die Behörde muss angemessene Maßnahmen ergreifen, um die Straßenverhältnisse zu sichern, einschließlich der Durchführung von Winterdienstmaßnahmen. Die Kombination des Bundesstraßengesetzes und der straßenrechtlichen Vorschriften ermöglicht eine klare Struktur für den Winterdienst. Während das Bundesstraßengesetz die allgemeinen Pflichten auf Bundesstraßen regelt, bieten die städtischen Gesetze spezifische Anforderungen und Abläufe für den Winterdienst auf innerstädtischen Straßen.
- Kommunalrecht: Auf kommunaler Ebene können spezifische Verordnungen und Vorschriften erlassen werden, die den Winterdienst regeln, einschließlich der Zuständigkeiten von Straßenverwaltungen und der Pflichten von Anliegern. Die Stadt ist für die Räumung und Streuung von Hauptverkehrsstraßen sowie öffentlichen Plätzen verantwortlich. Dies umfasst die regelmäßige Kontrolle und die Durchführung von Räummaßnahmen, um die Sicherheit für den Verkehr zu gewährleisten.

Anlieger, also Eigentümer von Grundstücken oder Mietern, haben die Pflicht, die Gehsteige vor ihren Immobilien von Schnee und Eis zu räumen. Diese Verpflichtung wird in den kommunalen Verordnungen konkretisiert.

Es ist wichtig für die Verantwortlichen im Winterdienst, sich regelmäßig über Änderungen in den rechtlichen Grundlagen zu informieren und sicherzustellen, dass die Maßnahmen im Einklang mit den vorgeschriebenen Standards stehen.

Der Winterdienst spielt eine entscheidende Rolle bei der Gewährleistung der Verkehrssicherheit während der kalten Jahreszeit. Dennoch ist der Einsatz von Streumitteln, insbesondere von Salz, mit einer Vielzahl von Herausforderungen verbunden, die sowohl die Umwelt als auch die Infrastruktur erheblich beeinträchtigen können. Diese Probleme erfordern eine sorgfältige Abwägung zwischen der Gewährleistung der Verkehrssicherheit und dem Schutz der natürlichen Ressourcen, der Umwelt, sowie der Bauwerke.

Die Anwendung von Streusalz zur Bekämpfung von Eis und Schnee führt dazu, dass Salzurückstände auf Straßen und anderen Oberflächen zurückbleiben. Diese Rückstände können korrosive Eigenschaften aufweisen, die die Oberflächen von Straßen und Gehwegen angreifen und somit zu einer schnelleren Abnutzung sowie Rissen im Asphalt führen. Dies hat nicht nur einem vorzeitigen Reparaturbedarf zur Folge, sondern kann auch die Verkehrssicherheit erheblich beeinträchtigen.

Zusätzlich kann Salz negative Auswirkungen auf die strukturelle Integrität von Brücken und anderen metallischen Konstruktionen haben. Die Korrosion, die durch den Kontakt mit Salz verursacht wird, kann die Lebensdauer dieser Bauwerke erheblich verkürzen und damit kostspielige Reparaturen nach sich ziehen. Auch Fahrzeuge, die auf salzbehandelten Straßen fahren, sind betroffen. Das Salz erhöht das Risiko von Rost und Korrosion an der Karosserie und dem Unterboden, was in der Folge zu höheren Wartungskosten führen kann. Somit ist es wichtig, balancierte Strategien im Winterdienst zu entwickeln, die sowohl die Verkehrssicherheit gewährleisten als auch den langfristigen Schutz der Infrastruktur und Fahrzeuge berücksichtigen.

Eine weitere bedeutende Auswirkung des Winterdienstes ist die Salzeintragung in den Boden. Die regelmäßige Anwendung von Streusalz kann zu einer beträchtlichen Anreicherung von Salzen im Boden führen. Diese Bodenversalzung hat weitreichende negative Folgen für die Pflanzenwelt und kann die Bodenqualität erheblich beeinträchtigen, was insbesondere in städtischen Gebieten von großer Bedeutung ist. Hohe Salzkonzentrationen im Boden können das Wachstum von Pflanzen hemmen und die Artenvielfalt verringern. Besonders empfindliche Pflanzenarten sind dabei gefährdet, da sie absterben oder erheblich in ihrem Wachstum beeinträchtigt werden können.

Über längere Zeiträume kann das Salzwasser in den Boden einsickern und das Grundwasser kontaminieren. Diese Verunreinigung hat nicht nur negative Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung, sondern kann auch die gesamte Wasserqualität in den betroffenen Gebieten erheblich beeinträchtigen. Daher ist es entscheidend, die Auswirkungen der Salzanwendung im

Winterdienst zu berücksichtigen und alternative Methoden zu erforschen, die sowohl die Verkehrssicherheit gewährleisten als auch die Umwelt und die natürlichen Ressourcen schützen.

Die Anwendung von Taumitteln kann die Luftqualität erheblich beeinträchtigen. Feinstaub und andere Partikel, die durch den Einsatz von Streumitteln entstehen, können gesundheitliche Probleme hervorrufen, insbesondere bei Menschen mit Atemwegserkrankungen, die besonders anfällig für die negativen Auswirkungen von Schadstoffen sind.

Darüber hinaus können Haustiere und Wildtiere, die mit salzbelasteten Oberflächen in Berührung kommen, ebenfalls gesundheitliche Beeinträchtigungen erleiden. Die Pfoten dieser Tiere sind dem Streumittel ausgesetzt, zudem nehmen die Tiere das Salz beim Lecken ihrer Pfoten oder Felle auf, was unter Umständen zu gesundheitlichen Problemen führen kann.

Zusätzlich kann der Kontakt mit Taumitteln bei Menschen Haut- und Augenreizungen verursachen, insbesondere bei empfindlichen oder anfälligen Personen. Diese gesundheitlichen Risikofaktoren sollten bei der Anwendung von Taumitteln berücksichtigt werden, um die Auswirkungen auf Menschen und Tiere zu minimieren.

Im Folgenden wird auf die Ausbringung der Streumittel eingegangen und die verschiedenen Arten von Streumitteln erläutert.

1.1 Arten der Streumittel

Grundsätzlich lassen sich Streumittel in zwei Kategorien einteilen:

- Auftauende Streumittel
- Abstumpfende Streumittel

In speziellen Fällen kommen auch Mischungen von auftauenden und abstumpfenden Streumitteln zum Einsatz (Beispiel NaCl mit Splitt). Beide Streumittelarten dienen dazu, sowohl bereits bestehende Straßenglätte zu Verbesserung der Griffbarkeit als auch der Entstehung von rutschigen Straßenverhältnissen im Winter vorzubeugen. Die werden eingesetzt, um die Sicherheit auf den Straßen zu gewährleisten und den Verkehr reibungslos zu gestalten. Es ist wichtig, dass Streumittel sparsam und gemäß den Anweisungen zu verwenden, da es sowohl die Umwelt als auch, Straßen und Fahrzeuge beschädigen kann. Wenn man vom Zeitpunkt der Streuung ausgeht, existieren zwei verschiedene Streuarten: präventives Streuen vor der Schneeräumung und nachträgliches Streuen, aber wenn man vom Einsatzart ausgeht, haben wir auch zwei verschiedene Streuarten: Maschinell und Händisch.

1.1.1 Auftauende Streumittel

Diese Streumittel mit auftauender Wirkung, sei es in fester oder flüssiger Form, kommen zum Einsatz, um effektiv glatte Straßenverhältnisse im Winter zu verhindern oder die Bildung der Straßenglätte signifikant zu reduzieren. Auftauende Streumittel wirken, indem sie den thermodynamischen Gefrierpunkt von Wasser senken, was dazu führt, dass die Bildung von Schnee-

und Eisglätte verhindert wird, wodurch die Straßen sicherer befahrbar gehalten werden. Auftauende Streumittel kommen insbesondere auf stark frequentierten Straßen zu Einsatz.

Auftauende Streumittel werden in 4 Gruppen aufgeteilt [6]:

- Auftausalz
- Mischsalz
- Feuchtsalz
- Sole, Salzlösung

Auftausalz besteht grundsätzlich aus eine Salzart, in der Regel aus Natriumchlorid (NaCl) oder Calciumchlorid (CaCl₂), bzw. kann mit anderen chemischen Verbindungen gemischt, um die Eigenschaften zu optimieren.

Mischsalz besteht aus einer Kombination verschiedener Auftausalze zusammen, deren jeweilige Gewichtsanteile genauestens definiert sind [6].

Feuchtsalz kann entweder aus reinem Auftausalz oder aus einer Mischung von Salzen bestehen und wird vor der Streuung mit Sole befeuchtet.

Sole ist eine Lösung, bei der Salz in Wasser aufgelöst ist, wodurch sich eine Flüssigkeit bildet, die zur Enteisung und Schneeschmelze eingesetzt wird.

Die allgemeinen Anforderungen der auftauenden Streumittel sind [7]:

- **Tauwirksamkeit:** Eine erhöhte Tauwirksamkeit ist erforderlich, um Eis wirkungsvoll zu schmelzen und die Bildung von Straßenglätte effektiv zu verhindern bzw. zu mindern.
- **Einsatztemperatur:** Eine geringe Eisbildungstemperatur ist erforderlich, um den Einsatz in kälteren Orten zu gewährleisten.
- **Lagerfähigkeit/Feuchtigkeitsannahme:** Um stets über ausreichende Mengen verfügen zu können, müssen Streumittel gut lagerfähig sein, d.h. keine oder nur geringe Beeinträchtigungen aufgrund Feuchtigkeit (z.B. Festbacken oder Klumpenbildung) aufweisen.
- **Korngrößenverteilung/Sieblinie/Rieselfähigkeit:** Die Größe der Salzkörnung wirkt auf die Streueigenschaften aus und bestimmt somit maßgeblich die Effektivität der Streuung und des Enteisungsprozesses.
- **Reinheit:** Eine erhöhte Reinheit bedeutet eine bessere Effektivität, da bei Ausbringung einer bestimmten Menge der tauwirksame Anteil größer ist.
- **Umweltverträglichkeit:** Es spielt eine entscheidende Rolle, dass das Streumittel umweltverträglich ist und keine schädlichen Folgen für die Straße, Straßenbenutzer und Umwelt mit sich bringt.
- **Griffigkeitsminderung (Streumittel sollten weder zu einer sofortigen Verringerung der Griffigkeit noch zu einer dauerhaften Beeinträchtigung führen.)**
- **Wirtschaftlicher Einsatz:** Neben anderen, Streumittel soll auch wirtschaftlich sinnvoll sein.

Die Tauwirkung wird durch die Schnee bzw. Eismenge stark beeinflusst, da die Konzentration des Taumittels entsprechend vermindert wird, sowie der Fahrbahntemperatur, die einen entscheidenden Einfluss auf den Schmelzprozess hat. Da die Tauwirkung von auftauenden Streumitteln begrenzt ist, ist eine vorherige Räumung des Schnees jedenfalls zur Beseitigung der Straßenglätte notwendig. Zudem muss die Art und Menge des Taumittels der (prognostizierten) Umgebungs- bzw. Fahrbahntemperatur angepasst werden.

Vorteile der auftauenden Streumittel:

- Effektivität
- Schnelle Wirkung
- Wirtschaftlichkeit
- Einfache Anwendung

Nachteile der auftauenden Streumittel:

- Umweltauswirkung
- Korrosion
- Gesundheitliche Auswirkungen
- Begrenzte Wirkung bei sehr niedrigen Temperaturen

Es ist von großer Bedeutung, die Vor- und Nachteile der Salzstreuung sorgfältig abzuwägen und in diesem Zusammenhang eine verantwortungsvolle sowie nachhaltige Vorgehensweise zu verfolgen. Einerseits kann die Verwendung von Streusalz die Verkehrssicherheit während der Wintermonate erheblich verbessern, indem sie das Risiko von Glätte auf Straßen und Gehwegen minimiert. Andererseits müssen auch die potenziellen negativen Auswirkungen auf die Umwelt, wie die Belastung von Böden und Gewässern sowie die Schädigung von Pflanzen und Tieren, berücksichtigt werden. Um den bestmöglichen Kompromiss zwischen Sicherheit und Umweltschutz zu finden, ist es erforderlich, geeignete Strategien und Alternativen zu entwickeln, die sowohl die Wirksamkeit der Maßnahmen garantieren als auch langfristige Schäden an der Natur vermeiden. Daher sollte die Anwendung von Salzressourcen mit Bedacht erfolgen, um die Vorteile zu maximieren und gleichzeitig die Risiken für die Umwelt und die Gesundheit zu minimieren.

1.1.2 Abstumpfende Streumittel

Diese Streumittel (Streusplitt) dienen dazu, den Verlust der Griffigkeit auf winterlichen Straßenverhältnissen zu verhindern oder zu reduzieren, und tragen somit zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bei. Das abstumpfende Streumittel verbessert die Traktion und trägt dazu bei, die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn zu erhöhen, um das Unfallrisiko auf glatten Straßen zu verringern. Durch ihre mechanische Wirkung verankern sich abstumpfende Streumittel zwischen Reifen und Straßenoberfläche und steigern so die Haftung. Diese Streumittel werden vorrangig auf wenig befahrenen Straßen eingesetzt, weil der Verkehr den Streusplitt schnell aus der Fahrspur befördert. Abstumpfende Streumittel sind im Grunde genommen nichts anderes als natürliche Steine, die in passender Größe gebrochen wurden, um die Anforderungen zu erfüllen. Grundsätzlich werden Streusplitt der Kornklasse 4/8 verwendet.

Die allgemeinen Anforderungen der abstumpfenden Streumittel sind [7]:

- Abriebfestigkeit/LA-Wert (Die Qualität des Streusplitts steigt, je weniger Abrieb vorhanden ist.)
- Lagerfähigkeit/Feuchtigkeit (Um stets über ausreichende Mengen verfügen zu können, müssen Streumittel gut lagerfähig sein.)
- Korngrößenverteilung/Sieblinie/Rieselfähigkeit (Die Größe der Streumittel wirkt auf die Streueigenschaften aus und bestimmt somit maßgeblich die Effektivität der Streuung.)
- Reinheit (Eine erhöhte Reinheit bedeutet eine bessere Effektivität)
- Feinteilgehalt (je weniger Feianteile, desto bessere Griffigkeit wird gewährleistet)
- Kornform/SL-Wert (die Höchstwerte sollen nicht ausgeschritten werden)
- Anteil gebrochen Körner (Regeln und Normen beachten)
- Umweltverträglichkeit (es spielt eine entscheidende Rolle, dass das Streumittel umweltverträglich ist und keine schädlichen Folgen für die Straße, Straßenbenutzer und Umwelt mit sich bringt.)
- Wirtschaftlicher Einsatz (neben anderen, Streumittel soll auch wirtschaftlich sinnvoll sein.)

Vorteile:

- Effektivität/Griffigkeitssteigerung
- Schnelle Wirkung
- Einfache Anwendung
- Wirtschaftlichkeit
- Wiederverwendung/Recycling

Nachteile:

- Abnutzung der Streckenoberfläche
- Griffigkeitsminderung auf trockene Strecken
- Gefahr von Steinschlägen
- Staubentwicklung
- Ablagerung auf unkonventionelle Stellen (Entwässerungen, Streckenfugen/ Dilatationen usw.)
- Regelmäßige Streckenreinigung

Es ist von großer Bedeutung, die Vor- und Nachteile des Einsatzes von Streusplitt sorgfältig abzuwägen, um eine fundierte Entscheidung über dessen Anwendung zu treffen. Zum einen bringt Streusplitt bedeutende Vorteile mit sich, da er nicht nur dazu beiträgt, die Griffigkeit auf rutschigen Oberflächen zu erhöhen und somit die Verkehrssicherheit zu verbessern, sondern auch umweltfreundlicher als auftauende Streumittel ist, da er in der Regel keine langanhaltenden schädlichen Folgen verursacht. Dennoch entstehen Probleme beim Einsatz von Streusplitt. Einerseits wird bei hohem Verkehrsaufkommen der Splitt durch die Fahrzeuge aus der Fahrspur befördert und andererseits entsteht beim Wiedereinkehren des Streusplitts im Frühjahr Feinstaub und kann die Luftqualität lokal stark verschlechtern.

1.2 Wirkungsweise der auftauende Streumittel

Wie auch im Vorhinein gesagt, auftauende Streumittel wirken, indem sie den thermodynamischen Gefrierpunkt von Wasser senken, dadurch schmilzt die Schnee-/Eisdecke auf der Fahrbahn und minimiert bzw. verhindert die Glättebildung (siehe Abbildung 2).

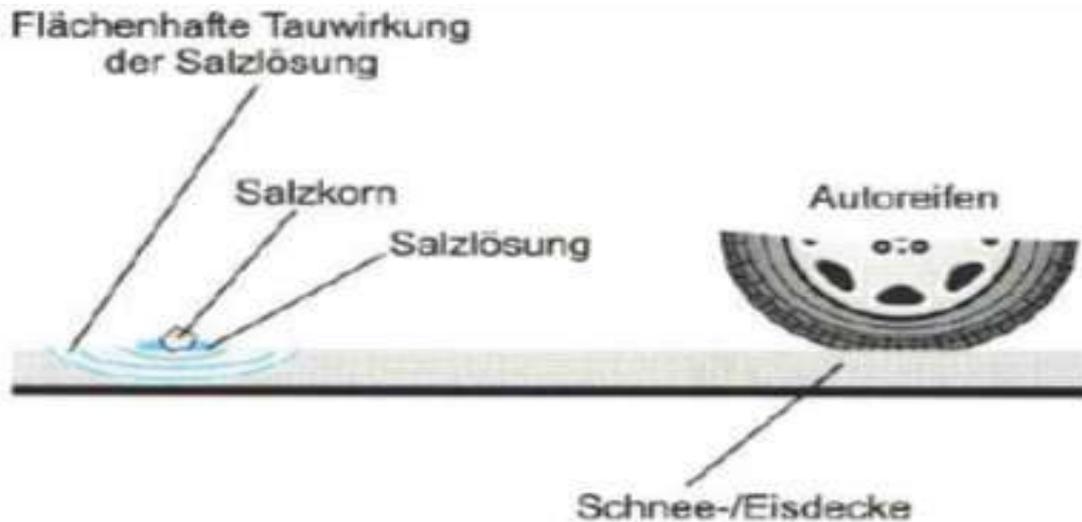


Abbildung 2. Wirkungsweise der auftauende Streumittel [7]

Die Wirksamkeit der Streumittel hängt von verschiedenen Faktoren ab., die sind:

- Taumittel
- Korngrößenverteilung/Sieblinie
- Einsatztemperatur
- Einsatzmenge
- Reinheit
- Intervall der Streuung

Die Unterschiede in den Tauzeiten verschiedener Taumittel spielen eine entscheidende Rolle bei ihrer Wirkung und Effektivität zur Schneeschmelze und Eisbekämpfung. Je kürzer die Tauzeiten sind, desto effektiver ist die Wirkung der Taumittel.

Die Korngrößenverteilung spielt eine große Rolle bei der Wirkung der auftauende Streumittel. Mit feinerem Salz erreicht man eine größere Abdeckung der Fläche, da es sich besser verteilt, während grobes Salz aufgrund seiner Beschaffenheit eine kleinere Fläche abdeckt. Durch die Verwendung von grobem Salz gelangt man schneller zur Fahrbahnoberfläche (unter der Schneedecke), während feines Salz aufgrund seiner Struktur langsamer wirkt und somit die Auflösung des Eises verzögert. Eine bessere Erklärung wie die Wirksamkeit von der Korngrößenverteilung hängt, sieht man im Abbildung 3.

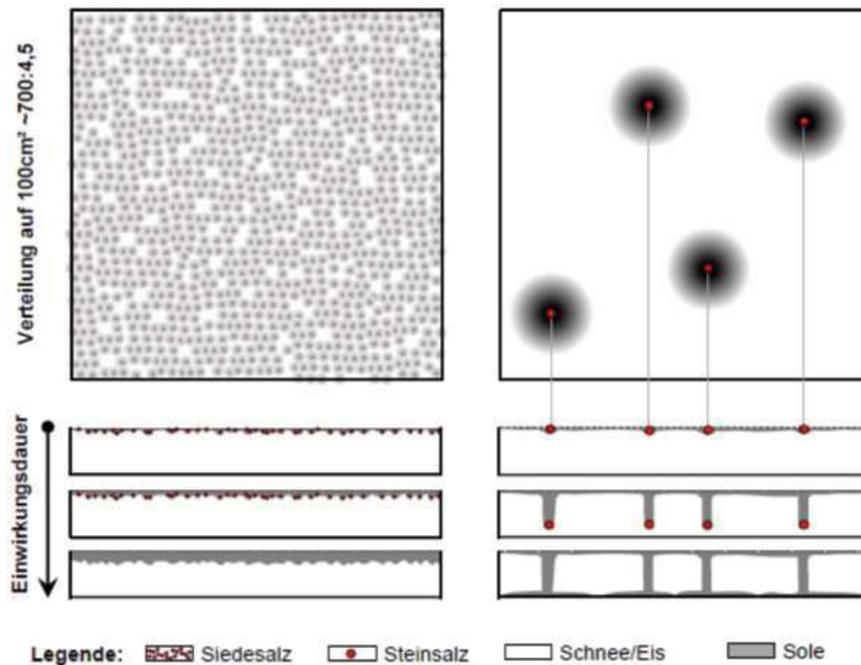


Abbildung 3. Unterschied zwischen Feines und Grobes Salzkörnung [7]

Die Wirkung der Streumittel ist stark von der Temperatur abhängig, wobei es einen signifikanten Unterschied macht, ob die Straßentemperatur beispielsweise bei -5°C oder -15°C liegt. Bei niedrigeren Temperaturen benötigen die Streumittel mehr Zeit und Energie, um effektiv zu wirken, was die Verkehrssicherheit beeinflusst.

Theoretisch führt eine größere Menge an Streumittel zu einer verbesserten Wirkung, aber praktisch wurde festgestellt, dass über eine bestimmte Menge hinaus die Effektivität nicht weiter steigt (beispiel Eutektischer Punkt von NaCl ca. 23% bei -21°C). Unabhängig davon sollte man die Streumenge sorgfältig wählen und diese verantwortungsbewusst sowie nachhaltig einsetzen.

Eine erhöhte Reinheit bedeutet eine bessere Effektivität. Verunreinigungen oder verschiedene Gemische beeinflussen die Auswirkung der auftauende Streumittel.

Die Wirksamkeit von Streumitteln nimmt im Laufe der Zeit ab, da sie durch den Verkehr oder das Auftauen von Schnee und Eis langsam abgetragen werden. Dieser Prozess beeinflusst die Effektivität der Streumaßnahmen und erfordert regelmäßige Nachstreuerungen, um die Verkehrssicherheit zu gewährleisten [7].

2 Prüfmethodik

In dieser Arbeit wurden umfassende Versuche durchgeführt, um die Effizienz und Effektivität der Taumittel zu bestimmen. Dabei wurden verschiedene Aspekte untersucht, die für die Anwendung der Taumittel von entscheidender Bedeutung sind. Zu den durchgeführten Analysen gehören die Ermittlung der Tauleistung, die die Fähigkeit eines Taumittels beschreibt, Eis zu schmelzen, sowie die Bestimmung des Gefrierpunkts, die aufzeigt, bei welchen Temperaturen

das Taumittel optimal eingesetzt werden kann. Zusätzlich wurde der Feuchtigkeitsgehalt der Taumittel gemessen, um die Lagerfähigkeit im Lieferzustand beurteilen zu können. Die Untersuchung der Korngrößenverteilung spielte ebenfalls eine wichtige Rolle, da sie Aufschluss über die physikalischen Eigenschaften und die Handhabung des Taumittels gibt. Darüber hinaus wurde die Rieselfähigkeit getestet, um zu überprüfen, wie sich unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalte auf die Lagerfähigkeit von den Taumitteln auswirkt. Zuletzt wurde auch die Korrosivität der Taumittel analysiert, um ihre möglichen Auswirkungen auf die Infrastruktur und Fahrzeuge festzustellen. Diese umfassenden Tests erlauben eine fundierte Bewertung der Taumittel und deren möglicher Einsatz in der Praxis.

Um die Anonymität der Hersteller zu bewahren, wurden die getesteten Taumittel mit den Bezeichnungen A, B, C, D und E gekennzeichnet. Im Gegensatz zu Taumittel D und E weisen die Taumittel A-C optisch eine ähnliche Zusammensetzung auf. Dies ist in der Abbildung 4 ersichtlich.

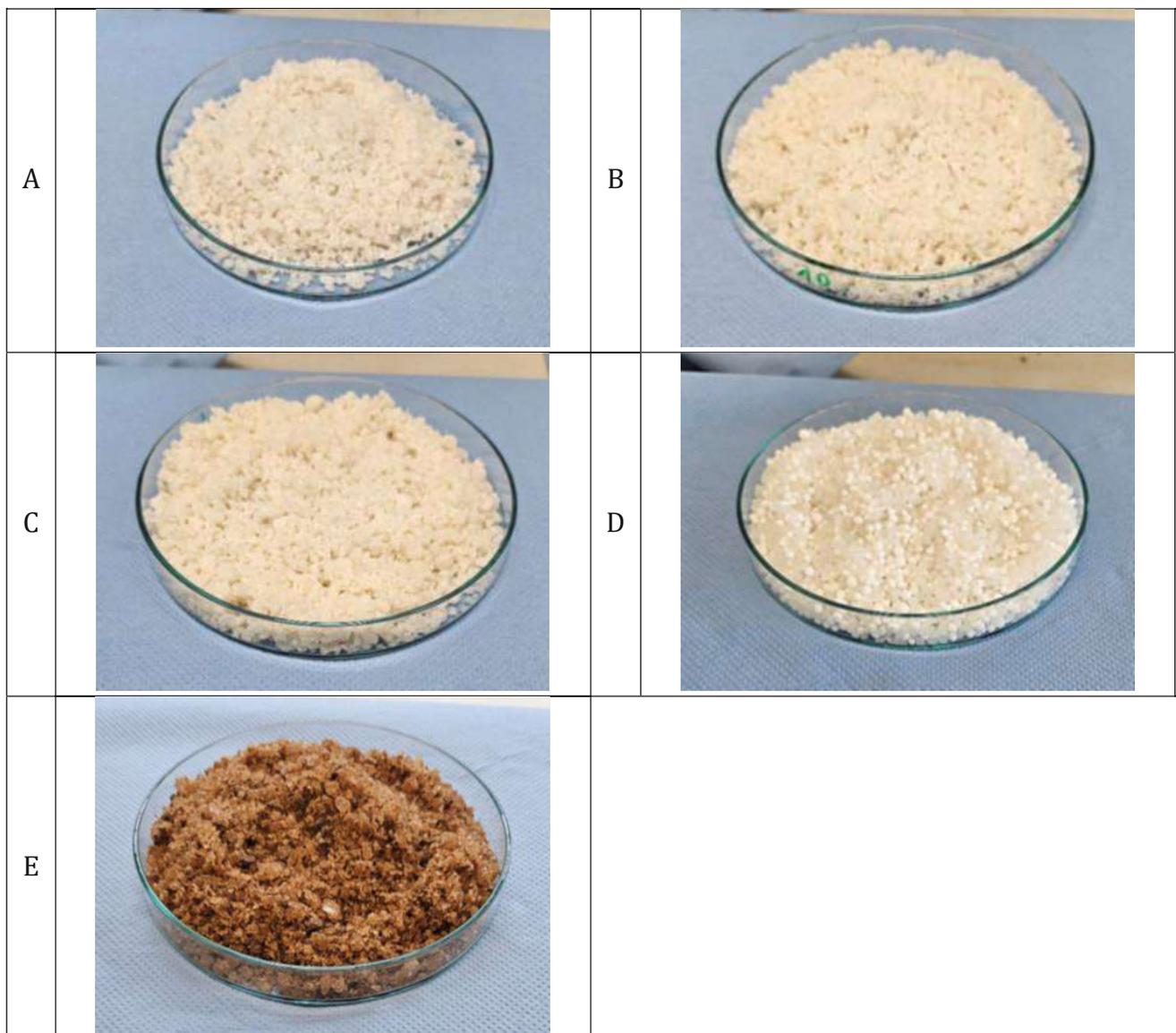


Abbildung 4. in dieser Arbeit geprüften Taumittel

2.1 Prüfprogramm

Insgesamt wurden im Rahmen der Diplomarbeit 254 Versuche durchgeführt (siehe Tabelle 1 zur besseren Veranschaulichung), um die verschiedenen Eigenschaften der Taumittel zu analysieren. Davon entfallen 45 Versuche auf die Bestimmung der Tauleistung, die entscheidend dafür ist, wie effektiv ein Taumittel Eis schmelzen kann. Zusätzlich wurden 56 Versuche durchgeführt, um den Gefrierpunkt der Taumittel zu ermitteln, was für die Anwendung unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen von großer Bedeutung ist. Für die Feuchtigkeitsbestimmung wurden insgesamt 30 Versuche angestellt, um sicherzustellen, dass die Taumittel die erforderlichen Feuchtigkeitseigenschaften aufweisen. Darüber hinaus wurden 26 Versuche zur Analyse der Korngrößenverteilung durchgeführt, die Aufschluss über die physikalischen Zusammensetzungen der Taumittel geben. Schließlich kamen 45 Versuche zur Evaluierung der Rieselfähigkeit hinzu, um die Lagerfähigkeit bzw. die Neigung zum Zusammenbacken der Taumittel zu bestimmen sowie die Gleichmäßigkeit der Ausbringung zu beurteilen. Abgerundet wird die Testreihe durch 52 Versuche zur Untersuchung der Korrosionsbeständigkeit der Taumittel. Diese umfassende Datenerhebung ermöglicht eine detaillierte Bewertung der Effizienz und Sicherheit der eingesetzten Taumittel unter praktischen Bedingungen.

Tabelle 1. Anzahl der Versuchsdurchführungen

Anzahl der Versuche pro Taumittel	Taumittel	Taumittel	Taumittel	Taumittel	Taumittel	NaCl	Gesamt
	A	B	C	D	E		
Tauleistung	4	3	3	2	2	31	45
Einsatztemperatur (Gefrierpunkt)	12	8	8	6	6	16	56
Feuchtigkeit	5	5	5	5	5	5	30
Korngrößenverteilung/Sieblinie	4	4	4	4	4	6	26
Rieselfähigkeit	3	3	3	9	3	24	45
Korrosion	6	6	6	6	6	22	52
Gesamt							254

Von den insgesamt 254 durchgeführten Versuchen waren auch einige Fehlversuche sowie gezielte Verbesserungsversuche enthalten. Letztere wurden initiiert, um die Testmethodik zu verfeinern und die Genauigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Diese Verbesserungsschritte sind entscheidend, um sicherzustellen, dass die restlichen Versuche die gewünschten Ergebnisse liefern und somit eine zuverlässige Grundlage für die Bewertung der Taumittel bieten. Durch das Lernen aus den Fehlversuchen konnte die Durchführung optimiert und potenzielle Fehlerquellen identifiziert werden, was letztendlich zu einer höheren Effizienz und Genauigkeit der gesamten Untersuchung durchgeführt hat.

3 Tauleistung

Die Tauleistung beschreibt die Fähigkeit eines Streumittels, Eis bei einer bestimmten Temperatur und unter spezifischen Bedingungen zu schmelzen, wodurch die Griffbarkeit auf Straßen und Gehwegen unter winterlichen Bedingungen insgesamt verbessert wird [8]. Die Tauleistung kann von mehreren Faktoren beeinflusst werden, darunter die Konzentration des Taumittels, die spezifischen Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Feuchtigkeit sowie die chemische Zusammensetzung des Streumittels (NaCl, CaCl₂, MgCl₂, usw.).

Im Folgenden werden zwei verschiedene Methoden zur Ermittlung der Tauleistung detailliert vorgestellt. Es ist wichtig zu betonen, dass in dieser Arbeit ausschließlich die neue Methode zur Anwendung kam, da sie sich als effektiver und zuverlässiger erwiesen hat. Für weitere Informationen und eine umfassende Beschreibung der neuen Methode siehe Kapitel 3.2, in dem die Vorgehensweise ausführlich dokumentiert ist.

3.1 Bisheriger Versuchsmethode

Die bisherige Versuchsmethode ist die Standardmethode für empirische Untersuchungen im Rahmen des SHRP H-205. 1/2 [9] wobei die SHRP H-205. 1 für feste Taumitteln und die SHRP H 205. 2 für flüssige Taumitteln vorgesehen ist.

Die Versuche werden in einem Klimaschrank (hier: Binder MKF-720) durchgeführt, wobei eine konstante Temperatur von -5°C gewahrt wird, um die Tauleistung unter diesen Bedingungen zu untersuchen. Die Temperatur von -5°C wird als Winterreferenztemperatur angenommen. Abhängig von der Größe des Klimaschranks kann entweder eine große Anzahl an Proben oder größere Proben gleichzeitig geprüft werden [8].

Für den Versuchsaufbau wird benötigt (siehe Abbildung 5):

- Klimaschrank
- 8 Testproben mit ca. 250 g Eis in 205x15mm runde Gefäße
- 8 Taumittel mit ca. 10 g
- Waage
- Kübel zum Entleeren der geschmolzenen Lösung.

Testversuch:

Nachdem die Proben über Nacht auf -5°C gefroren und temperiert wurden, werden sie gewogen, bevor der Versuch gestartet wird. Die Taumittel werden auf die Proben aufgetragen, die Proben mit dem Taumittel abgewogen und die Zeit notiert.

Anschließend wird die Lösung (Wasser mit Taumittel) nach festgestellten Zeitintervallen (5, 10, 30, 60, 120 und 240 Minuten) gewogen, entleert und erneut gewogen.

Die Tauleistung pro Gramm Taumittel wird ermittelt, indem die Differenz zwischen der aufgetragenen Menge des Taumittels und dem geschmolzenen Eis durch die ursprüngliche Menge des

aufgetragenen Taumittels geteilt wird. Diese Kennzahl zeigt die Effektivität der Tauleistung in Abhängigkeit von der Zeit.



Abbildung 5. Versuchsaufbau im Klimaschrank nach SHRP Methode H-205.1/2

3.2 Neue Versuchsmethode

Bei der neuen Methode wird ein Kryostat zur Kühlung der Proben verwendet, um eine simultane und beschleunigte Testdurchführung an einer Vielzahl von Proben (35 Proben pro Versuch) zu ermöglichen, wodurch sowohl die Effizienz als auch die Geschwindigkeit der Tests signifikant gesteigert wird.

Der Versuch selbst findet im Kryostat statt, wobei die umfangreichen Vorbereitungen, wie das Präparieren und Einrichten der Proben, außerhalb des Kryostats erfolgen.

Für den Versuchsaufbau wird benötigt:

- Eis- /Wassergefäß (mit 35 Probeöffnungen)
- Taumittelgefäß (mit 35 Probeöffnungen)
- Waage (Mesgenauigkeit in mg)
- Klimaschrank
- Digitale Kamera (Canon EOS 2000d)
- Kryostat (Haake Phoenix II)
- Hilfsmittel (z.B. Mikropipette, Thermologger mit Fühler, kleiner Trichter etc.)

Testversuch:

Die Probeöffnungen vom Eis-/Wassergefäß werden mit Hilfe der Mikropipette mit je 500µl Wasser gefüllt. Das Gefäß wird mit Frischhaltefolie abgedeckt, um die Verdunstung des Wassers zu verhindern. Danach werden die Proben über Nacht bei -10°C im Klimaschrank eingefroren.

Gleichzeitig wird in einem ähnlichen Gefäß, wo die Probeöffnungen mit je 1000 µl Wasser gefüllt sind, die Temperatur der Proben kontrolliert (durch Thermologger und Thermofühler) (siehe Abbildung 6).

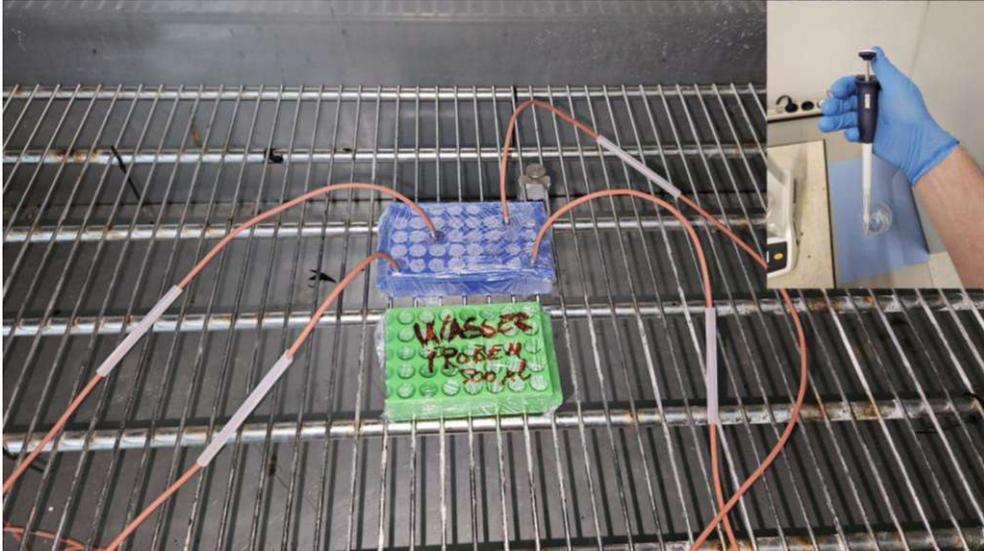


Abbildung 6. Eis- /Wassergefäß im Klimaschrank, oben rechts Mikropipette

Das Taumittel wird vor dem Auftragen (mit Hilfe des kleinen Trichters) in den Probeöffnungen des Gefäßes sorgfältig abgewogen (siehe Abbildung 7) und anschließend wird es mit Papier abgedeckt, um es vor Verschmutzungen zu schützen.

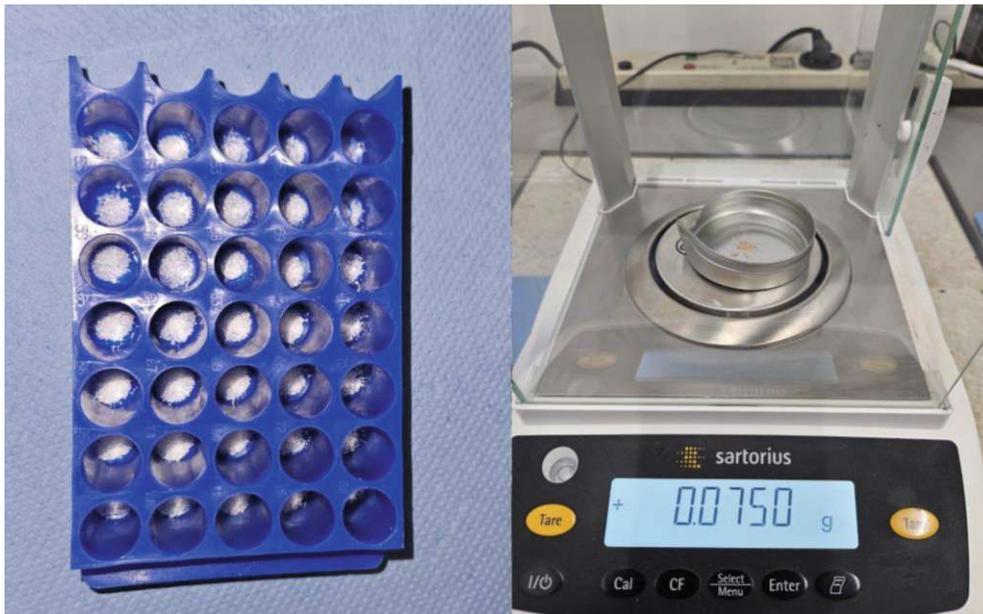


Abbildung 7. Vorbereitung Taumittelproben

In der Regel werden in jeder Reihe unterschiedliche Prozentsätze des Taumittels verwendet, in diesem speziellen Fall variieren diese zwischen 5% und 20%, wobei ein Unterschied von 2,5% pro Reihe besteht (siehe Beispiel in Tabelle 2). Allerdings kann die Menge des Taumittels je nach Bedarf oder spezifischen Anforderungen flexibel angepasst werden, um diese den jeweiligen Gegebenheiten optimal anzupassen.

Tabelle 2. Beispiel der Reihenunterschiede bei eine Eismenge von 400mg

Reihe 1	Reihe 2	Reihe 3	Reihe 4	Reihe 5	Reihe 6	Reihe 7
Taumittel (mg)						
25,00	37,50	50,00	62,50	75,00	87,50	100,00
25,00	37,50	50,00	62,50	75,00	87,50	100,00
25,00	37,50	50,00	62,50	75,00	87,50	100,00
25,00	37,50	50,00	62,50	75,00	87,50	100,00
25,00	37,50	50,00	62,50	75,00	87,50	100,00

Nachdem die Proben über Nacht gefroren sind, werden sie für etwa eine Stunde auf $-5,6^{\circ}\text{C}$ ($-5,6^{\circ}\text{C}$ gemäß geeichter Temperaturfühler, Zieltemperatur im Klimaschrank bei $-4,5^{\circ}\text{C}$) temperiert (siehe Abbildung 8). Es wurde eine Temperatur von $-5,6^{\circ}\text{C}$ gewählt, um dem ungefähr einminütigen Zeitaufwand der Taumittelzugabe auf die Eisproben entgegenzuwirken, da es in diesem Prozess zu einer leichten Temperaturerhöhung der Proben kommt.



Abbildung 8. Temperieren der Eisproben

Der Prozess der Übertragung der Taumittel von dem Taumittelgefäß auf den Eisgefäß folgt mit Hilfe einer selbstgebastelten Zwischengefäß (siehe Abbildung 9). Weitere Einzelheiten zur Zwischengefäß sind im Kapitel 3.1 beschrieben.



Abbildung 9. Zwischengefäß zur Übertragung der Taumittel ins Eisgefäß

Die gerillte Seite des Zwischengefäßes wird auf das Eisgefäß platziert (es rastet ein), dann werden beide Gefäße fest zusammengehalten, gedreht und auf das Taumittelgefäß gestellt. In dieser Position befindet sich das Eisgefäß oben, und das Taumittelgefäß unten.

Durch eine schnelle Umdrehung wird das Taumittel vom Taumittelgefäß auf das Eisgefäß übertragen. Gleichzeitig wird der Startvorgang der Fotoaufnahme (Ein Foto je 30 Sekunden) ausgelöst, um den Zeitpunkt des Beginns der Tauwirkung festzuhalten. In dieser Position befindet sich das Taumittelgefäß oben, und das Eisgefäß unten. Zur Sicherheit wird leicht auf das Taumittelgefäß geklopft, um eventuell haftende Taumittel vom Gefäß zu lösen. Das Taumittelgefäß und das Zwischengefäß werden behutsam entfernt, bevor das Eisgefäß in das Kryostat eingelegt wird (siehe Abbildung 10).

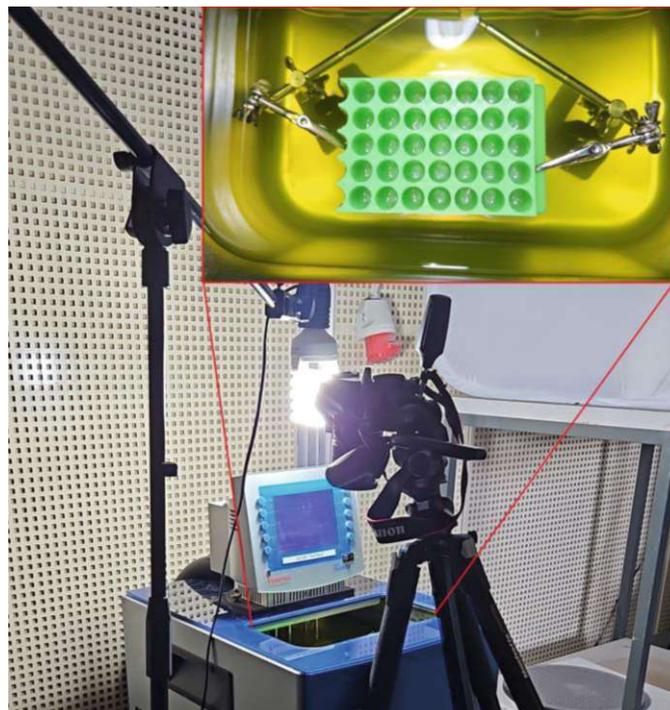


Abbildung 10. Versuchsaufbau im Kryostat

Die Beobachtungszeit kann je nach Bedarf angepasst werden, jedoch wurde für diese Tests die maximale Dauer durch die Akkulaufzeit der Kamera (ca. 300 Minuten) bestimmt. Während des Beobachtungszeitraums konnte ein klarer Zusammenhang festgestellt werden: Proben mit höheren Prozentsätzen an Taumittel zeigten eine tendenziell schnellere Schmelzrate im Vergleich zu Proben mit niedrigeren Anteilen des Taumittels.

Sobald der Akku leer ist, erfolgt eine Überprüfung der Proben, um festzustellen, welche geschmolzen sind und welche nicht. Dabei werden die nicht geschmolzenen Proben dokumentiert (siehe Abbildung 11).

Die Fotos werden auf den Computer übertragen, um sie dort für eine detaillierte Auswertung bereitzustellen. Die Auswertung der Fotos kann aufwendig sein, da jedes Foto einzeln betrachtet werden muss, um den Verlauf der 35 Proben zu verfolgen, bis keine Eisreste, Schatten oder verdrehte Lichtreflexionen mehr sichtbar sind. Wenn Eisreste, Schatten oder verdrehte Lichtreflexionen sichtbar sind, deutet dies darauf hin, dass das Eis nicht oder noch nicht geschmolzen ist. Um sicher zu gehen, werden die Fotos mit jenem letzten Foto verglichen, bei dem der Zustand gesichert vorliegt. Zur besseren Veranschaulichung siehe Abbildung 11.

Nach der Auswertung der Fotos (ein Foto je 30 Sekunden) wurde festgestellt, zu welchem Zeitpunkt die Proben geschmolzen sind. Mit sämtlichen Informationen zu Taumittel, Eis und Tauzeit kann die Tauleistung ermittelt werden. Die Tauleistung pro Gramm Taumittel wird ermittelt, indem die Differenz zwischen der aufgetragenen Menge des Taumittels und dem geschmolzenen Eis durch die ursprüngliche Menge des aufgetragenen Taumittels geteilt wird. Diese Kennzahl zeigt die Effektivität der Tauleistung in Abhängigkeit von der Zeit.



Abbildung 11. Auswertung der Fotos

Es wird empfohlen, mindestens drei Versuche durchzuführen, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse umfassend zu überprüfen und mögliche Fehlerquellen zu identifizieren sowie zu minimieren. Durch diese methodische Vorgehensweise kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse konsistent und zuverlässig sind, was insbesondere in wissenschaftlichen Untersuchungen von großer Bedeutung ist. Darüber hinaus hilft die Durchführung mehrerer Tests, Unregelmäßigkeiten und Abweichungen zu erkennen, die auf spezifische Einflussfaktoren zurückzuführen sein könnten, sodass gegebenenfalls Anpassungen vorgenommen werden können, um die Qualität der Ergebnisse weiter zu verbessern.

3.3 Vorgangsweise Methodenverbesserung

Um die Methode zu verbessern und konsistente Ergebnisse zu erzielen, wurden insgesamt 26 Versuche mit NaCl durchgeführt. In diesen Tests wurden verschiedene Parameter variiert, darunter zwei unterschiedliche Gefäße, die für die Experimente verwendet wurden, sowie zwei verschiedene Eismengen, um die Wirkung unter unterschiedlichen Bedingungen zu untersuchen. Darüber hinaus wurden die Versuche bei drei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt, um die Reaktion der Taumittel unter variierenden klimatischen Einflüssen zu analysieren. Diese umfassende Vorgehensweise ermöglichte eine detaillierte Bewertung der Taumittel und trägt dazu bei, zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen.

Darüber hinaus wurde ein spezielles Zwischengefäß konzipiert, um den Abtragungsprozess des Taumittels vom Taumittelgefäß auf das Eisgefäß zu optimieren. Dieses Zwischengefäß spielt eine entscheidende Rolle, da es nicht nur dazu beiträgt, den Transfer des Taumittels zu vereinfachen, sondern auch dazu, den Verlust von Taumittel während des gesamten Prozesses zu minimieren oder idealerweise ganz zu verhindern. Durch die Reduzierung des Taumittelverlustes wird sichergestellt, dass die Taumittel effizienter eingesetzt werden können, was letztendlich zu einer besseren Effektivität bei der Schmelzung von Eis führt. Die sorgfältige Gestaltung dieses Zwischengefäßes trägt somit die Effizienz des gesamten Verfahrens bei.

Zuerst wurden Versuche mit dem grünen Gefäß, entsprechend den Angaben in Kapitel 3.2, unter Verwendung von 1000 μl Wasser durchgeführt. Dabei fiel auf, dass die Ergebnisse nicht konsistent waren; vielmehr zeigte sich eine Abweichung bei gleichen Prozentsätzen. Es wurde ebenfalls beobachtet, dass das Taumittel nicht korrekt übertragen wird, da es nicht nur auf den Proben selbst landet, sondern auch auf den angrenzenden Flächen verteilt wird (siehe Abbildung 12). Diese ungenaue Übertragung kann zu fehlerhaften Ergebnissen führen, da ein Teil des Taumittels nicht direkt auf der Probe wirkt, was möglicherweise die Gesamtleistung des Taumittels beeinträchtigt. Daher wurden mehrere Tests durchgeführt, um die Übertragung des Taumittels zu untersuchen (siehe Abbildung 12).

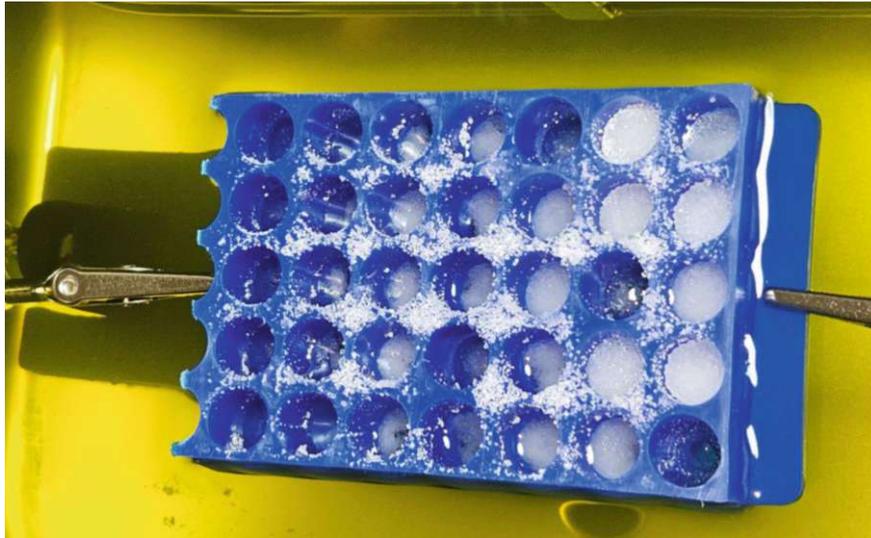


Abbildung 12. ungenaue Abtragung von Taumittel

Basierend den durchgeführten Untersuchungen wurde ein Zwischengefäß entworfen und gebaut, um die Übertragung des Taumittels zu erleichtern und den Verlust des Taumittels zu minimieren oder idealerweise vollständig zu verhindern. Zunächst wurde eine dickere Aluminiumfolie verwendet, die sich jedoch als nicht besonders zuverlässig erwies und leicht defekt wurde (siehe Abbildung 13). Um die Dauerhaftigkeit zu erhöhen und bessere Ergebnisse zu erzielen, wurde entschieden Aluminiumblech zu verwenden (siehe Abbildung 9 und 14), damit eine höhere Stabilität und Langlebigkeit erzielt werden kann.



Abbildung 13. Zwischengefäß aus dickerem Alufolie

Um eine optimale Übertragung des Taumittels zu gewährleisten, wird die gerillte Seite auf dem Eisgefäß platziert, während die glatte Seite auf das Taumittelgefäß kommt (siehe Abbildung 9 und 14).



Abbildung 14. Zwischengefäß aus Aluminiumblech

Der Unterschied zwischen den Tests, die ohne Zwischengefäß durchgeführt wurden, und denjenigen, die mit einem Zwischengefäß durchgeführt wurden, wird in Abbildung 15 übersichtlich dargestellt.

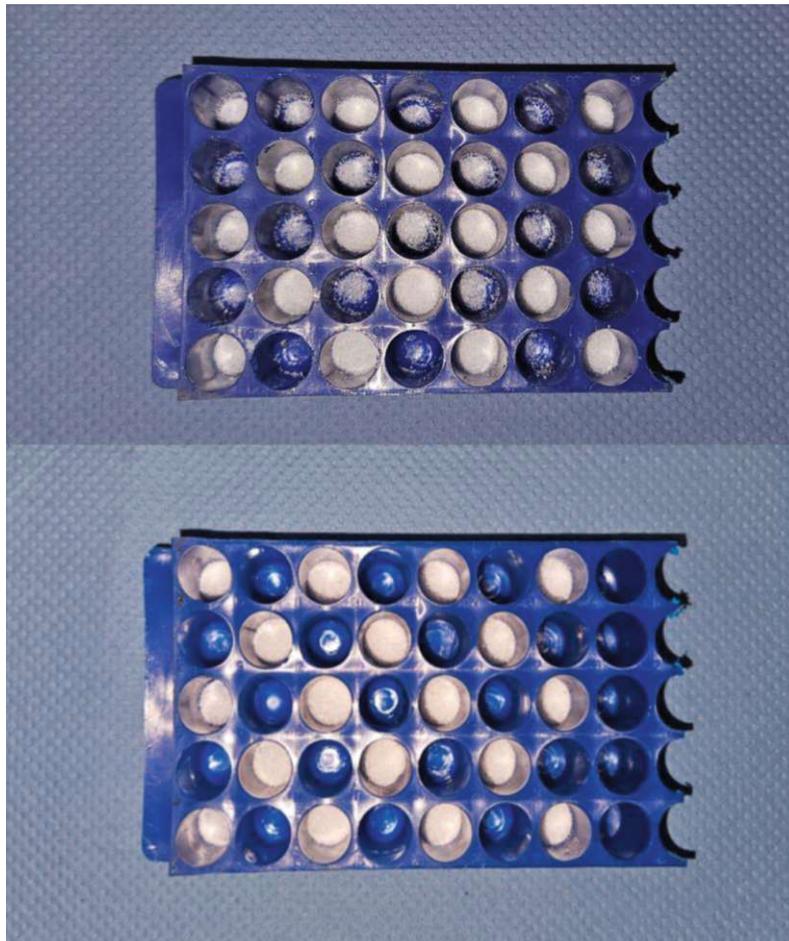


Abbildung 15. Taumittelabtragung: ohne (oben) und mit Zwischengefäß (unten)

Diese Abbildung ermöglicht es, die Auswirkungen des Einsatzes des Zwischengefäßes auf die Ergebnisse anschaulich zu erkennen und zu vergleichen. Durch die visuelle Darstellung dieser Unterschiede können die Unterschiede in der Leistung und Effizienz der Taumittel unter den jeweiligen Bedingungen besser nachvollzogen werden, was zu einem tieferen Verständnis für die experimentellen Ergebnisse beiträgt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten eindeutig, dass die Verwendung des Zwischengefäßes eine überaus effektive Abtragung des Taumittels von 99,8% gewährleistete. Diese hohe Effizienz unterstreicht die wichtige Rolle des Zwischengefäßes im gesamten Prozess, da es ermöglicht, das Taumittel gezielt und präzise zu übertragen, wodurch seine Wirksamkeit erheblich gesteigert wird.

Obwohl das Problem mit der Abtragung des Taumittels erfolgreich gelöst wurde, blieben die weiteren erzielten Ergebnisse weiterhin inkonsistent und zeigten unerwartete Schwankungen.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse für 10% Taumittel dargestellt. Hierbei ist erkennbar, dass das Minimum bei 109,5 Minuten (grün markiert) liegt, während das Maximum 160,5 Minuten (rot markiert) beträgt. Dies ergibt einen Unterschied von 51 Minuten, obwohl der gleiche Prozentsatz des Taumittels verwendet wurde.

Analog zu den in Tabelle 3 angezeigten Ergebnissen zeigen auch die Resultate für die anderen Prozentsätze bemerkenswerte Unterschiede.

Tabelle 3. Beispiel mit 10% Taumittel zur Erklärung der inkonsistenten Ergebnisse

	Probe	Datum	Temperatur	Wasser (Ist)	Salzangabe von Wasser	Salz (Ist) im Wassergefäß	Tauzeit	Taurate
Nr.			(°C)	(µl)	(%)	(mg)	(min)	(mg/mg)
21	66	24.01.2024	-5	1.000,08	10%	101,30	124,50	9,87
22	67	24.01.2024	-5	1.000,08	10%	100,50	118,50	9,95
23	68	24.01.2024	-5	1.000,08	10%	102,80	123,00	9,73
24	69	24.01.2024	-5	1.000,08	10%	101,00	109,50	9,90
25	70	24.01.2024	-5	1.000,08	10%	103,90	160,50	9,63

Diese Unstimmigkeiten deuten darauf hin, dass möglicherweise weitere Faktoren das Ergebnis beeinflussen, die noch genauer untersucht werden müssen, um zuverlässige und reproduzierbare Resultate zu gewährleisten.

Die nächste Überlegung bestand darin, die Temperatur auf -2,5°C umzustellen, was auch für einige Versuche umgesetzt wurde. Die daraus resultierenden Ergebnisse waren jedoch nicht zielführend, da die Werte für 7,5%, 10% und 12,5% nahezu identisch waren (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4. Ergebnisse aus Untersuchungen mit Temperatur von $-2,5^{\circ}\text{C}$

	Probe	Datum	Temperatur	Wasser (Ist)	Salzangabe von Wasser	Salz (Ist) im Wassergefäß	Tauzeit	Taurate
Nr.			($^{\circ}\text{C}$)	(μl)	(%)	(mg)	(min)	(mg/mg)
6	51	30.01.2024	-2,5	1.000,26	7,50%	83,10	79,00	12,04
7	52	30.01.2024	-2,5	1.000,26	7,50%	88,70	73,00	11,28
8	53	30.01.2024	-2,5	1.000,26	7,50%	82,30	77,00	12,15
9	54	30.01.2024	-2,5	1.000,26	7,50%	77,80	79,50	12,86
10	55	30.01.2024	-2,5	1.000,26	7,50%	76,80	78,50	13,02
11	56	30.01.2024	-2,5	1.000,26	10,00%	104,40	56,50	9,58
12	57	30.01.2024	-2,5	1.000,26	10,00%	98,90	65,50	10,11
13	58	30.01.2024	-2,5	1.000,26	10,00%	102,00	59,00	9,81
14	59	30.01.2024	-2,5	1.000,26	10,00%	111,70	65,50	8,95
15	60	30.01.2024	-2,5	1.000,26	10,00%	112,80	62,50	8,87
16	61	30.01.2024	-2,5	1.000,26	12,50%	131,10	54,50	7,63
17	62	30.01.2024	-2,5	1.000,26	12,50%	128,50	96,50	7,78
18	63	30.01.2024	-2,5	1.000,26	12,50%	123,40	80,00	8,11
19	64	30.01.2024	-2,5	1.000,26	12,50%	132,80	72,50	7,53
20	65	30.01.2024	-2,5	1.000,26	12,50%	125,60	51,50	7,96

Im Weiteren wurden mehrere Versuche mit 15% Taumittel an allen Proben durchgeführt, um zu untersuchen, ob die Abweichungen zwischen den Proben während der Tests konsistent bleiben. Der Gedanke dahinter war, dass die glatte Oberfläche der unteren Seite des Gefäßes möglicherweise eine Rolle bei der Wärmeleitung in den Proben spielt, was zu einer ungleichmäßigen Wärmeübertragung führen könnte. Die Ergebnisse wiesen keine Konsistenz auf, jedoch wurde festgestellt, dass die Proben, die am Rand positioniert waren, früher schmolzen als die Proben in der Mitte (siehe Abbildung 16 als Beispiel).

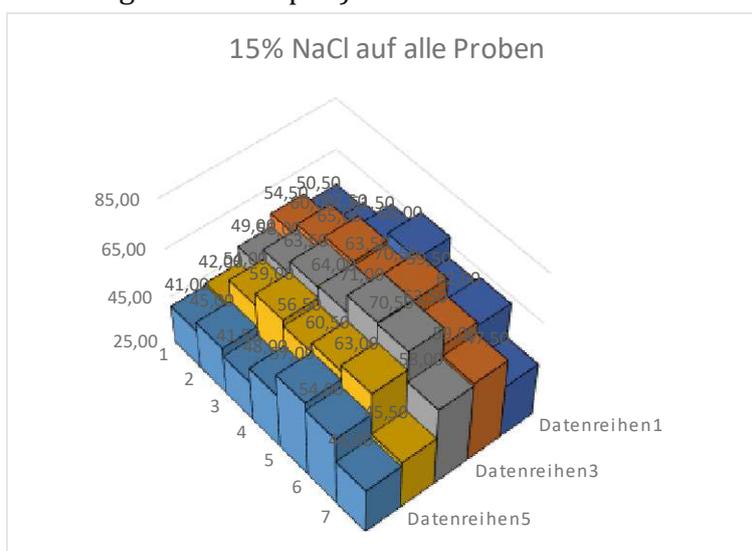


Abbildung 16. Unterschiede der Tauzeiten in Minuten im Gefäß (mit eine Standardabweichung von 8,49 Minuten)

Mit den neuen Erkenntnissen wurde vorgeschlagen, dass alternative Gefäße eingesetzt werden, um die Theorie der Wärmeleitung genauer überprüfen zu können. Ein wichtiger Aspekt dabei ist, dass die untere Fläche des Gefäßes gleichmäßig auf den Proben aufliegt, um konsistente Ergebnisse zu gewährleisten.

Nach einer umfassenden Internetrecherche wurde das Gefäß ausgewählt, das in der Abbildung 17 dargestellt ist. Dieses Gefäß erfüllt die vorgegebenen Anforderungen hinsichtlich der Form der unteren Seite, die entscheidend dafür ist, dass eine gleichmäßige Wärmeleitung zu den Proben gewährleistet ist.



Abbildung 17. neue Gefäße mit gleichmäßige Wärmeleitung. (obere Seite oben und untere Seite unten)

Darüber hinaus bietet das Gefäß ausreichend Platz für die benötigte Menge an Wasser/Eis, während es gleichzeitig eine befriedigende Anzahl an Proben aufnehmen kann. Diese Faktoren machen das ausgewählte Gefäß zur optimalen Wahl für unsere Untersuchung.

Mit den neuen Gefäßen wurden eine Reihe von Tests durchgeführt, bei denen sowohl 15% als auch 20% Taumittel an allen Proben zum Einsatz kamen. Die Entscheidung, diese spezifischen Konzentrationen zu verwenden, wurde getroffen, um ein schnelleres Schmelzen der Proben zu gewährleisten. Dies ermöglicht es, innerhalb eines Tages mehrere Tests mit der akkubetriebenen Kamera durchzuführen. Durch diese Vorgehensweise kann das Experiment effizienter gestaltet werden, da die Proben in kürzeren Abständen überprüft werden können.

Zusätzlich wurde die Menge an Wasser/Eis auf 500 μ l festgelegt, um die Konsistenz der Ergebnisse zu gewährleisten und die Effektivität der Taumittel unter diesen spezifischen Bedingungen umfassend zu analysieren.

Obwohl das neue Gefäß verwendet wurde, wiesen die erzielten Ergebnisse nach wie vor Inkonsistenzen auf. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass die Proben mit 500 µl Wasser/Eis signifikant bessere Resultate lieferten.

Die Abweichungen dieser Messungen lagen näher beieinander, was darauf hindeutet, dass sie innerhalb der akzeptablen Messtoleranz lagen. Dies deutet darauf hin, dass die Verwendung von 500 µl Wasser eine stabilere Testumgebung geschaffen hat, was möglicherweise zu zuverlässigeren und reproduzierbaren Ergebnissen führte (siehe Abbildung 18).

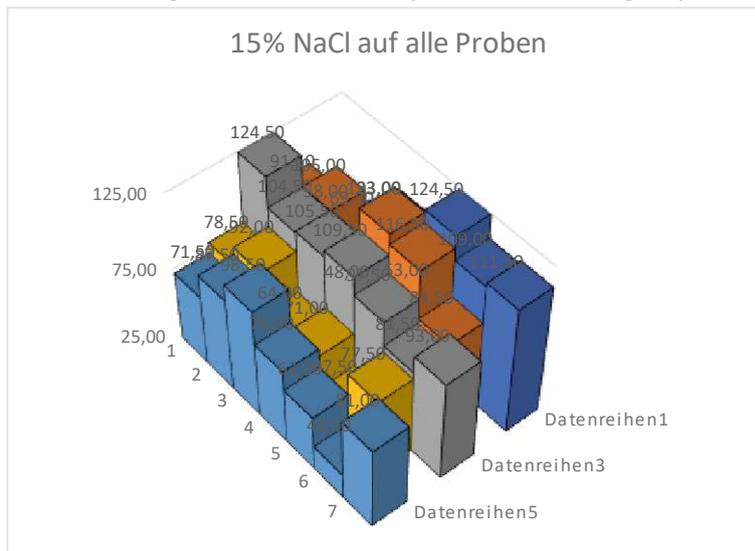


Abbildung 18. Abweichung der Ergebnisse (Tauzeiten in Minuten) mit dem neuen Gefäß (mit einer Standardabweichung von 22,9 Minuten)

Aufgrund der gewonnenen neuen Erkenntnisse wurde entschieden, auf das grüne Gefäß umzusteigen und die Menge des verwendeten Wassers auf 500 µl zu reduzieren. Nach der Durchführung mehrerer Tests konnte festgestellt werden, dass die Ergebnisse nun reproduzierbar sind, was auf eine verbesserte Konsistenz und Zuverlässigkeit der Messungen hinweist (siehe Abbildung 19).

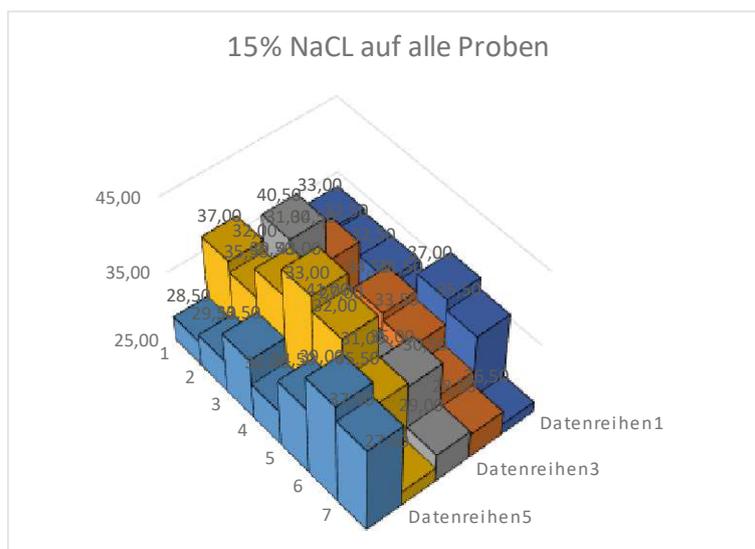


Abbildung 19. Unterschiede der Tauzeiten in Minuten im Gefäß mit 500µl Wasser/Eis (mit einer Standardabweichung von 4,07 Minuten)

Diese positive Entwicklung deutet darauf hin, dass die Anpassungen sowohl bezüglich des verwendeten Gefäßes als auch der Wassermenge hilfreich waren, um die Effizienz des Versuchsablaufs zu steigern und eine präzisere Analyse der Taumittel zu ermöglichen. Solche konsistenten Ergebnisse sind entscheidend für die Validierung der Testergebnisse und die weitere Untersuchung der Eigenschaften der Taumittel.

Letztendlich wurden auch umfangreiche Tests bei -6°C durchgeführt, um alternative Bedingungen zu untersuchen und die Auswirkungen dieser niedrigeren Temperatur auf die Ergebnisse zu analysieren. Ziel dieser Tests war es, festzustellen, ob die Ergebnisse unter diesen veränderten Bedingungen ebenfalls reproduzierbar waren. Dies ist entscheidend, um die Zuverlässigkeit der Taumittel unter verschiedenen Temperaturen zu gewährleisten und ein besseres Verständnis ihrer Leistung in realen Anwendungsszenarien zu entwickeln.

Die aus diesen Tests gewonnenen Daten waren konsistent und zeigten wertvolle Erkenntnisse, die zur Optimierung der Taumittel und zur Verbesserung ihrer Anwendungsmöglichkeiten unter verschiedenen klimatischen Bedingungen beitragen können.

Schließlich wurde die Entscheidung getroffen, das grüne Gefäß in Kombination mit $500\ \mu\text{l}$ Wasser/Eis und einer Temperatur von -5°C zu verwenden (siehe Kapitel 3.2). Diese Wahl basiert auf den bisherigen Erkenntnissen und Tests, die gezeigt haben, dass diese spezifische Kombination die besten Ergebnisse in Bezug auf Konsistenz und Reproduzierbarkeit der Messungen liefert. Durch die Festlegung dieser Parameter wird angestrebt, die Effektivität der Taumittel unter kontrollierten Bedingungen weiter zu optimieren.

3.4 Ergebnisse

Die Proben wurden über einen Zeitraum von bis zu 300 Minuten gründlich beobachtet, um die maximale Taurate zu ermitteln. Diese umfassende Beobachtungsdauer ermöglicht es die Effizienz der Taumittel beim Schmelzen von Eis zu bewerten und herauszufinden, zu welchem Zeitpunkt die bestmögliche Leistung erreicht wird. Durch sorgfältige Analyse der Ergebnisse innerhalb dieser Zeitspanne können fundierte Rückschlüsse auf das Verhalten der Taumittel und deren Effektivität in unterschiedlichen Anwendungsszenarien gezogen werden.

Die Ergebnisse werden in Diagrammen dargestellt, die die Taurate (das Verhältnis von geschmolzenem Eis pro Masse des eingesetzten Taumittels) in Abhängigkeit von der Zeit bei einer Temperatur von -5°C veranschaulichen.

Um die Ergebnisse der untersuchten Taumittel sinnvoll vergleichen zu können und ein umfassenderes Verständnis für deren Leistung zu entwickeln, wurden auch Untersuchungen mit NaCl durchgeführt. Dies ermöglicht es, die Effektivität der verschiedenen Taumittel besser einzuschätzen, indem sie mit einem etablierten Standard verglichen werden.

In Abbildung 20 sind die Ergebnisse für NaCl dargestellt, bei denen die maximale Taurate von 13,5 nach ungefähr 100 Minuten ersichtlich wird.

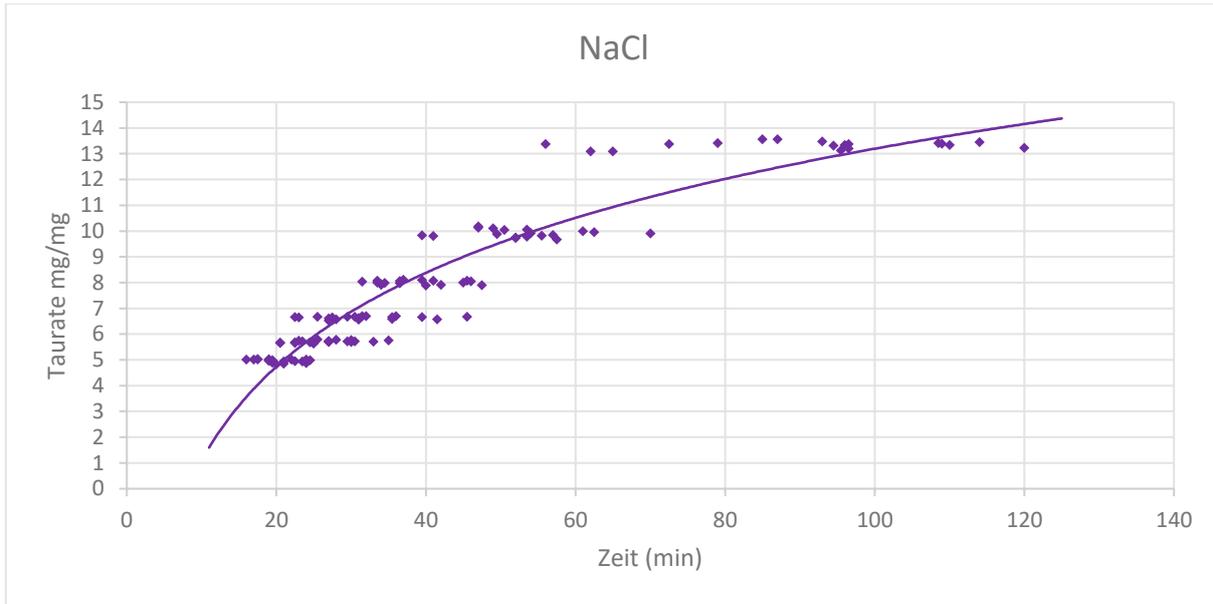


Abbildung 20. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für NaCl

Die Mittelwerte der Ergebnisse sind mittels einer logarithmischen Linie dargestellt, um die Regressionstrends klarer zu veranschaulichen. Je steiler die Regressionslinie ansteigt, desto effektiver erweist sich das Taumittel in seiner Fähigkeit, Schnee oder Eis zu schmelzen. Ein schnellerer Anstieg der Linie deutet darauf hin, dass das Taumittel in kürzerer Zeit eine größere Menge Eis schmelzen kann, was auf eine höhere Effizienz und Wirksamkeit bei der Anwendung hinweist. Diese Beziehung zwischen dem Anstieg der Regressionslinie und der Effektivität der Taumittel ist entscheidend für die Beurteilung ihrer Leistungsfähigkeit und Einsatzmöglichkeiten.

In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse der untersuchten Taumittel A bis E zusammen mit den Ergebnissen von NaCl zum Vergleich dargestellt.

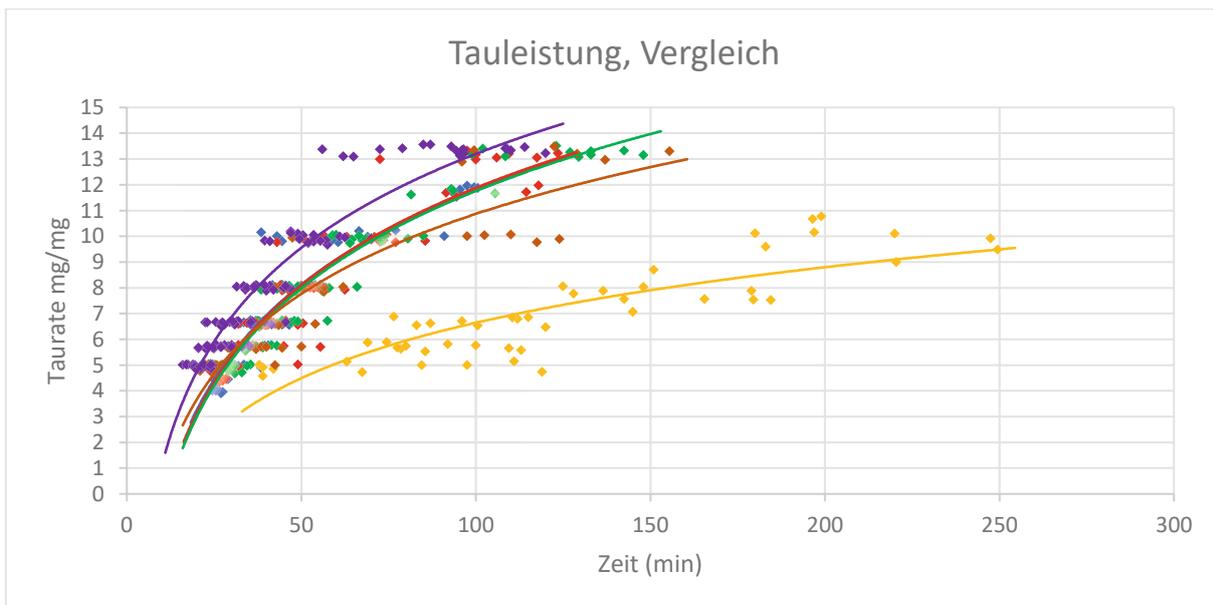


Abbildung 21: Vergleich der Ergebnisse: Taumittel A (Blau), Taumittel B (Rot), Taumittel C (Grün), Taumittel D (Orange), Taumittel E (Braun), NaCl (Lila)

Aus der Abbildung 21 und den entsprechenden Regressionslinien lässt sich deutlich ablesen, dass Natriumchlorid einen steilen Anstieg aufweist, was auf eine erheblich schnellere Schmelzrate hinweist. Dies bedeutet, dass Natriumchlorid besonders effektiv im Schmelzen von Eis ist.

Im Anschluss daran zeigen die Taumittel A, B und C ähnliche Ergebnisse, die darauf hindeuten, dass diese ebenfalls eine vergleichbare Effizienz aufweisen. Im Gegensatz dazu weist Taumittel E einen leichten Abstieg in der Regressionslinie auf, was darauf hindeutet, dass es unter den getesteten Bedingungen weniger effektiv ist.

Taumittel D hingegen zeigt die schwächsten Ergebnisse in der gesamten Auswertung, was darauf hinweist, dass seine Fähigkeit, Eis zu schmelzen, im Vergleich zu den anderen Taumitteln am geringsten ist.

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse für Taumittel A dargestellt, bei denen die maximale Taurate von 12 nach ungefähr 100 Minuten erreicht wird.

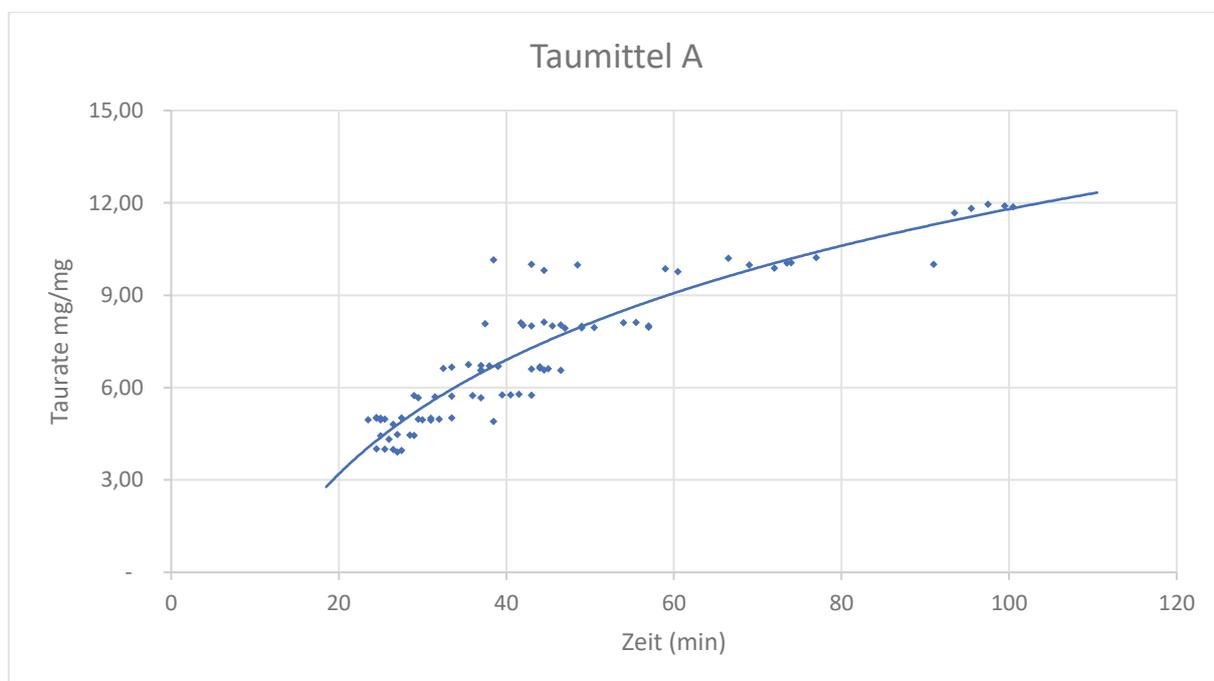


Abbildung 22. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für Taumittel A

Die Ergebnisse der Taumittel B, die im Abbildung 23 dargestellt sind, zeigen das die maximale Taurate von 13 nach ungefähr 125 Minuten erreicht wird.

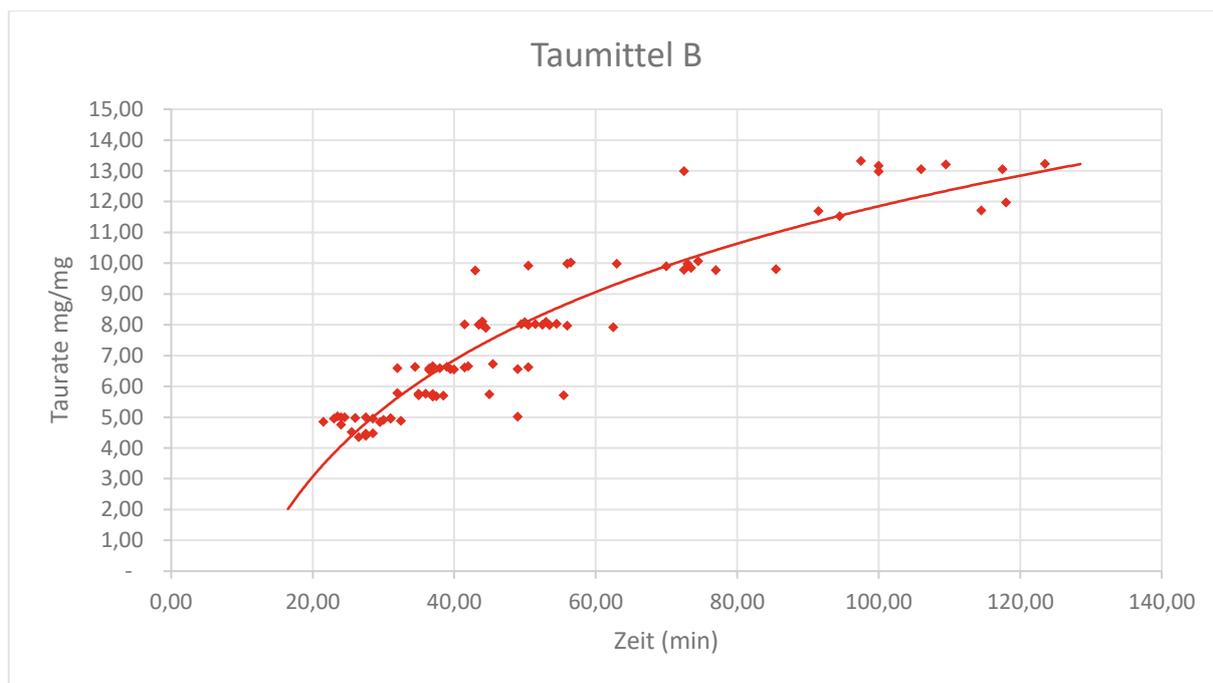


Abbildung 23. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für Taumittel B

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse für Taumittel C dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass die maximale Taurate von 13 nach ungefähr 125 Minuten erreicht wird.

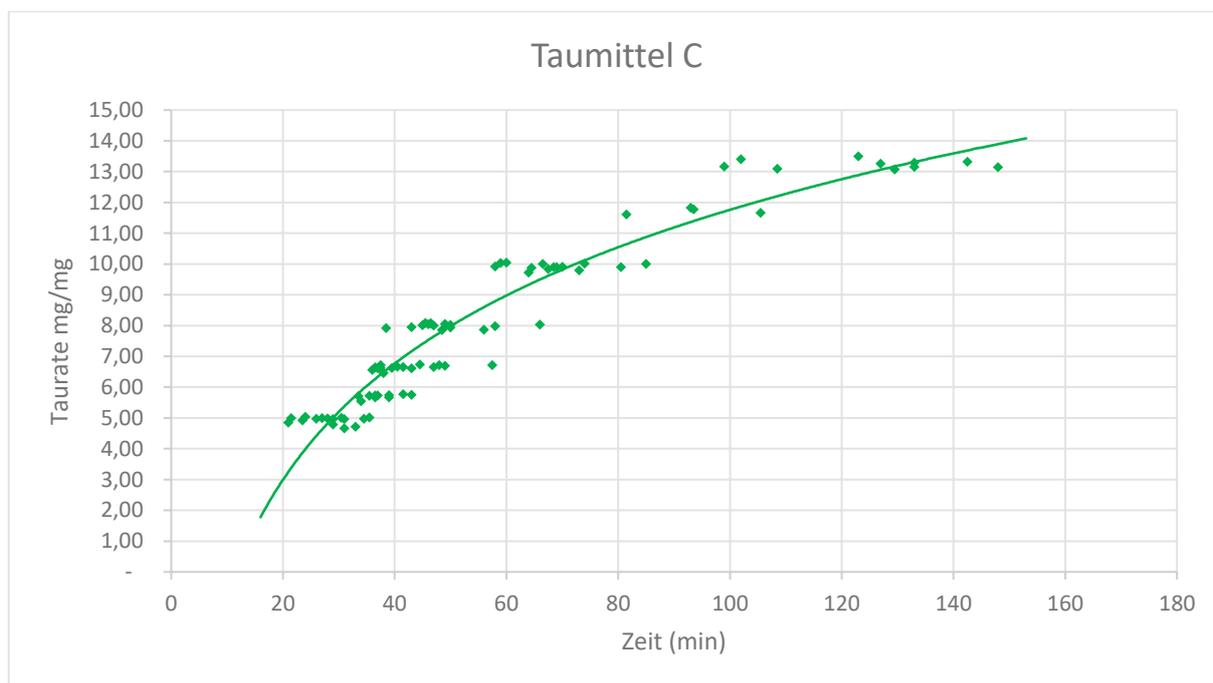


Abbildung 24. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für Taumittel C

Taumittel D erzielte schwache Ergebnisse in Bezug auf die Tauleistung, wobei die maximale Taurate mit 9,5 nach ungefähr 250 Minuten erreicht wird (siehe Abbildung 25).

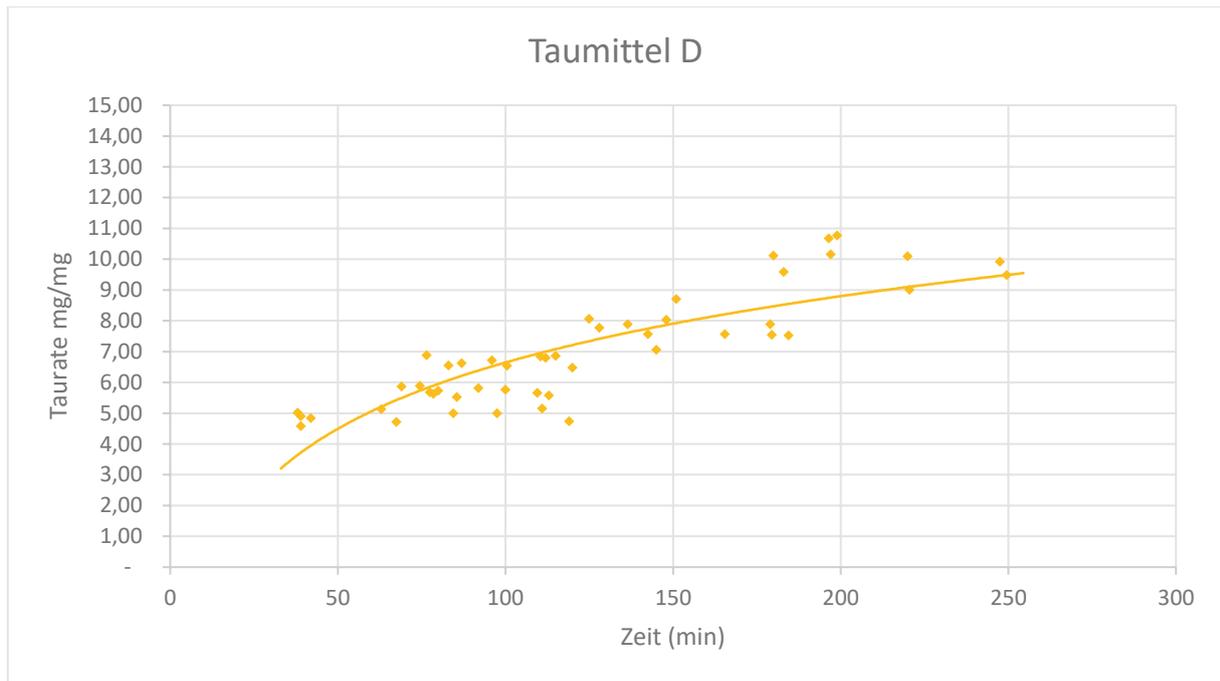


Abbildung 25. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für Taumittel D

Es ist entscheidend zu betonen, dass die Arbeit mit Taumittel D als herausfordernd empfunden wurde, da es äußerst schnell Feuchtigkeit aufnimmt und eine ölige Masse zwischen den Körnern bildet, die zudem leicht an den Arbeitsgegenständen haftet (siehe dazu Abbildung 26 und Kapitel 5.2 Lagerfeuchtigkeit).



Abbildung 26. Klebrige Masse der Taumittel D auf dem Arbeitsgegenstand (Löffel)

Die Ergebnisse der Taumittel E zeigen, dass die maximale Taurate von 13 nach ungefähr 160 Minuten erreicht wird (siehe Abbildung 27).

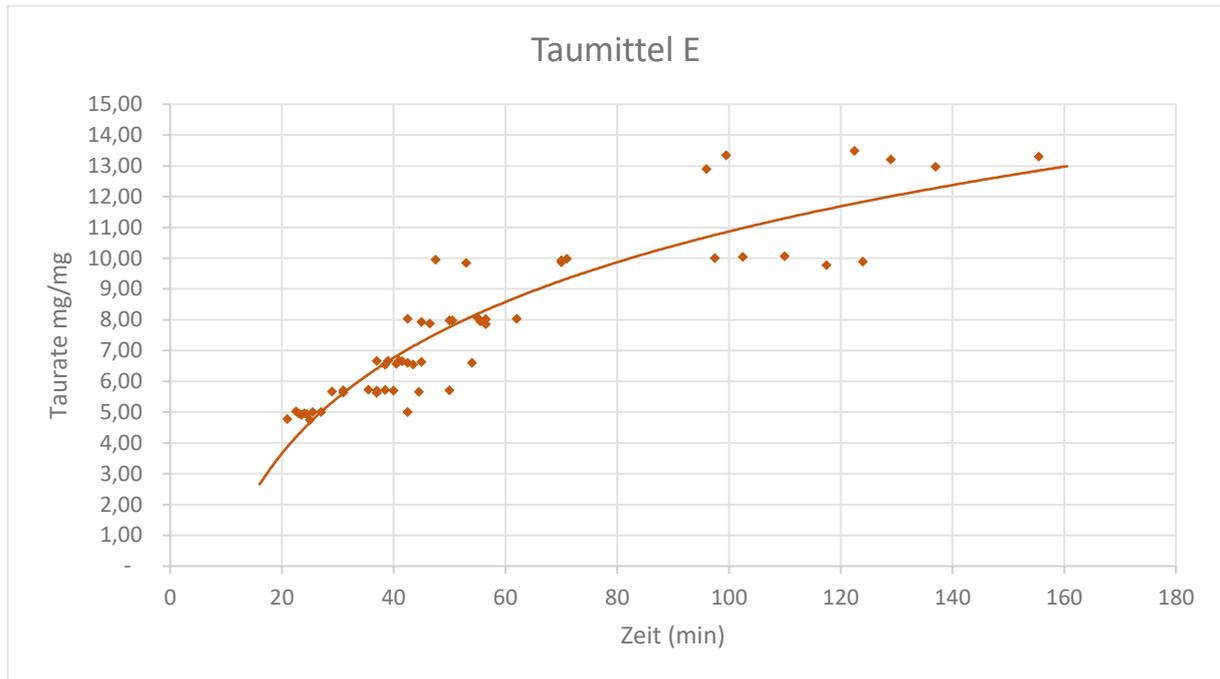


Abbildung 27. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für Taumittel E

In Abbildung 27 ist zu erkennen, dass bei höheren Tauraten nur wenige Ergebnisse sichtbar sind. Dies ist auf die Unreinheit des Taumittels zurückzuführen, wie in Abbildung 28 gezeigt, und verdeutlicht, dass diese Unreinheit einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse hat.



Abbildung 28. Schwarze Körner, die die Unreinheit des Taumittel E aufzeigen.

4 Einsatztemperatur (Gefrierpunkt)

Taumittel senken den Gefrierpunkt mit zunehmender Konzentration kontinuierlich, bis der sogenannte eutektische Punkt erreicht ist. An diesem Punkt handelt es sich um die spezifische Konzentration, bei der der Gefrierpunkt nicht weiter sinkt, selbst wenn die Konzentration des Taumittels weiter erhöht wird [1].

Die Einsatztemperatur (Gefrierpunkt) gibt an, bei welchen Temperaturen das Taumittel auf bestimmte Konzentration optimal angewendet werden sollte, wobei der Gefrierpunkt die Grenze darstellt, bis zu der die Wirkung des Taumittels auf bestimmte Konzentration wirksam bleibt. Was bedeutet, dass sobald der Gefrierpunkt erreicht wird, ist das Taumittel mit einer bestimmten Konzentration nicht mehr in der Lage, Eis oder Schnee effektiv zu schmelzen. Daher ist es wichtig, die Einsatztemperatur zu berücksichtigen, um sicherzustellen, dass das Taumittel unter optimalen Bedingungen und unter optimaler Konzentration angewendet wird, um die bestmögliche Wirkung zu erzielen.

Im folgenden Abschnitt wird die Versuchsmethode detailliert erläutert, die im Rahmen dieser Arbeit angewendet wurde. Dabei werden die einzelnen Schritte, die Durchführung des Experiments sowie die eingesetzten Materialien und Geräte genau beschrieben. Abschließend werden die erzielten Ergebnisse präsentiert.

4.1 Versuchsmethode

Der Versuch wurde gemäß Arbeitsanweisung zur Bestimmung des Gefrierpunktverlaufs von Lösungen in Abhängigkeit der Konzentration durchgeführt [10], daher werden in diesem Kapitel nur kurz die einzelnen Schritte (für Taumittel mit endothermer Reaktion während der Lösung) erläutert, da wir keine Taumittel mit exothermer Reaktion während der Lösung hatten. Nähere Aufklärung der Testdurchführung sind im Anhang A zu finden. Das Ziel dieses Versuchs ist es zu ermitteln, bei welcher Temperatur eine Salzlösung abhängig von ihrer Konzentration gefriert.

Für den Versuchsaufbau wird benötigt:

- Klimaschrank
- 2 Thermologger mit je 4 Fühler
- Thermologger mit 2 Sensoren (Temperatur und Feuchte)
- 8 Kunststoffflaschen je 500 ml (siehe Abbildung 29)
- Hilfsmittel: Waage, Glasschale, Trichter, Magnetprüher etc.

Testversuch:

Die Kunststoffflaschen werden mit einer Lösung im Gewicht von 400 g gefüllt. Abhängig von der Solekonzentration werden unterschiedliche Mengen Wasser und Salz gemischt. In den durchgeführten Versuchen wurde ein Taumittelanteil von 5 bis 30% verwendet. Als Beispiel wird eine Salzkonzentration von 10% angenommen, um die Berechnung der benötigten Salzmenge aufzuklären.

Die Gesamtmenge der Lösung beträgt 400 g, 90% Wasser und 10% Salz. 90% von 400 g sind 360 g Wasser. Die Salzmenge wird mit folgender Formel ermittelt:

$$\text{Salzmenge [g]} = \frac{\left(\frac{\text{Solekonzentration [M\%]}}{100}\right) * \text{Wassermenge [g]}}{1 - \frac{\text{Solekonzentration [M\%]}}{100}} \quad \dots (1)$$

Von der Ermittlung kommt die Salzmenge von 40 g. Also um eine Solekonzentration mit 400 g und 10% Taumittelanteil zu gewinnen, müssen 360 g Wasser mit 40 g Taumittel gemischt werden.

Zuerst kommt die Kunststoffflasche (Beschriftet zur Rückverfolgung) auf die Waage, wird tariert, und dann mit Wasser (die gewünschte Menge auf 0,1 g gerundet) gefüllt und an den Prüfprotokoll notiert.

Auf die leere Glasschale wird das Taumittel eingewogen und mit Hilfe des Trichters auf die mit Wasser gefüllte Kunststoffflasche eingegeben, und an den Prüfprotokoll notiert.

Die Lösung wird durch Schütteln und unter Verwendung eines Magnetrührers gemischt, bis eine homogene Mischung entsteht. Die Mischung dauert je nach Solekonzentration und Art des Taumittels ungefähr 5-10 Minuten.

Temperaturfühler in die Kunststoffflasche einführen und die Flasche verschließen. Es wird notiert, welcher Temperaturfühler auf welche Flasche gesetzt wird, um die Ergebnisse rückverfolgen zu können. Den Kopf des Temperaturfühlers (Temperatursensor) so positionieren, dass er sich in der Mitte der Lösung befindet. Ein Abstand von ca. 5 cm zum Boden der Flasche muss eingehalten werden. (siehe Abbildung 29)



Abbildung 29. Temperaturfühler in die Kunststoffflasche ordnungsgemäß positioniert.

Die Kunststoffflaschen werden in der Mitte des Klimaschranks platziert, um die Temperaturunterschiede im Klimaschrank zu minimieren (siehe Abbildung 30). Position der Thermofühler sind zu überprüfen.



Abbildung 30. Positionierung der Kunststoffflaschen im Klimaschrank.

Um die vollständige Durchfrierung aller Proben sicherzustellen, werden sie über Nacht (einen Zeitraum von mehr als 12 Stunden) bei einer Temperatur von -40°C im Klimaschrank belassen.

Am nächsten Tag in der Früh werden die Thermologger und Klimaschrank überprüft, um sicherzustellen, ob die Temperatur von -40°C erreicht wurde. Falls ja, wird die Temperatur im Klimaschrank auf 20°C gedreht, um die Proben aufzutauen.

Nach dem Auftauen der Proben können die Temperaturfühler äußerst vorsichtig entfernt werden.

Anschließend können die Messergebnisse von den Thermloggern ausgelesen, gespeichert und analysiert/ausgewertet werden. Die Messergebnisse werden in Form von Temperaturverläufen über die Zeit grafisch dargestellt.

Basierend auf den Temperaturverläufen ist es möglich, den Gefrierpunkt zu ermitteln. Der Gefrierpunkt ist erreicht, wenn die Kurve sich fast horizontal verläuft und ein kleines Halteplateau aufweist (siehe Abbildung 31(links)).

Das Phänomen, bei dem die Temperatur einer Flüssigkeit unter ihren Gefrierpunkt fällt, ohne zu gefrieren, wird als "Super Cooling" bezeichnet, und der Gefrierpunkt liegt nach diesem Punkt (siehe Abbildung 31 (rechts)).

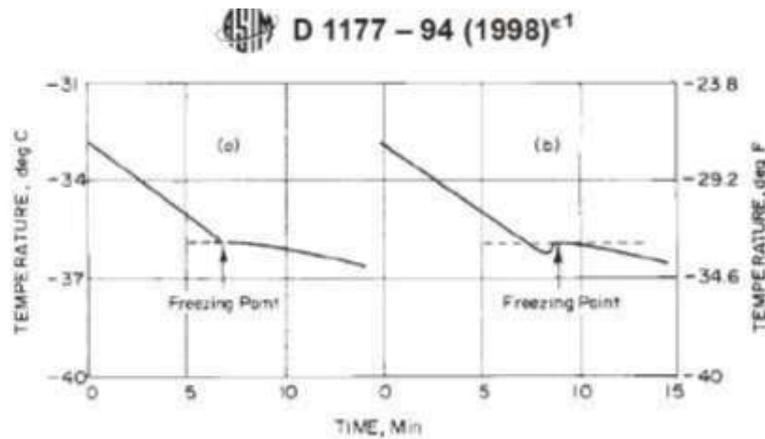


Abbildung 31. Grafische Ermittlung des Gefrierpunktes [10]

Anhand der Gefrierpunkte verschiedener Taumittelkonzentrationen kann der Gefrierverlauf in Form einer Gefrierkurve dargestellt werden. Diese Darstellung ermöglicht es, auf einen Blick zu erkennen, welche Taumittelkonzentration bei welcher Temperatur am sinnvollsten ist (siehe dazu Ergebnisse im folgenden Kapitel).

4.2 Ergebnisse

Jedenfalls anzumerken ist, dass bei höheren Konzentrationen der Taumittel mehr Unreinheiten auftreten, die sich in der Mischung nicht auflösen. Besonders ausgeprägt waren diese Unreinheiten bei Taumittel E (als Beispiel siehe Abbildung 32).



Abbildung 32. Unreinheit de Taumittel E (bei 5% Taumittelanteil)

Bei den Ergebnissen der Gefrierpunktbestimmung wurde festgestellt, dass die Taumittel zwei Halteplateaus aufweisen (siehe folgendes Abbild).

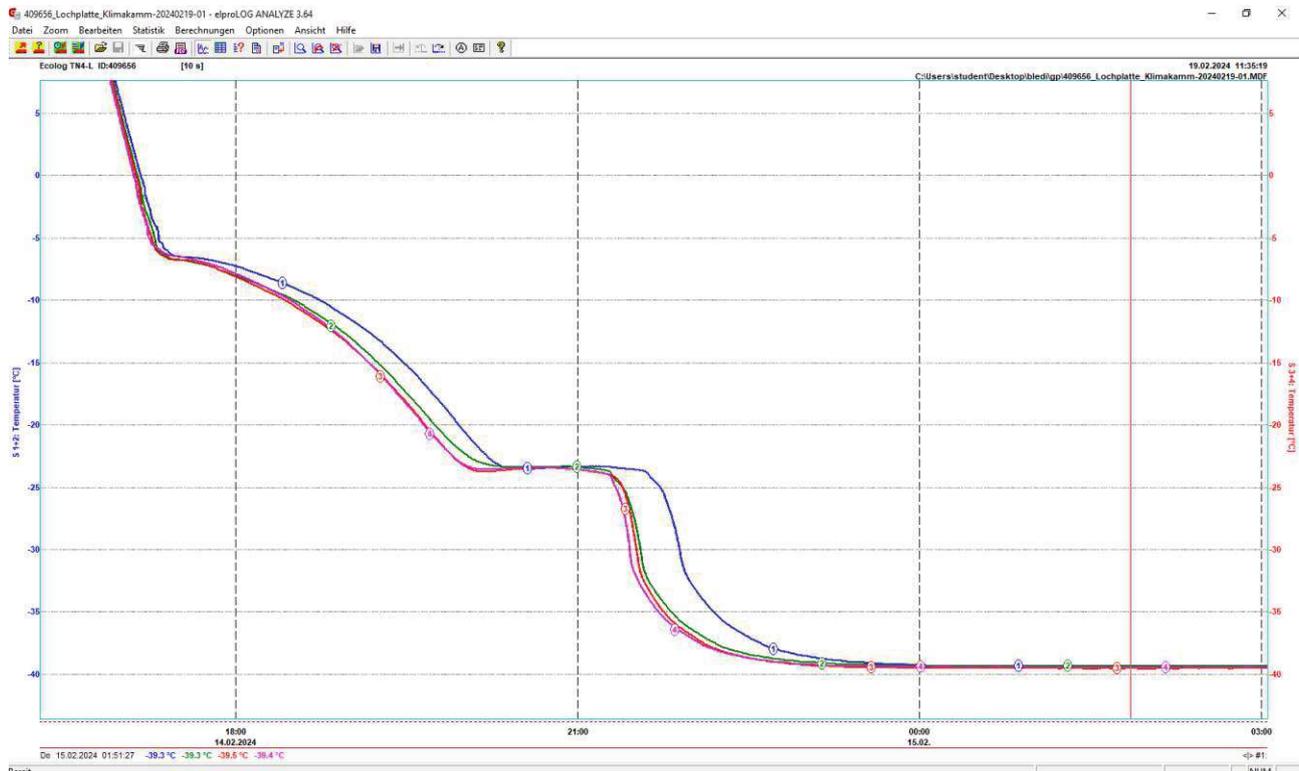


Abbildung 33. Aufscheinen 2 Halteplateaus auf dem Gefrierversuch

Bei einer gründlichen Analyse durch weitere Tests wurde jedoch festgestellt, dass die Proben im ersten Plateau lediglich teilweise gefroren waren, was auf eine unvollständige Kristallisation hinweist. Im Gegensatz dazu erstarrten die Proben im zweiten Plateau vollständig, was darauf hindeutet, dass dort die Bedingungen für eine vollständige und stabile Gefrierung gegeben waren.

Diese unterschiedlichen Gefrierzustände werfen wichtige Fragen hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften der verwendeten Taumittel sowie der Einflussfaktoren auf den Gefrierprozess auf und erfordern eine umfassendere Untersuchung, um die zugrunde liegenden Ursachen für dieses Verhalten besser zu verstehen. (siehe folgende Abbildungen).

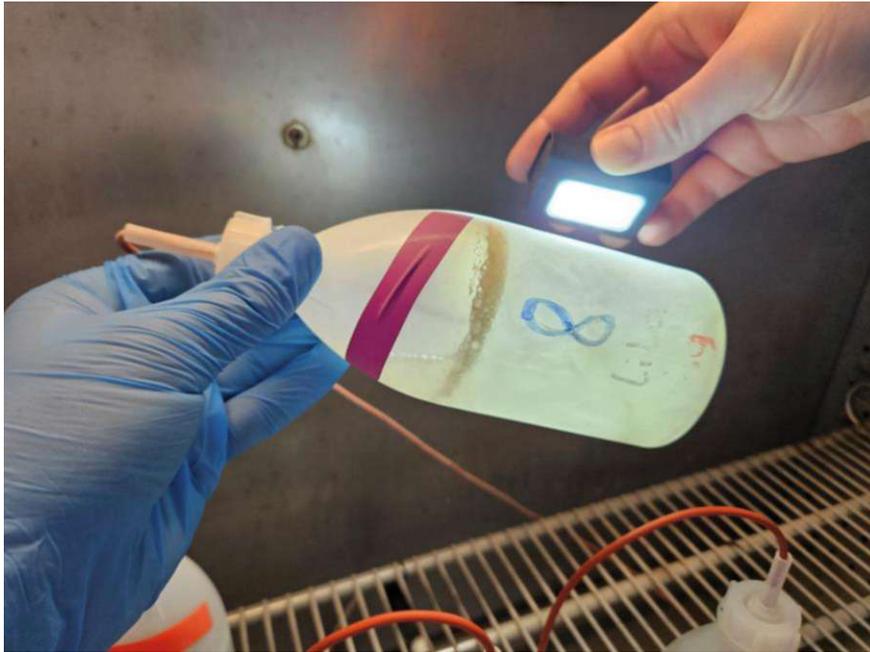


Abbildung 34. Foto nach 1. Plateau, Lösung nicht vollständig gefroren.



Abbildung 35. Foto nach 2. Plateau, Lösung vollständig gefroren

Da uns keine spezifischen Informationen über die chemische Zusammensetzung der Taumittel vorliegen, basiert die Vermutung, dass die beobachteten zwei Plateaus durch die verschiedenen Inhaltsstoffe der Taumittel bedingt sind. Es wird angenommen, dass die erste Wirkung aus einem bestimmten Inhaltsstoff resultiert, der sich zu Beginn des Gefrierprozesses bemerkbar macht, während die zweite, abschließende Wirkung möglicherweise auf einen anderen Inhaltsstoff zurückzuführen ist, der zu einem späteren Zeitpunkt im Prozess aktiv wird.

Obwohl die Untersuchung einer 30%igen Taumittellösung für Taumittel A, B und C aus wirtschaftlicher und praktischer Sicht nicht sinnvoll war, wurde sie dennoch durchgeführt. Es ist

wichtig zu beachten, dass nicht alle Taumittel im Wasser vollständig gelöst wurden. Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse, dass bei den 30%-Versuchen lediglich ein Plateau auftrat.

In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der beiden Plateaus in Diagrammen dargestellt, in denen die Gefrierkurve durch eine polynomiale Linie dargestellt wird.

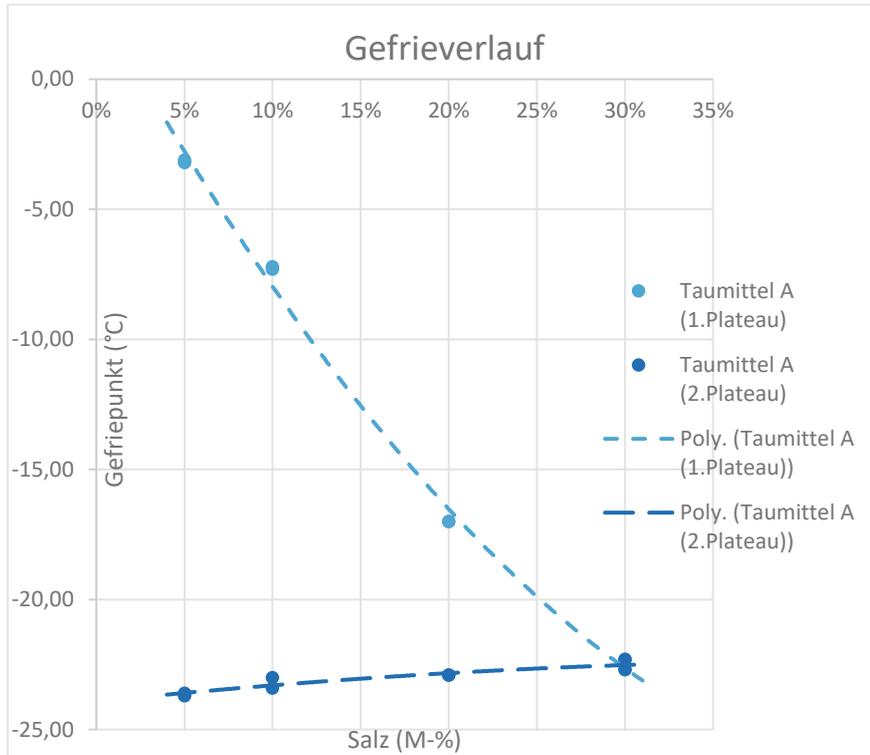


Abbildung 36. Gefrierkurve Taumittel A

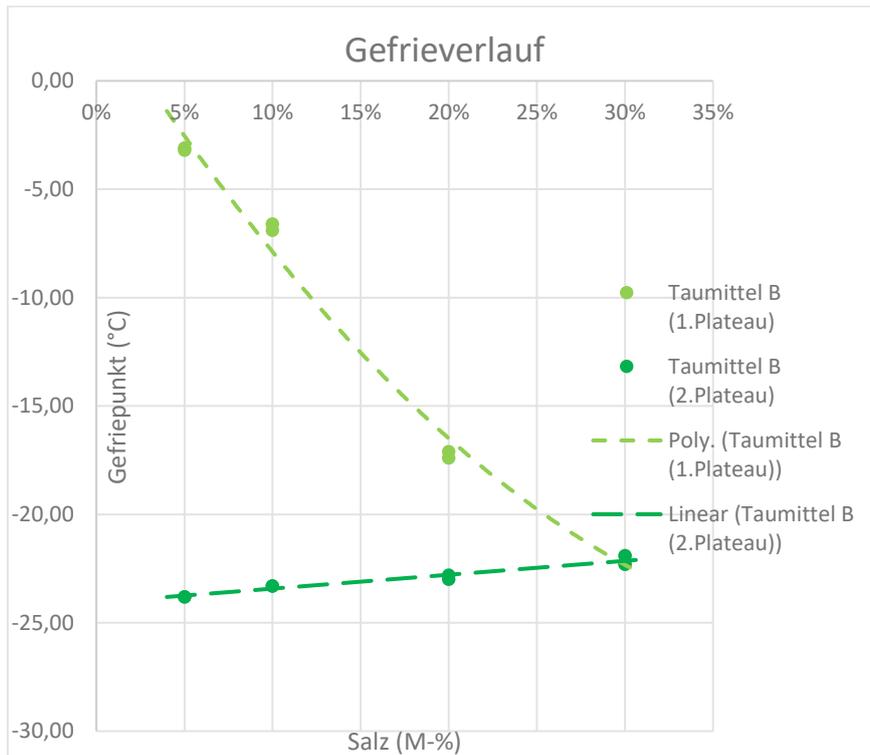


Abbildung 37. Gefrierkurve Taumittel B

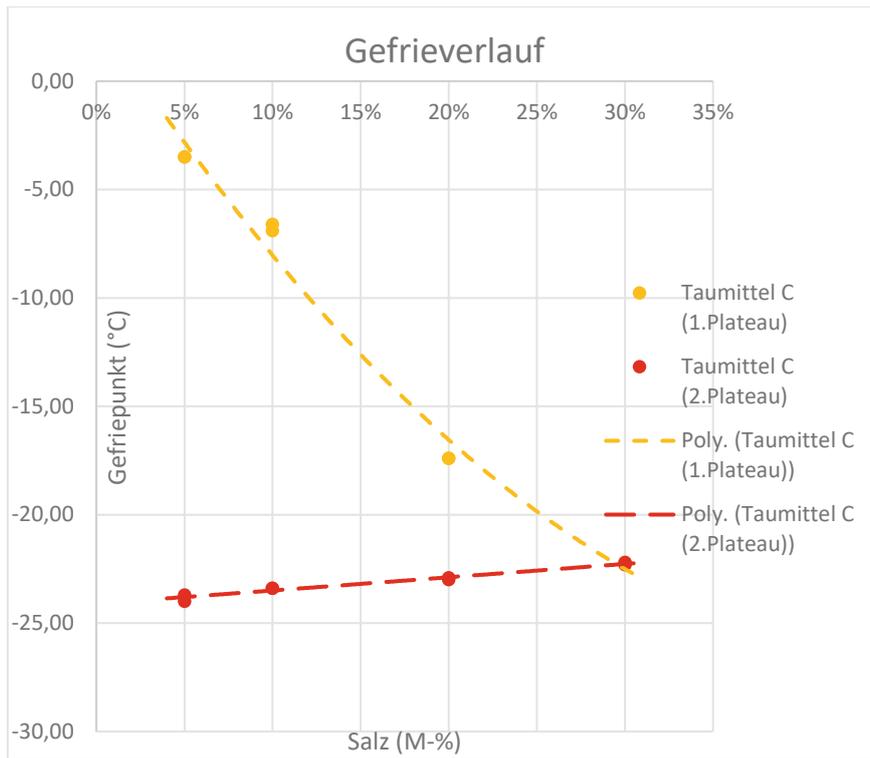


Abbildung 38. Gefrierkurve Taumittel C

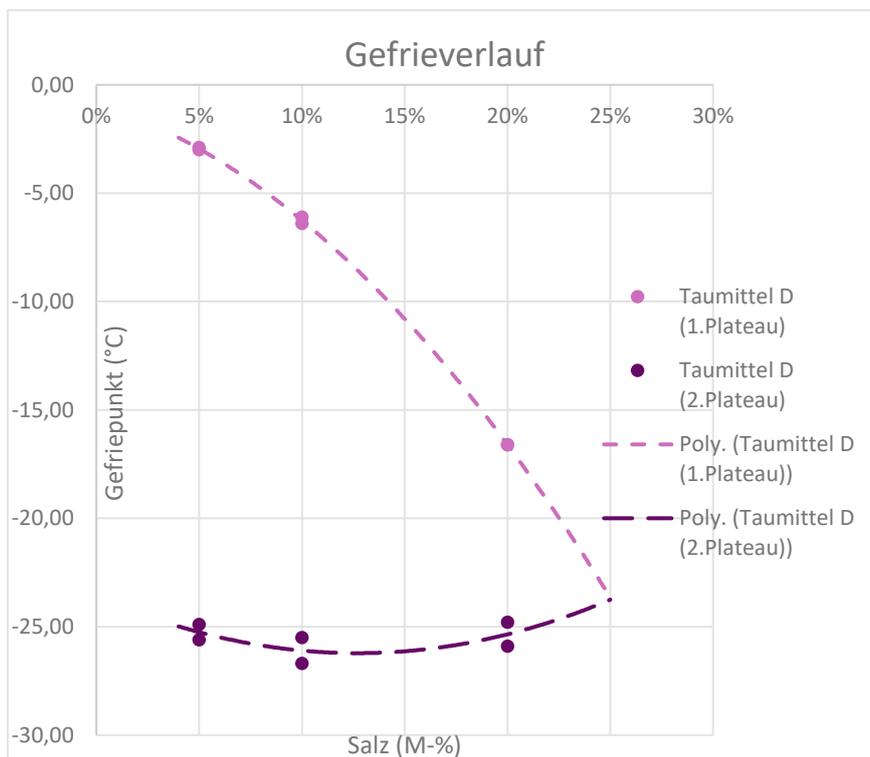


Abbildung 39. Gefrierkurve Taumittel D

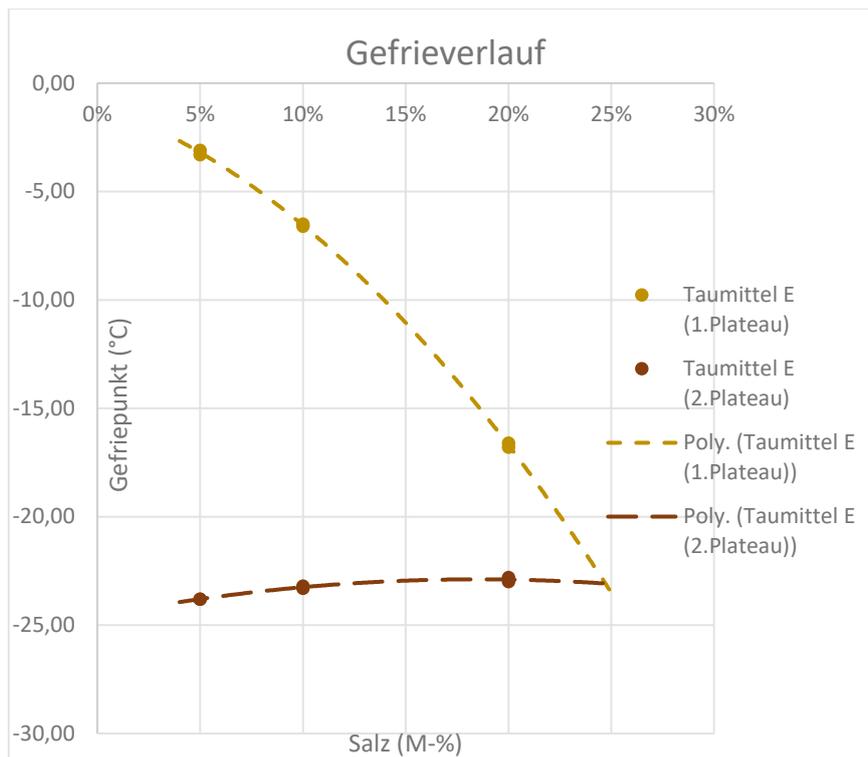


Abbildung 40. Gefrierkurve Taumittel E

Es ist wichtig zu erwähnen, dass das erste Plateau eine auffällige Ähnlichkeit mit der Gefrierkurve von NaCl aufweist, was darauf hindeutet, dass ähnliche physikalische Prozesse oder Eigenschaften vorliegen könnten. Allerdings zeigte die umfassende Untersuchung, dass das zweite Plateau tatsächlich den echten Gefrierpunkt der Taumittel repräsentiert.

Es ist auch bemerkenswert, dass das zweite Plateau, obwohl verschiedene Konzentrationen der Taumittel verwendet wurden, nahezu bei der gleichen Temperatur verharrt.

5 Lagerfähigkeit und Streuung

In diesem Kapitel werden eingehend die Themen Feuchtigkeit, Lagerfeuchte, Korngrößenverteilung und Rieselfähigkeit behandelt. Zunächst wird die Bedeutung der Feuchtigkeit im Kontext der Taumittel erläutert, gefolgt von einer detaillierten Analyse der Lagerfeuchte, die für die Lagerung und Handhabung der Taumittel von wesentlicher Bedeutung ist. Anschließend wird die Korngrößenverteilung untersucht, um die physikalischen Eigenschaften der Taumittel besser zu verstehen. Abschließend wird die Rieselfähigkeit betrachtet, um deren Einfluss auf die Anwendungseffizienz des Taumittels zu bewerten. Diese Aspekte sind entscheidend, um die Gesamtleistung und die Eignung der Taumittel unter verschiedenen Bedingungen umfassend zu analysieren.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts werden die relevanten Themen kurz angeführt, die angewandten Versuchsmethoden detailliert erläutert und schließlich die Ergebnisse übersichtlich dargestellt.

5.1 Feuchtigkeitsgehalt

Feuchtigkeit bezeichnet die Menge an Wasser oder Wasserdampf, die in einem Material enthalten ist. Die Feuchtigkeit spielt eine entscheidende Rolle bei der Anwendung von Taumitteln, da sie nicht nur die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Taumittels beeinflusst, sondern auch erhebliche Auswirkungen auf Aspekte wie Lagerung, Transport und Streuung hat. Eine zu hohe Feuchtigkeit kann beispielsweise die Rieselfähigkeit des Taumittels beeinträchtigen, was zu Schwierigkeiten bei der gleichmäßigen Verteilung führt. Darüber hinaus kann die Lagerung unter feuchten Bedingungen die Effektivität des Taumittels verringern, da sich Klumpen bilden können, die eine homogene Anwendung verhindern. Auch während des Transports ist die Kontrolle der Feuchtigkeit wichtig, um sicherzustellen, dass das Taumittel seine gewünschten Eigenschaften beibehält und in der Lage ist, seine Funktion optimal zu erfüllen, wenn es auf den Straßen und Gehwegen eingesetzt wird. Daher ist es unerlässlich, die Feuchtigkeitsbedingungen zu überwachen und zu steuern, um die Leistung von Taumitteln bestmöglich zu gewährleisten.

5.1.1 Versuchsmethode

Für den Versuchsaufbau wird benötigt [11]:

- Trockenschrank
- Angemessene Gefäße (nicht schmelzbar, und genügend Volumen)
- Hilfsmittel

Testversuch:

Das Gefäß (aus Glas oder Metall) wird auf die Waage gestellt (Gewicht wird notiert) und tariert. Eine gewünschte Menge an Taumittel wird auf das Gefäß gegeben und als Masse vorher (M1) notiert (siehe Abbildung 41).

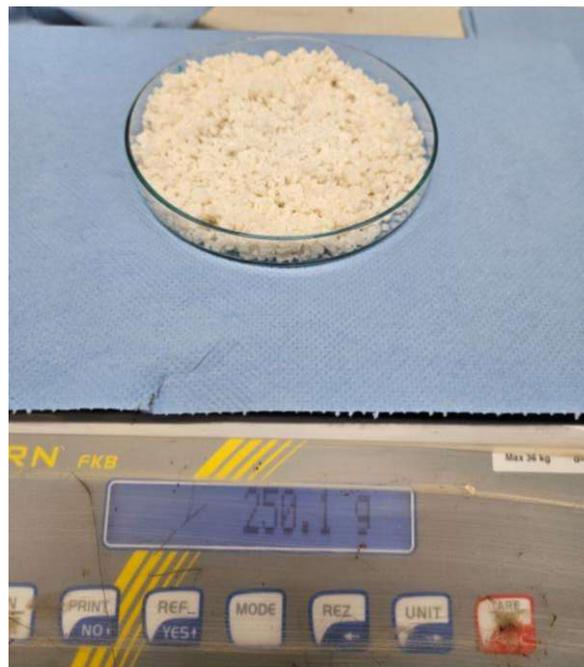


Abbildung 41. Taumittel vor Trocknen Abwiegen

Die Gefäße werden mit ausreichend Abstand zueinander in die Trockenschrank platziert und über Nacht bei einer Temperatur von 110°C belassen, um sie zu trocknen. (siehe Abbildung 42).

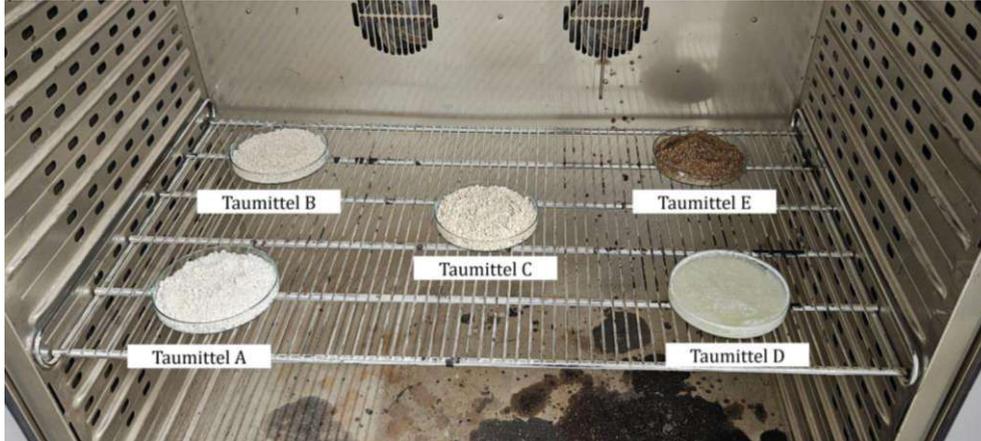


Abbildung 42. Proben im Trockenschrank

Nach der Trocknung werden die Proben zur Abkühlung stehen gelassen, bevor die getrockneten Massen (M_0) abgewogen werden.

Die Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts erfolgt anhand dieser Formel:

$$\text{Feuchtigkeitsgehalt [\%]} = \frac{M_{\text{Feucht}} [\text{g}] - M_{\text{Trocken}} [\text{g}]}{M_{\text{Trocken}} [\text{g}]} 100 \dots (2)$$

5.1.2 Ergebnisse

Für die Durchführung der verschiedenen Versuche war es notwendig, getrocknete Taumittel zu verwenden. Im Zuge desselben Trocknungsprozesses der Taumittel wurde ebenfalls die Feuchtigkeit der Proben ermittelt.

Taumittel A wies im Durchschnitt einen Feuchtigkeitsgehalt von 2,78% auf, mit einer Standardabweichung von 0,05% (nähere Angaben siehe Tabelle 5).

Tabelle 5. Feuchtigkeitsgehalt Taumittel A

Datum vor Trocknung	Datum nach Trocknung	Masse(g) feucht	Masse(g) getrocknet	Feuchtigkeit[M%]	Mittelwert (Feuchte)	Stand. Abw.[%]
29.01.2024	30.01.2024	124,60	121,30	2,72%	2,78%	0,05%
29.01.2024	30.01.2024	125,80	122,40	2,78%		
07.02.2024	08.02.2024	15.098,60	14.683,50	2,83%		

Taumittel B wies im Durchschnitt einen Feuchtigkeitsgehalt von 2,88% auf, mit einer Standardabweichung von 0,06% (nähere Angaben siehe Tabelle 6).

Tabelle 6. Feuchtigkeitsgehalt Taumittel B

Datum vor Trocknung	Datum nach Trocknung	Masse(g) feucht	Masse(g) getrocknet	Feuchtigkeit[M%]	Mittelwert (Feuchte)	Stand. Abw.[%]
29.01.2024	30.01.2024	112,30	109,10	2,93%	2,88%	0,06%
29.01.2024	30.01.2024	113,80	110,60	2,89%		
07.02.2024	08.02.2024	212,30	206,50	2,81%		

Taumittel C wies im Durchschnitt einen Feuchtigkeitsgehalt von 3,56% auf, mit einer Standardabweichung von 0,08% (nähere Angaben siehe Tabelle 7).

Tabelle 7. Feuchtigkeitsgehalt Taumittel C

Datum vor Trocknung	Datum nach Trocknung	Masse(g) feucht	Masse(g) getrocknet	Feuchtigkeit[M%]	Mittelwert (Feuchte)	Stand. Abw.[%]
29.01.2024	30.01.2024	110,60	106,70	3,66%	3,56%	0,08%
29.01.2024	30.01.2024	112,50	108,70	3,50%		
07.02.2024	08.02.2024	208,20	201,10	3,53%		

Taumittel D wies im Durchschnitt einen Feuchtigkeitsgehalt von 4,24% auf, mit einer Standardabweichung von 0,62%. Dies weist darauf hin, dass Taumittel D eine Schwankung im Feuchtigkeitsgehalt aufweist und somit eine instabile Zusammensetzung besitzt. (nähere Angaben siehe Tabelle 8).

Tabelle 8. Feuchtigkeitsgehalt Taumittel D

Datum vor Trocknung	Datum nach Trocknung	Masse(g) feucht	Masse(g) getrocknet	Feuchtigkeit[M%]	Mittelwert (Feuchte)	Stand. Abw.[%]
29.01.2024	30.01.2024	106,20	102,10	4,02%	4,24%	0,62%
29.01.2024	30.01.2024	107,60	103,70	3,76%		
07.02.2024	08.02.2024	238,10	226,90	4,94%		

Taumittel C wies im Durchschnitt einen Feuchtigkeitsgehalt von 2,33% auf, mit einer Standardabweichung von 0,20% (nähere Angaben siehe Tabelle 9).

Tabelle 9. Feuchtigkeitsgehalt Taumittel E

Datum vor Trocknung	Datum nach Trocknung	Masse(g) feucht	Masse(g) getrocknet	Feuchtigkeit[M%]	Mittelwert (Feuchte)	Stand. Abw.[%]
29.01.2024	30.01.2024	111,60	109,10	2,29%	2,33%	0,20%
29.01.2024	30.01.2024	113,30	110,90	2,16%		
07.02.2024	08.02.2024	213,30	208,00	2,55%		

Nach der Trocknung wurde festgestellt, dass die Körner der Taumittel eine Tendenz zum Zusammenbacken (Verkleben) aufweisen und sich zu Klumpen geformt haben. Diese Klumpenbildung kann die Handhabung und Anwendung der Taumittel erheblich beeinträchtigen, da sie die Rieselfähigkeit verringern und eine gleichmäßige Verteilung auf den behandelten Flächen erschweren kann. Solche Veränderungen in der Textur und Konsistenz der Taumittel sind für die anschließende Nutzung von Bedeutung, da sie möglicherweise die Effektivität der Taumittel bei der Schmelze von Schnee und Eis negativ beeinflussen könnten.

Die geringste Klumpenbildung wurde bei Taumittel D festgestellt, gefolgt von Taumittel A. Daraufhin folgt Taumittel B und C, während Taumittel E die stärkste Klumpenbildung aufwies. Für eine verbesserte Veranschaulichung siehe Abbildung 43.

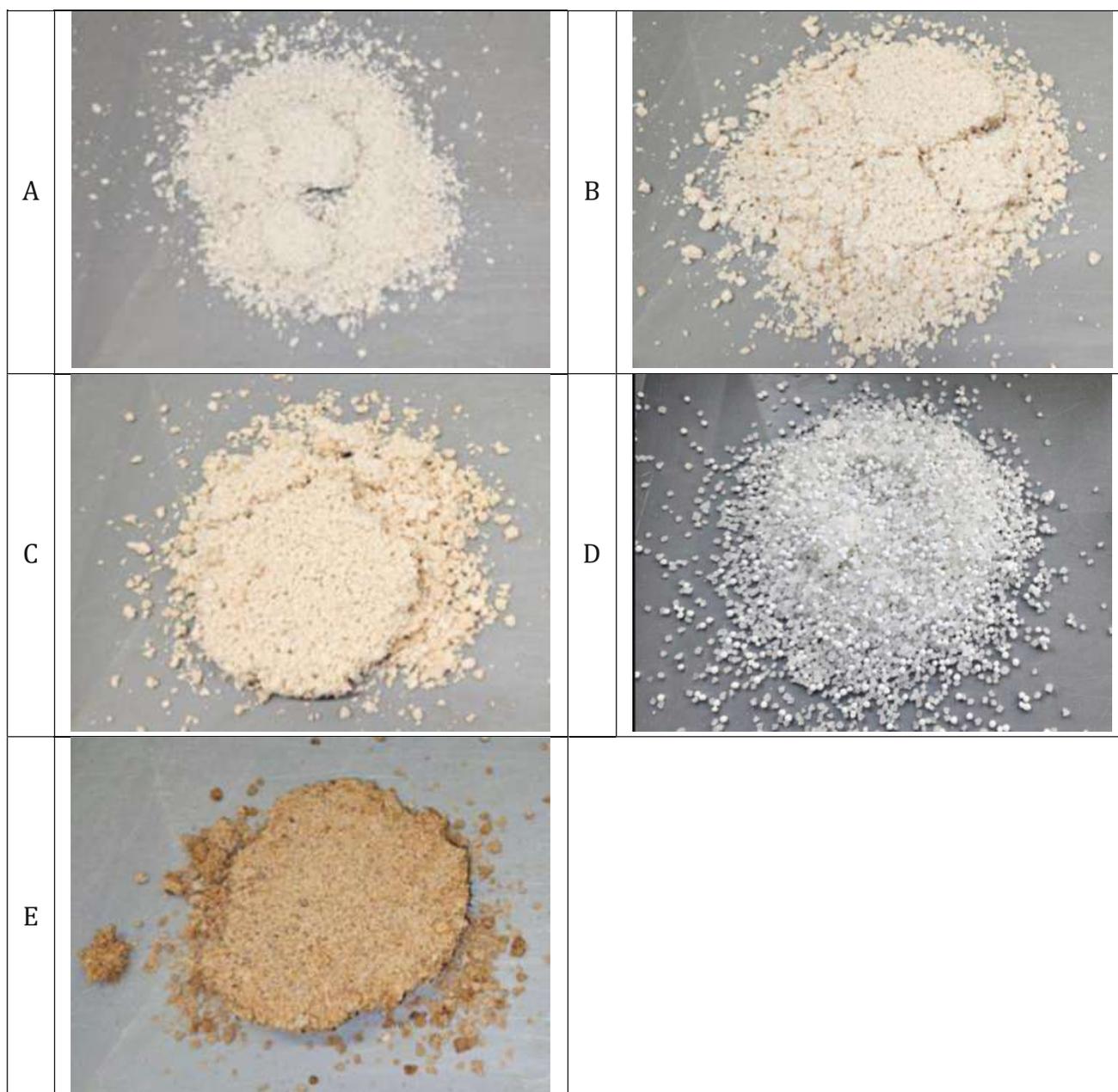


Abbildung 43. Klumpenbildung der Taumitteln nach Trocknung

5.2 Lagerfeuchtigkeit

Die Lagerung von Taumitteln unter feuchten Bedingungen kann die Effektivität des jeweiligen Produkts erheblich verringern, da sich in solchen Umgebungen Klumpen bilden können. Diese Klumpenbildung führt dazu, dass das Taumittel an Fließ- und Rieselfähigkeit verliert, was wiederum eine gleichmäßige und homogene Anwendung auf den behandelten Flächen erheblich erschwert.

In der Praxis bedeutet dies, dass bei der Lagerung in Silos oder Boxen die Entnahme erschwert bzw. verunmöglicht wird sowie beim Streuen des Taumittels ungleichmäßige Verteilungen entstehen können.

Letzteres kann die Schmelzeffizienz verringert und letztlich die Sicherheit auf Straßen und Gehwegen gefährden. Zudem können klumpige Taumittel dazu führen, dass die Dosierung ungenau wird, da es schwieriger wird, die Menge an Taumittel präzise zu messen und zu verteilen. Daher ist es von großer Bedeutung, die Lagerbedingungen sorgfältig zu kontrollieren, um sicherzustellen, dass die Taumittel in einem optimalen Zustand verbleiben und ihre volle Wirksamkeit entfalten können, wenn sie benötigt werden.

5.2.1 Versuchsmethode

Zur Bestimmung der Lagerfeuchte wurden ähnlich wie bei der Feuchtigkeitsbestimmung die Massen (M1) der Taumittelproben gewogen und notiert. Die Proben wurden für eine zehnwöchigen Lagerung im Büro, wo einer Temperatur von ca. $22\pm 2^\circ\text{C}$ und mittlerer Luftfeuchtigkeit herrscht, aufbewahrt (siehe Abbildung 44).



Abbildung 44. Zehnwöchige Lagerung der Taumittel im Büro

Nach 10 Wochen wird der Versuch der Feuchtigkeitsermittlung beendet. Erstens werden die Proben abgewogen, die Massen (M2) nach Lagerung bestimmt, dann im Trockenschrank über Nacht zum Trocknen gelassen.

Die Annahme oder Abnahme des Feuchtigkeitsgehaltes während der Lagerung erfolgt anhand dieser Formel:

$$\text{Feuchtigkeitsgehalt [\%]} = \frac{M_{\text{feucht}} [\text{g}] - M_{\text{vor Lagerung}} [\text{g}]}{M_{\text{trocken}} [\text{g}]} 100 \dots (3)$$

Ein positive Wert deutet darauf hin, dass das Taumittel Feuchtigkeit verloren hat, und eine negative bedeutet, dass das Taumittel Feuchtigkeit aufgenommen hat.

Nach der Trocknung über Nacht (bei einer Temperatur von 110°C) wird die getrocknete Masse (M_0) abgewogen, und somit kann die Feuchtigkeitsgehalt Während der Lagerung (siehe Formel 3), vor Lagerung (siehe Formel 2), und nach Lagerung anhand folgender Formel:

$$\text{Feuchtigkeitsgehalt [\%]} = \frac{M_{\text{vor Lagerung}} [\text{g}] - M_{\text{trocken}} [\text{g}]}{M_{\text{trocken}} [\text{g}]} 100 \dots (4)$$

5.2.2 Ergebnisse

Ein Großteil der Taumittel zeigte nach 10 Wochen Lagerung einen signifikanten Rückgang der Feuchtigkeit auf, was auf die Auswirkungen der Lagerbedingungen (Temperatur von ca. 22±2°C und 20 bis 30 % Luftfeuchtigkeit) auf die physikalischen Eigenschaften der Taumittel hinweist. Eine bemerkenswerte Ausnahme bildete jedoch Taumittel D, dessen Feuchtigkeitsgehalt um über 30% angestiegen ist. Dieses unerwartete Ergebnis könnte darauf hindeuten, dass bei Taumittel D eine andere dynamische Wechselwirkung zwischen den Komponenten während der Lagerung stattgefunden hat (siehe Tabelle 10).

Die Abnahme der Feuchtigkeit bei den Taumitteln A, B, C und E nach zehnwöchiger Lagerung weist darauf hin, dass diese Taumittel eine hervorragende Einsatzfähigkeit und Handhabung aufweisen. Dieser Verlust an Feuchtigkeit ist ein Indikator dafür, dass die Taumittel gut für die Lagerung geeignet sind und ihre Leistung über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten können. Solche Eigenschaften sind entscheidend für die praktische Anwendung, da sie sicherstellen, dass die Taumittel bei Bedarf effizient eingesetzt werden können, ohne dass negative Auswirkungen auf ihre Funktionalität und Wirksamkeit auftreten.

Im Gegensatz zu den anderen Taumitteln zeigte Taumittel D während der Lagerung eine signifikante Zunahme der Feuchtigkeit, was auf eine potenziell eingeschränkte Einsatzfähigkeit und Handhabung hinweist. Diese unerwartete Entwicklung könnte darauf hindeuten, dass Taumittel D in bestimmten Lagerbedingungen weniger stabil ist als die anderen Taumittel und Anfälligkeiten aufweist, die seine Effektivität bei der Anwendung beeinträchtigen könnten.

Tabelle 10. Feuchtigkeitsverlust/-zunahme nach zehnwöchiger Lagerung und nach Trocknung

Art des Salzes	Masse (g) vor Lagerung	Masse (g) nach Lagerung	Masse (g) getrocknet	Änderung der Feuchtigkeit [M%] nach Lagerung	Änderung der Feuchtigkeit [M%] nach Trocknung
Taumittel A	250,20	244,10	243,67	2,50%	0,18%
Taumittel B	250,40	243,18	242,74	2,97%	0,18%
Taumittel C	250,10	242,19	241,70	3,27%	0,20%
Taumittel D	250,20	355,56	293,04	-35,95%	21,33%
Taumittel E	250,20	245,19	244,35	2,05%	0,34%

Nach der Trocknung zeigten die Taumittel A, B, C und E einen geringeren Rückgang der Feuchtigkeit, da sie nach einer zehnwöchigen Lagerung signifikant an Feuchtigkeit verloren hatten. Im Gegensatz dazu erlitt Taumittel D einen drastischen Feuchtigkeitsverlust, da es nach zehnwöchiger Lagerung tatsächlich an Feuchtigkeit zugenommen hat (siehe dazu Tabelle 10).

In diesem Versuch wurde festgestellt, dass Taumittel D erheblich an Feuchtigkeit zugenommen hat (siehe Abbildungen 4, 47 und 48, vergleich der Taumittel D vor und nach Lagerung), was sich auch auf die erzielten Ergebnisse ausgewirkt hat - siehe die in Tabelle 10 grün markierten Werte.

Zudem konnte der Feuchtigkeitsgehalt nach der Trocknung nicht auf 0,00% gesenkt werden, weil sich während des Trocknungsprozesses eine Schicht an der Oberfläche bildete (siehe Abbildung 45 und 46), die eine vollständige Trocknung des darunter liegenden Inhaltes verhinderte.



Abbildung 45. Taumittel D - Bildung der Oberflächenschicht während der Trocknungsprozesses

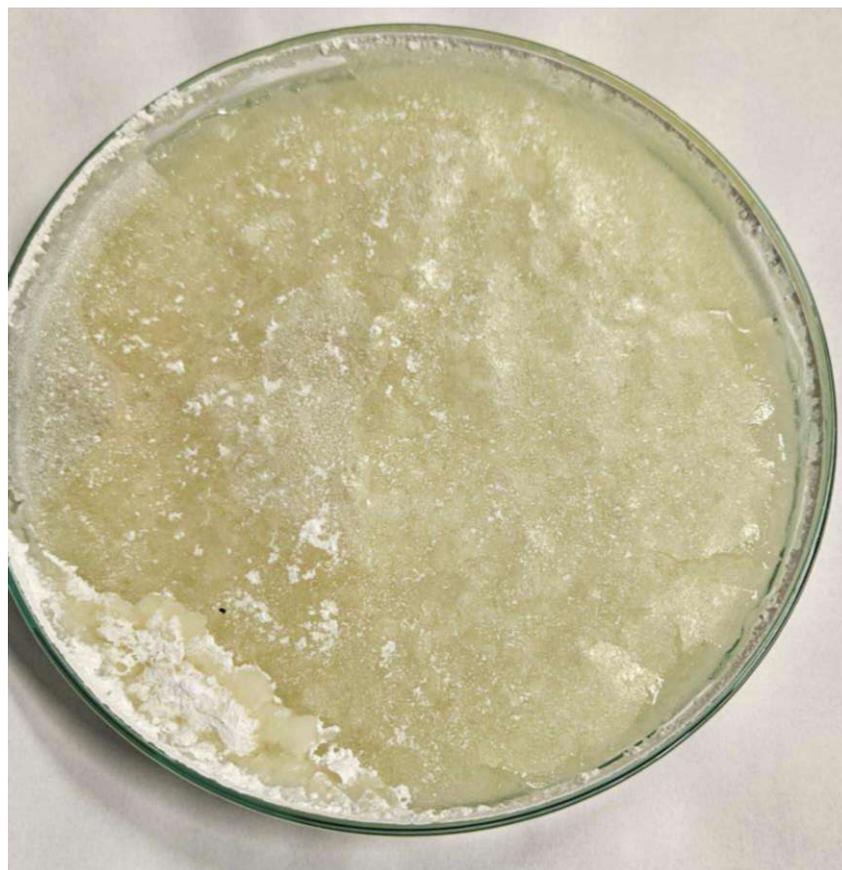


Abbildung 46. Taumittel D - Bildung der Oberflächenschicht während der Trocknungsprozesses

In dieser Untersuchung wurde außerdem festgestellt, dass während des Trocknungsprozesses eine Klumpenbildung auftrat, die für die meisten Taumittel beobachtet werden konnte.

Eine bemerkenswerte Ausnahme stellte jedoch Taumittel D dar, das von der Klumpenbildung verschont blieb, jedoch stattdessen zu einer matschigen Mischung wurde. Dies trat auf, weil die Feuchtigkeit zunahm und der Inhalt nicht vollständig getrocknet wurde. Fotos zu diesen Beobachtungen sind in Abbildungen 4, 43, 45, 46, 47 und 48 zu sehen.

	Nach Lagerung	Entleerung nach Trocknung
Taumittel A		

Abbildung 47 Darstellung der Taumittel A

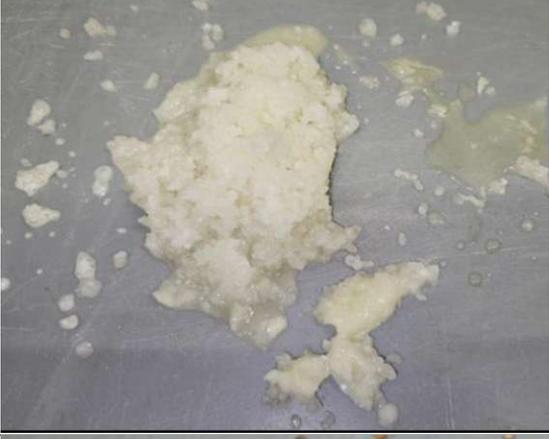
	Nach Lagerung	Entleerung nach Trocknung
Taumittel B		
Taumittel C		
Taumittel D		
Taumittel E		

Abbildung 48. Darstellung der Taumitteln

5.3 Korngrößenverteilung/Sieblinie

Die Korngrößenverteilung liefert wichtige Erkenntnisse über die physikalischen Eigenschaften des Taumittels sowie über dessen Handhabung und Anwendungsmöglichkeiten. Eine präzise Analyse dieser Verteilung ist von großer Bedeutung, da sie direkten Einfluss auf die Rieselfähigkeit des Taumittels hat und somit bestimmt, wie gleichmäßig es auf Oberflächen verteilt werden kann.

Darüber hinaus beeinflusst die Korngrößenverteilung auch die Wirksamkeit des Taumittels bei der Schmelze von Schnee und Eis, da unterschiedliche Teilchengrößen unterschiedlich schnell in Kontakt mit der Schneedecke treten und dort ihre Wirkung entfalten. Kleine Partikel könnten schneller reagieren und den Schmelzprozess beschleunigen, während größere Partikel möglicherweise langsamer wirken, aber eine bessere Haftung auf der Oberfläche ermöglichen.

Ein umfassendes Verständnis der Korngrößenverteilung ist daher entscheidend, um die Effektivität des Taumittels in praktischen Anwendungen zu maximieren und die gewünschten Ergebnisse zu erzielen.

5.3.1 Versuchsmethode

Die Korngrößenverteilung wurde durch Trockensiebung gemäß dem Prüfverfahren EN 1235 [12] bestimmt. Für Siebe mit einem Durchmesser von bis zu 20 mm sollten Probemengen von 100 g verwendet werden, während für größere Siebe Probemengen von 1 000 g empfohlen werden [12]. Für die Versuche wurden Siebe mit einem Durchmesser von bis zu 10 mm verwendet, weshalb Probemengen von 100 g verwendet wurden.

Für den Versuchsaufbau wird benötigt:

- Analysensiebe laut EN 933-2 [12] (0,125; 0,71; 1,00; 1,60; 2,00; 3,15; 5,00; 6,30 und 10,00 mm)
- Geeignete Auffangschalen und Deckel
- Trockenschrank
- Siebmaschine (Retsch AS 200)
- Hilfsmittel: Wage, Schalen, Bürstenpinsel etc.

Testversuch:

Im Siebturm werden die Siebe sorgfältig übereinandergestapelt. Beginnend mit der Auffangschale (unten), erfolgt die Anordnung der Siebe von der mit der niedrigsten Öffnungsweite zur größten Öffnungsweite.

Die Probemenge wird vor dem Sieben abgewogen und im Prüfprotokoll eingetragen, bevor sie in den Siebturm geschüttet wird.

Der Siebturm wird mittels Deckel verschlossen und mit Gewindeschrauben fixiert.

Die Siebung wird in der Regel 5 Minuten lang durchgeführt, wobei eine Amplitude von 30-40 verwendet wird, um eine effektive Trennung der Partikel zu gewährleisten (siehe Abbildung 49).



Abbildung 49. Ausführung der Siebung

Sobald das Sieben abgeschlossen ist, wird der Deckel entfernt und die Siebrückstände von jedem Sieb werden nacheinander gewogen und im Prüfprotokoll eingetragen, beginnend mit dem obersten Sieb. Es wird empfohlen, beim Leeren der Siebe die Borstenpinsel zu verwenden, um sicherzustellen, dass alle Rückstände gründlich aus dem Sieb entfernt werden und somit eine präzise sowie zuverlässige Analyse gewährleistet ist.

In der Regel wird die Siebung zweimal durchgeführt, und anschließend werden die Einzelergebnisse zur Bildung eines Mittelwerts herangezogen.

Die Auswertung erfolgt durch Berechnung der Masse des Rückstands auf jedem Sieb als Prozentsatz der ursprünglichen Trockenmasse. Es müssen die Durchgänge durch die Analysensiebe in der Sieblinie eingetragen werden. Es gilt, den Durchgang durch jedes Analysensieb als prozentuale Summe des Durchgangs bezogen auf die ursprüngliche Trockenmasse zu berechnen.

Die Klassifizierung der Korngrößenverteilung erfolgt laut der Norm EN 16811-1:2016 (siehe Abbildung 50)

Siebdurchgang in % Massenanteil:

Kornklasse EF (extrafeines Salz)	Kornklasse F (feines Salz)
0,125 mm ... (≤5)	0,125 mm ... (≤5)
0,8 mm ... (25 bis 100)	0,8 mm ... (10 bis 40)
2,0 mm ... (100*)	1,6 mm ... (30 bis 80)
	3,15 mm ... (90 bis 100)
	5,0 mm ... (100*)

Kornklasse F (feines Salz)	Kornklasse F (feines Salz)
0,125 mm ... (≤7)	0,8 mm ... (≤35)
0,8 mm ... (5 bis 35)	3,15 mm ... (30 bis 80)
1,6 mm ... (10 bis 60)	6,3 mm ... (75 bis 95)
3,15 mm ... (45 bis 90)	10 mm ... (100***)
6,3 mm ... (100**)	

* 2% Massenanteil herstellungsbedingte Toleranz mit Größtkorn ≤3mm
 ** 2% Massenanteil herstellungsbedingte Toleranz mit Größtkorn ≤8mm
 *** 2% Massenanteil herstellungsbedingte Toleranz mit Größtkorn ≤12mm

Abbildung 50. Salzklassen laut der Norm EN 16811-1, 2016

5.3.2 Ergebnisse

Alle durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass alle untersuchten Taumittel, mit Ausnahme des Taumittels D, der Kornklasse M (mittelgrobes Salz) zugeordnet werden können. Da Taumittel D weist eine sehr enggestufte Kornverteilung im Bereich von 2 bis 5mm auf. Diese Klassifizierung ist von Bedeutung für die zukünftige Anwendung und Abschätzung der Leistungsfähigkeit der Taumittel in verschiedenen Einsatzszenarien.

Zur besseren Veranschaulichung werden die Ergebnisse für jedes Taumittel in separaten Diagrammen dargestellt (siehe Abbildungen 51 bis 55).

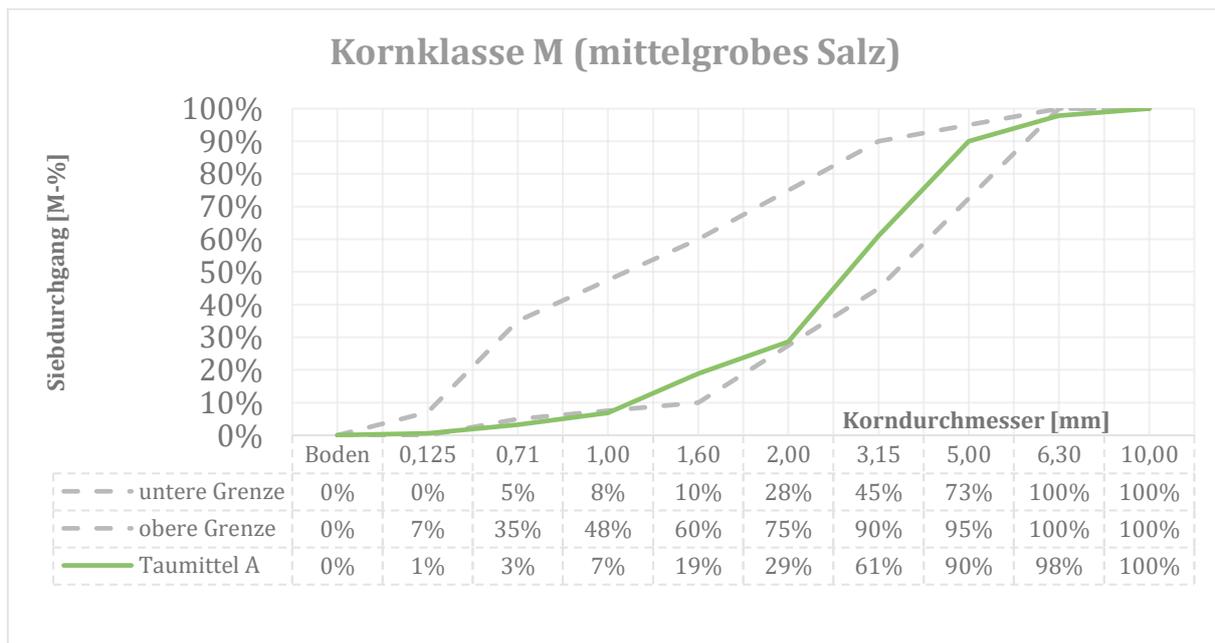


Abbildung 51. Sieblinie Taumittel A

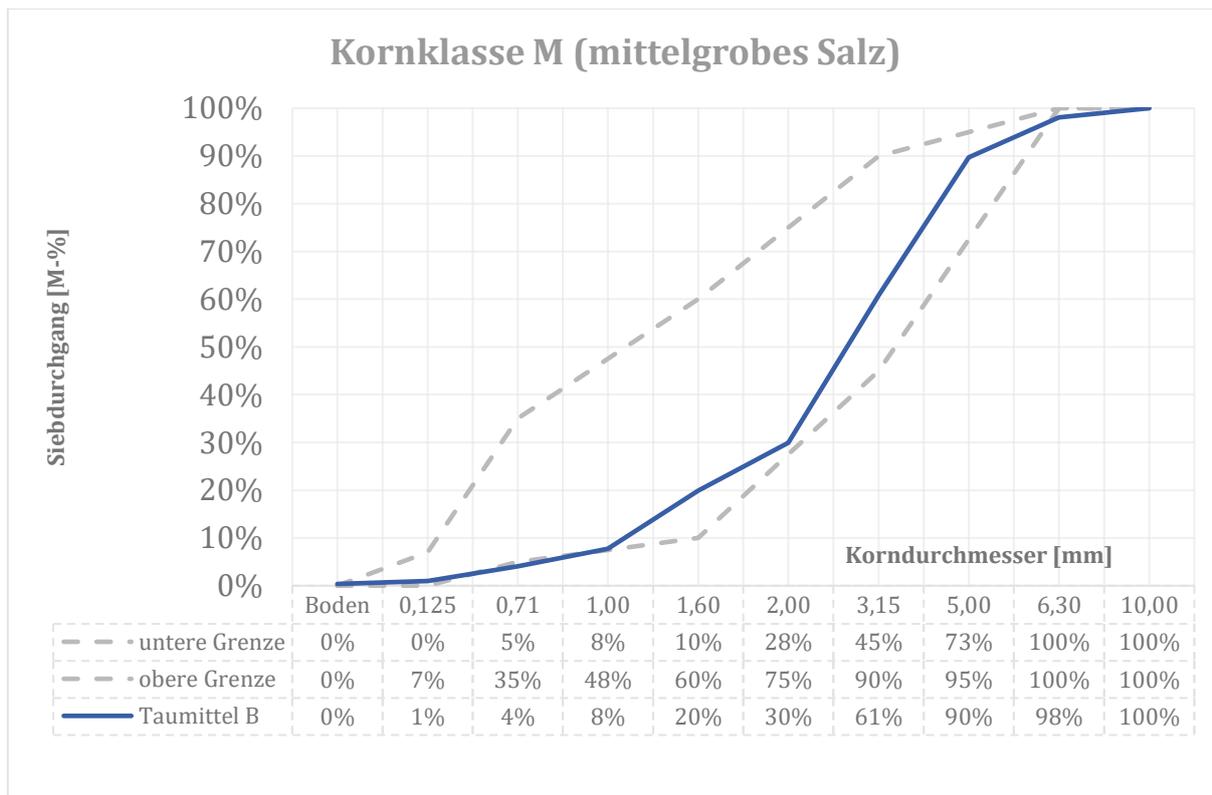


Abbildung 52. Sieblinie Taumittel B

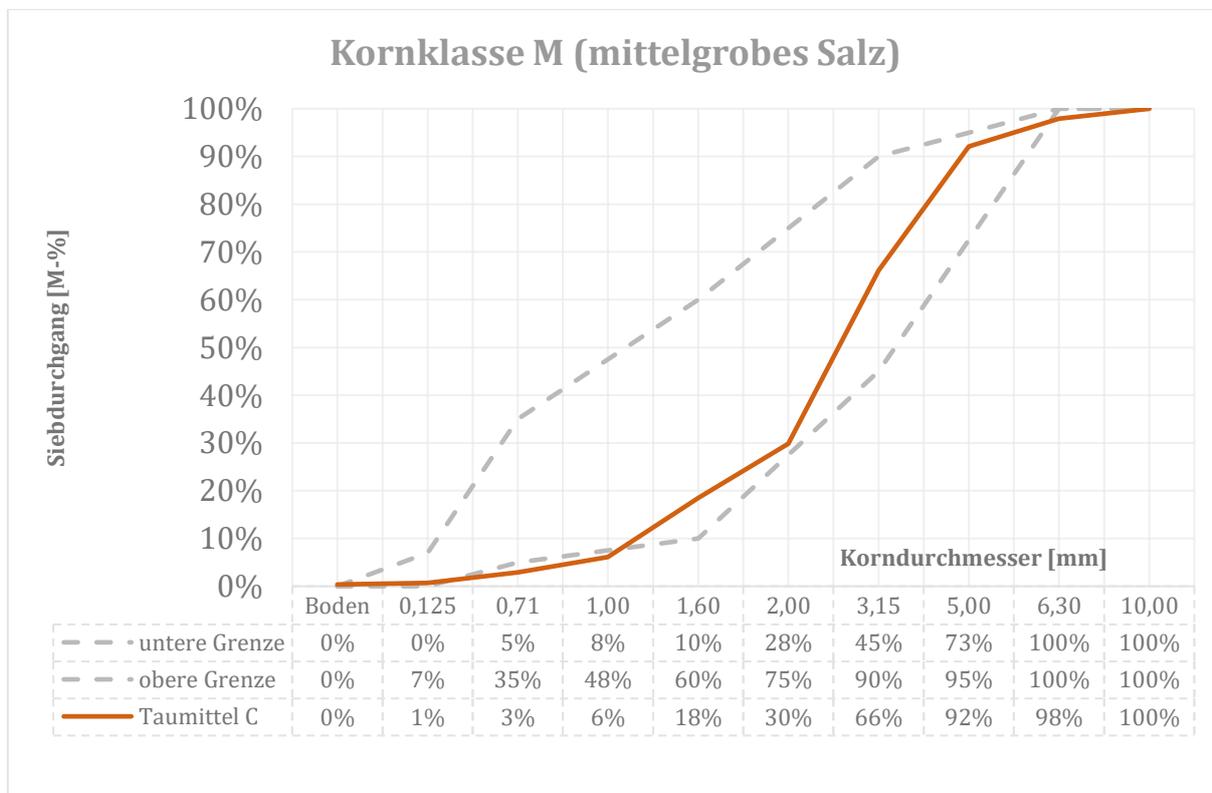


Abbildung 53. Sieblinie Taumittel C

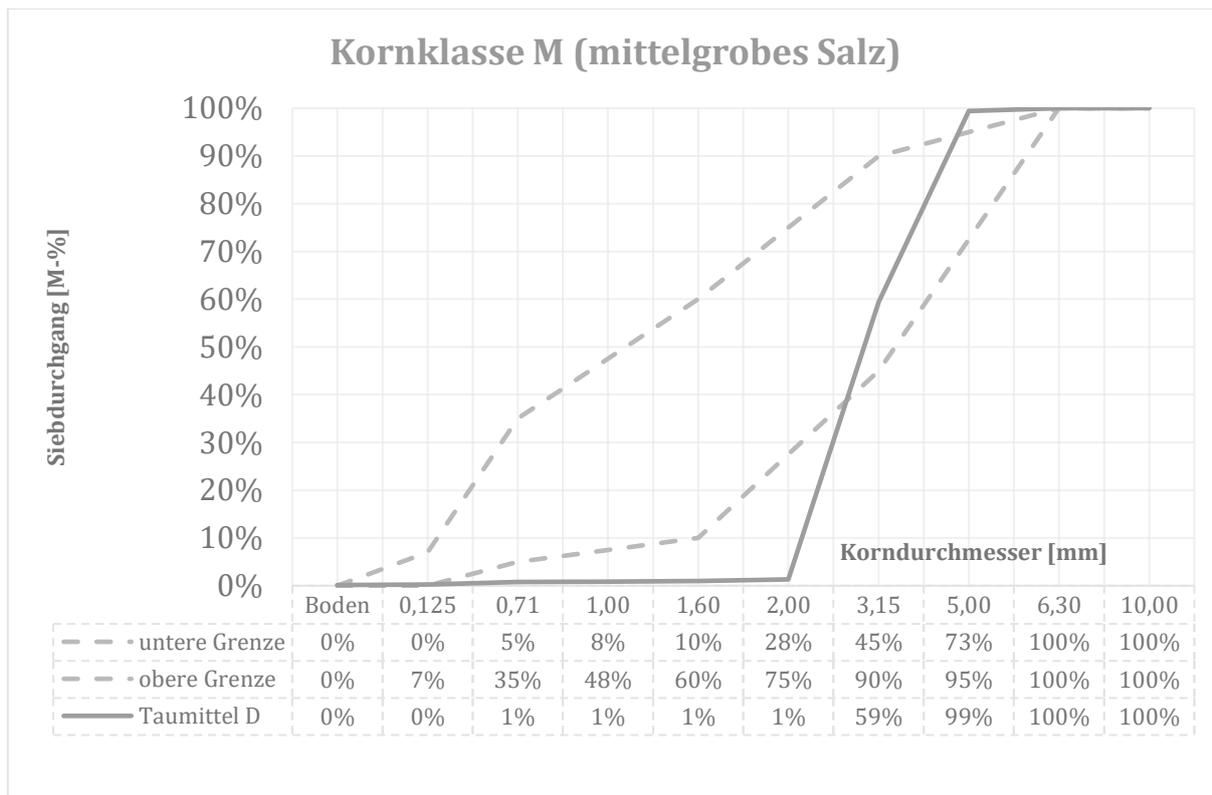


Abbildung 54. Sieblinie Taumittel D

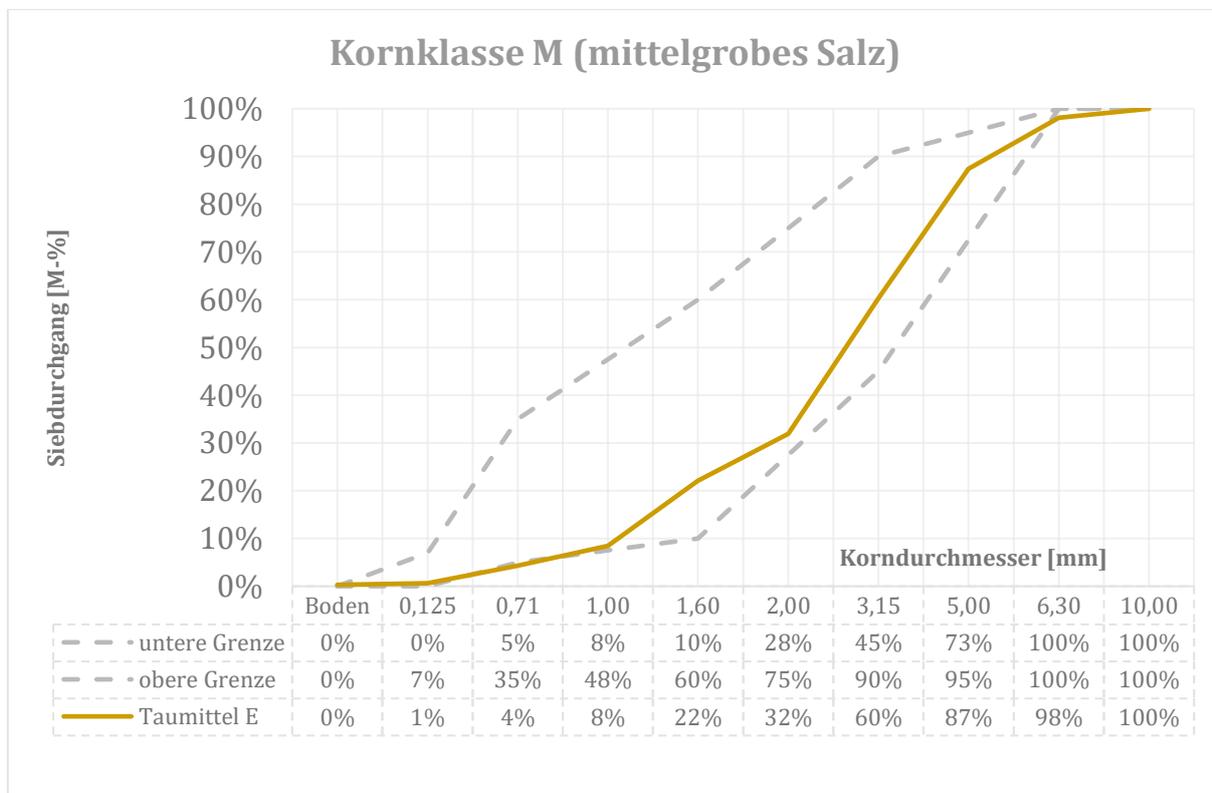


Abbildung 55. Sieblinie Taumittel E

5.4 Rieselfähigkeit

Die Rieselfähigkeit beschreibt die spezifische Eigenschaft eines Taumittels, gleichmäßig und kontinuierlich durch eine Öffnung zu fließen, was entscheidend für seine Lagerung und Anwendung in der Praxis ist. Eine optimale Rieselfähigkeit gewährleistet, dass das Taumittel aus Silos und Lagerboxen entnehmbar ist sowie während des Streuvorgangs gleichmäßig verteilt wird, was zur Effektivität bei der Schmelze von Eis und Schnee beiträgt. Wenn das Taumittel reibungslos aus dem Behälter fließt, kann es über eine größere Fläche verteilt werden, wodurch die Wahrscheinlichkeit erhöht wird, dass jeder behandelte Bereich ausreichend abgedeckt ist. Eine unzureichende Rieselfähigkeit hingegen kann dazu führen, dass Klumpen entstehen oder das Material komplett zusammenbäckt, somit nicht aus Silos oder Boxen entnommen werden kann oder auch ungleichmäßig aufgetragen wird. Dies beeinträchtigt nicht nur die Wirksamkeit des Taumittels, sondern kann damit in weiterer Folge auch die Verkehrssicherheit gefährden. Daher spielt die Rieselfähigkeit eine wesentliche Rolle in der Leistungsfähigkeit und Handhabung des Taumittels und sollte bei der Auswahl und Anwendung dieser Materialien sorgfältig berücksichtigt werden.

5.4.1 Versuchsmethode

Im Weiteren wird der Ablauf des Rieselversuchs ohne Bezugnahme auf die Feuchtigkeit erklärt, wobei am Ende explizit auf die Feuchtigkeit eingegangen wird.

Für den Versuchsaufbau wird benötigt:

- Rieselbox nach Sonntag (siehe Abbildung 56)
- Auffangbox
- Auffüllbox
- Winkelmessgerät
- Hilfsmittel: Wage, Lineal, Bürste/Pinsel etc.

Testversuch:

Die Rieselbox (MR) und die Auffangbox (MA) werden gewogen und die jeweiligen Massen werden notiert. Die Rieselbox wird auf die Auffüllbox gesetzt und mit Taumittel bis zum Rand gefüllt. Eventuell überschüssiges Taumittel wird vorsichtig mit einem Lineal geglättet, um die Ecken zu füllen oder überschüssiges Material zu entfernen. Mit einer Bürste oder einem Pinsel werden eventuelle Rückstände in der Rieselbox entfernt.

Die Rieselbox wird auf die Waage gelegt, um das Gewicht des Taumittels zu bestimmen. Die Masse des Taumittels (M_0) wird notiert.

Anschließend wird die Rieselbox auf eine horizontale Oberfläche (Tisch) platziert und neben dem Tisch wird der Auffangbox gestellt (siehe Abbildung 56).

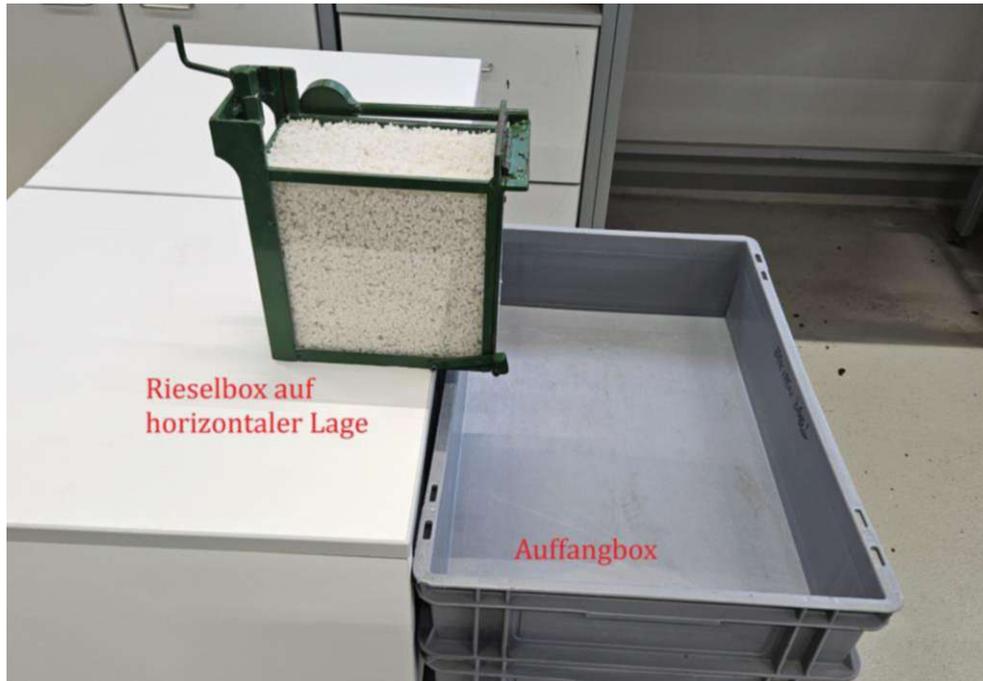


Abbildung 56. Vorbereitung Rieselversuch

Um mit dem Versuch zu beginnen, wird der Haken der Rieselbox gelöst, um die Auslaufseite zu öffnen, damit das Taumittel ausfließen kann (siehe Abbildung 57).



Abbildung 57. Rieserversuch nach Auslauf des Taumittels

Nach Abschluss des Rieselvorgangs werden die Auslaufwinkel (φ_1 und φ_2) auf beiden Seiten gemessen und notiert. Der Durchschnitt der beiden gemessenen Winkel wird als Auslaufwinkel angenommen (siehe Abbildung 58).

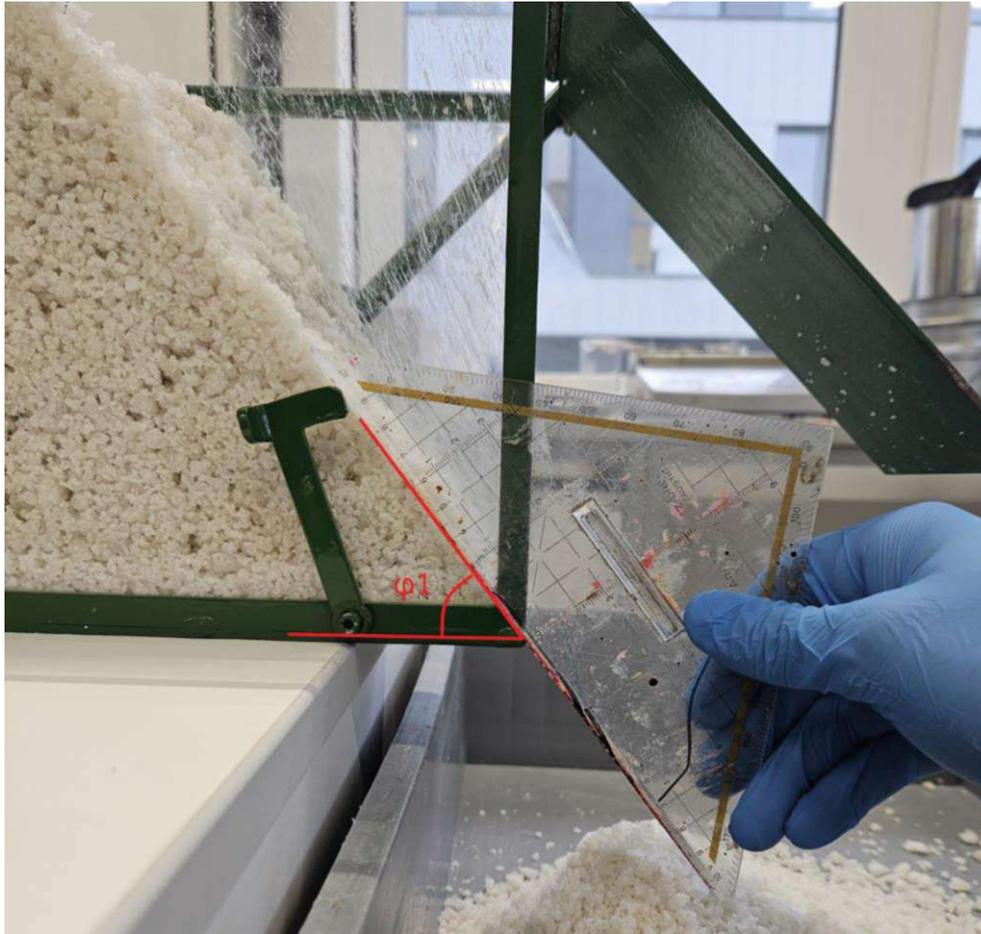


Abbildung 58. Messung des Auslaufwinkels

Anschließend wird das ausgelaufene Taumittel (M1) in der Auffangbox gewogen und die Menge wird notiert.

Um Fehler zu vermeiden und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, werden drei Durchläufe für jeden Versuch durchgeführt.

Mit den aus dem Versuch gewonnenen Daten können wir eine detaillierte Auswertung vornehmen. Die Auslaufrate wird anhand folgender Formel ermittelt:

$$\text{Auslaufrate [M\%]} = \frac{M_{\text{ausgelaufen [g]}}}{M_{\text{gesamt [g]}}} \times 100 \dots (5)$$

In der Regel gilt: Je höher die Ausflussrate, desto flacher ist der Auslaufwinkel, was auf eine bessere Rieselfähigkeit hinweist.

Die Feuchtigkeit spielt eine bedeutende Rolle bei der Rieselfähigkeit, wobei im Allgemeinen gilt: Je höher der Feuchtigkeitsgehalt im Taumittel ist, desto schlechter ist die Rieselfähigkeit. Rieselversuche werden mit Taumitteln durchgeführt, die unterschiedliche Feuchtigkeitsgrade aufweisen: geliefert, getrocknet, 0,25% Feuchte, 0,50% Feuchte, 0,75% Feuchte und 1,00% Feuchte.

Der Rieselversuch für die Lieferfeuchte wird gemäß der oben beschriebenen Methode durchgeführt, bevor das Taumittel getrocknet wird. Danach wird getrocknet und die Feuchtigkeit wird bestimmt (siehe Kapitel 2.3.1 Feuchtigkeitsgehalt).

Nach dem Trocknen wird der Rieselversuch mit dem getrockneten Taumittel durchgeführt.

Zur Vermeidung fehlerhafter Ergebnisse wird das Taumittel nach jedem weiteren Versuch wieder und wieder getrocknet. Nach jeder Trocknung kann die gewünschte Feuchtigkeit (0,25%, 0,50%, 0,75% und 1,00%) auf das Taumittel gesprüht werden.

Das Taumittel wird gleichmäßig in einer großen Box (siehe Abbildung 59) verteilt. Die Größe der Box wird entsprechend der Taumittelmenge ausgewählt, da das Taumittel gleichmäßig in einer dünnen Schicht verteilt werden muss. Die Menge an Taumittel sollte um einige hundert Gramm höher sein als die Menge, die im getrockneten Zustand in die Rieselbox passt. Die Befeuchtung wird mithilfe einer Sprühflasche in mehreren Durchläufen durchgeführt, bis der gewünschte Feuchtigkeitsgehalt erreicht ist, wobei das Gemisch zwischendurch sorgfältig umgerührt wird. Die Anzahl der Durchläufe und die Menge an Wasser, die gesprüht wird, sollten in angemessenem Verhältnis zur Salzmenge und der Größe der Boxe, in dem die Mischung erfolgt, abgestimmt werden, um eine gleichmäßige und homogene Mischung zu erhalten.



Abbildung 59. Befeuchtung der Taumittel: Sprühflasche(links) und angemessener Box(rechts)

Für jedes Taumittel werden grundsätzlich 6 Versuche durchgeführt (Lieferfeuchte; getrocknet; 0,25%; 0,50%; 0,75% und 1,00% Feuchte), wobei in jedem Versuch 3 Durchläufe stattfinden - insgesamt also 18 Durchläufe. Die gesammelten Ergebnisse werden ausgewertet und zur einfacheren Vergleichbarkeit übersichtlich in einer Tabelle aufgeführt.

5.4.2 Ergebnisse

Aufgrund der Probleme, die während des Trocknungsprozesses auftraten, insbesondere in Form von Klumpenbildung, war es nicht möglich, die Rieselfähigkeit bei 0,00%, 0,25%, 0,50%, 0,75% oder 1,00% Feuchtigkeit zu ermitteln. Die Klumpenbildung führte dazu, dass die Taumittel nicht

optimal fließen konnten, was eine verlässliche Beurteilung ihrer Rieselfähigkeit erheblich erschwerte.

Daher konzentrieren sich die in diesem Kapitel präsentierten Ergebnisse ausschließlich auf die Lieferfeuchtigkeit, da dies die einzige Feuchtigkeitsstufe darstellt, bei der eine konsistente und zuverlässige Analyse der Rieselfähigkeit der Taumittel durchgeführt werden konnte. Diese Fokussierung auf die Lieferfeuchtigkeit ermöglicht es, relevante Informationen über die Eigenschaften der Taumittel zu gewinnen, auch wenn die Untersuchung unter den anderen Bedingungen nicht realisierbar war.

In der nachstehenden Abbildung werden die Mittelwerte der Auslaufwinkel und deren Standardabweichungen detailliert dargestellt, um einen klaren Überblick über die Ergebnisse der durchgeführten Messungen zu bieten.

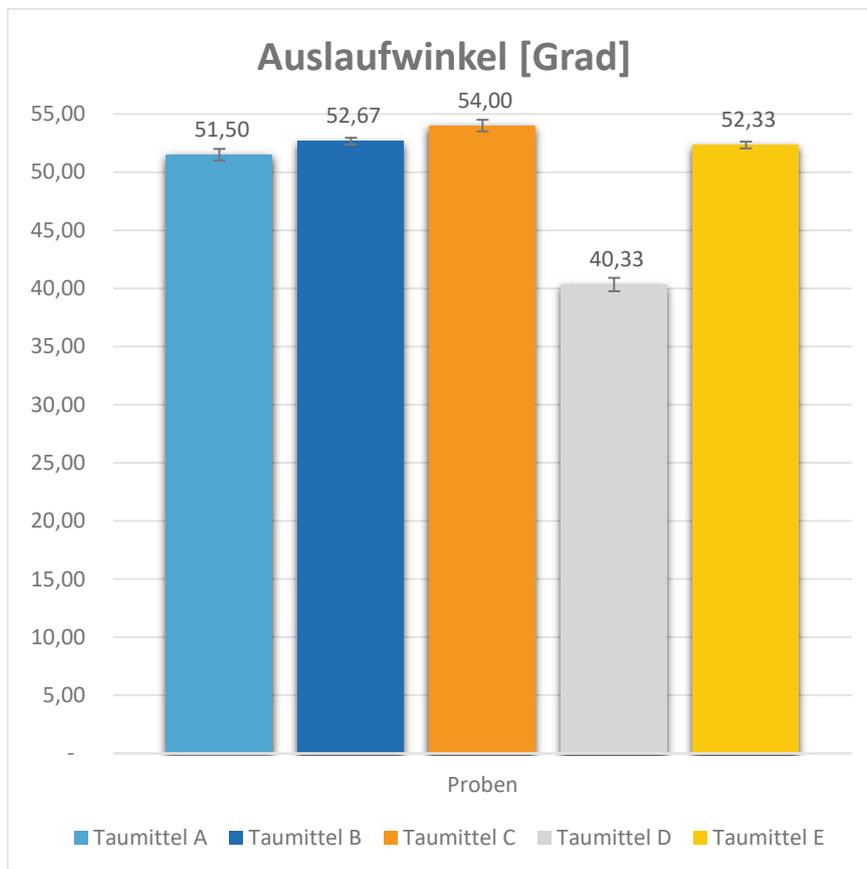


Abbildung 60. Auslaufwinkel des Rieselversuchs bei gelieferter Feuchtigkeit

Und in der nachstehenden Abbildung werden die Mittelwerte der Auslaufrate und deren Standardabweichungen dargestellt.

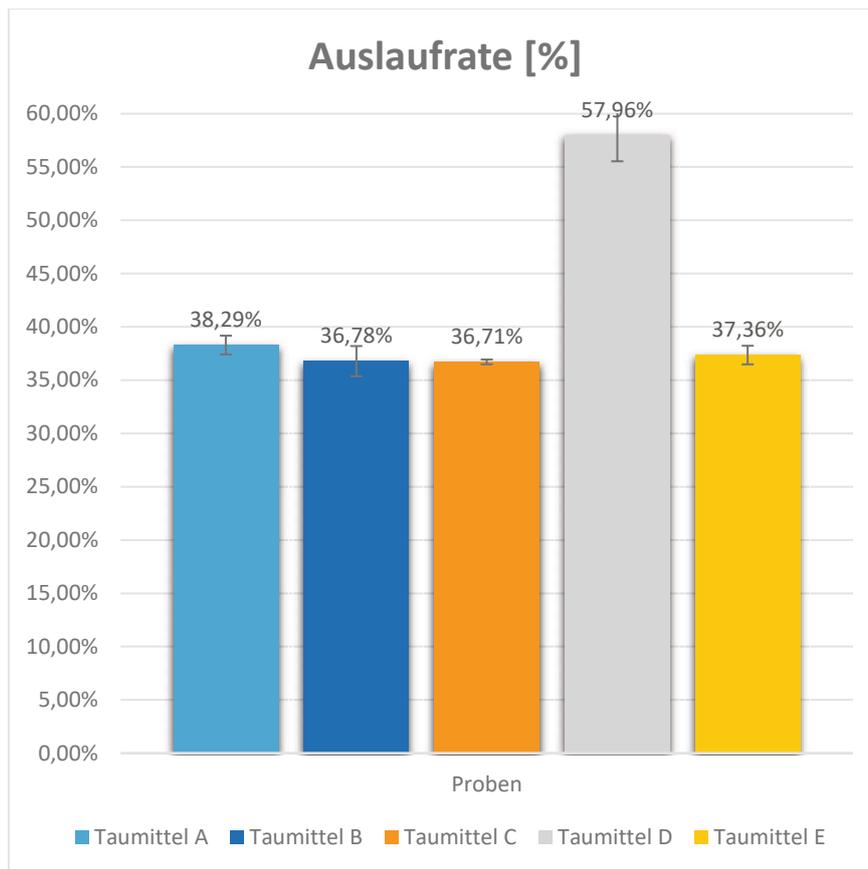


Abbildung 61. Auslaufrate des Rieserversuchs bei gelieferter Feuchtigkeit

Alle Taumittel wiesen ähnliche Ergebnisse bezüglich der Rieselfähigkeit auf, mit der Ausnahme von Taumittel D, welches eine überlegene Rieselfähigkeit zeigte. Die Ursache für diese überlegene Leistung kann auf die spezifische Korngrößenverteilung zurückgeführt werden, da Taumittel D eine gleichmäßige und homogene Körnung aufweist. Diese gleichmäßige Körnung ermöglicht eine bessere Fließfähigkeit des Taumittels, was sich positiv auf die Anwendungseigenschaften auswirkt. In der Praxis bedeutet dies, dass Taumittel D effizienter verteilt werden kann, was letztlich seine Effektivität zur Verbesserung der Gleitsicherheit erhöht.

6 Korrosion

Man versteht unter Korrosion den schädlichen physikalisch-chemischen Angriff auf Materialien, besonders Metalle, der durch eine Reaktion mit der Umgebung verursacht wird. Häufig führt dieser Prozess zu einer Veränderung der Materialeigenschaften und kann Schäden oder die Zerstörung des Materials verursachen. Korrosion kann ausgelöst werden durch eine Vielzahl von Faktoren, darunter Feuchtigkeit, Sauerstoff, Salze oder Säuren. Des Weiteren wird auf die Auswirkungen von Salzen auf die Korrosion eingegangen.

Häufig tritt Korrosion durch Salz auf, besonders in Regionen, in denen im Winter Straßen mit Salz gestreut werden, um Eis zu schmelzen. Metallteile wie Autos, Metallkonstruktionen, Schienennetze und Schienenverkehr sind am stärksten von Korrosion betroffen, was zu Rostbildung und Beschädigungen führen kann.

Im Folgenden wird die Versuchsmethode ausführlich beschrieben, gefolgt von einer detaillierten Erläuterung der Ergebnisse.

6.1 Versuchsmethode

Es gibt verschieden Methoden, um Korrosion durch Taumitteln/Salz zu ermitteln. Die in dieser Arbeit ausgewählte und durchgeführte Methode ist die "Wechseltauchversuche von Salzlösungen" basierend auf der Norm ISO 11130, 2017 [13] [14].

Für den Versuchsaufbau wird benötigt:

- Klimacontainer (Smart Arctic MP-4000)
- Wechseltauchgeräte mit entsprechenden Gefäßen (siehe Abbildung 62)
- Proben/Stahlplatten (150x100x1 mm, $236\pm 2,4$ g)
- Ausreichende Taumittel
- Ultraschallreinigungsgerät (Allpax Pulsasonic Eco UD10)
- Ausreichende Ultraschallreinigungsmittel (Amoniumcitrat dibasisch)
- Hilfsmittel: Waage, Magnetrührer, Ultraschallreinigungsgestell etc.

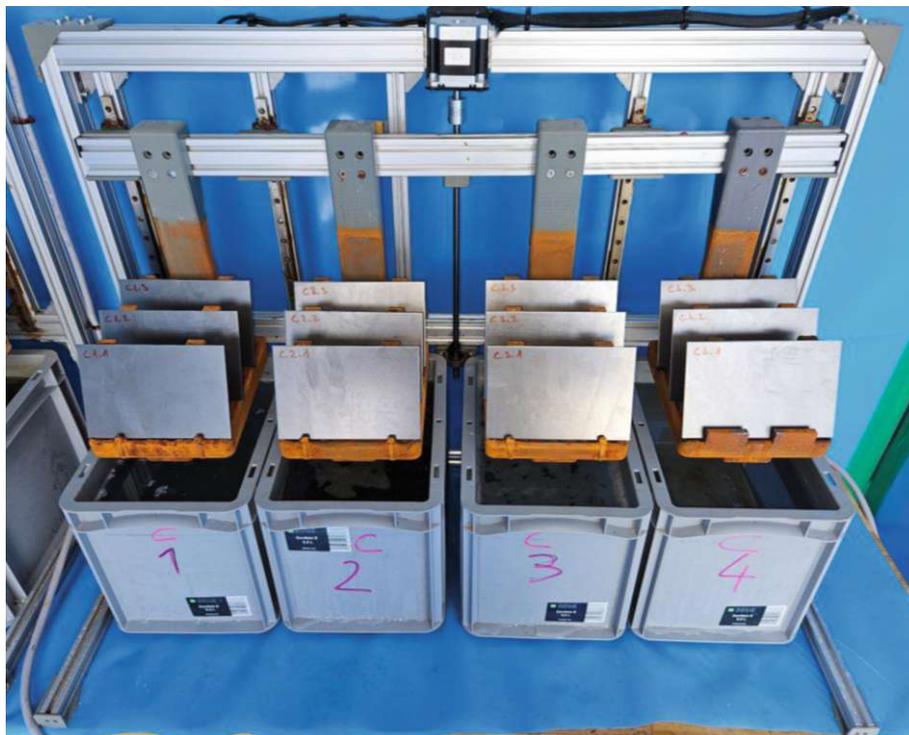


Abbildung 62. Wechseltauchgerät mit angemessenen Gefäße

Testversuch:

Die Innenwände und der Boden des Klimacontainers werden mit Folie abgedeckt, um sie vor Spritzern oder Korrosion durch Salzlösungen zu schützen. Die Wände werden bis zu einer Höhe

von ca. 2,10 Metern abgedeckt, während auf dem Boden ein Arbeitsplateau eingebaut wird, um die Folie vor Rissen zu schützen (siehe Abbildung 63).



Abbildung 63. Aufbereitung Klimaschrank

Zur Sicherung der Bodenfolie vor dem Auflösen durch das Windgebläse wird eine improvisierte Holzpalette mit Betongewichten darauf platziert, um eine ausreichende Luftzufuhr zu gewährleisten. Daraufhin werden die Tische (Gestelle) montiert und die Geräte darauf positioniert. (siehe Abbildung 64).

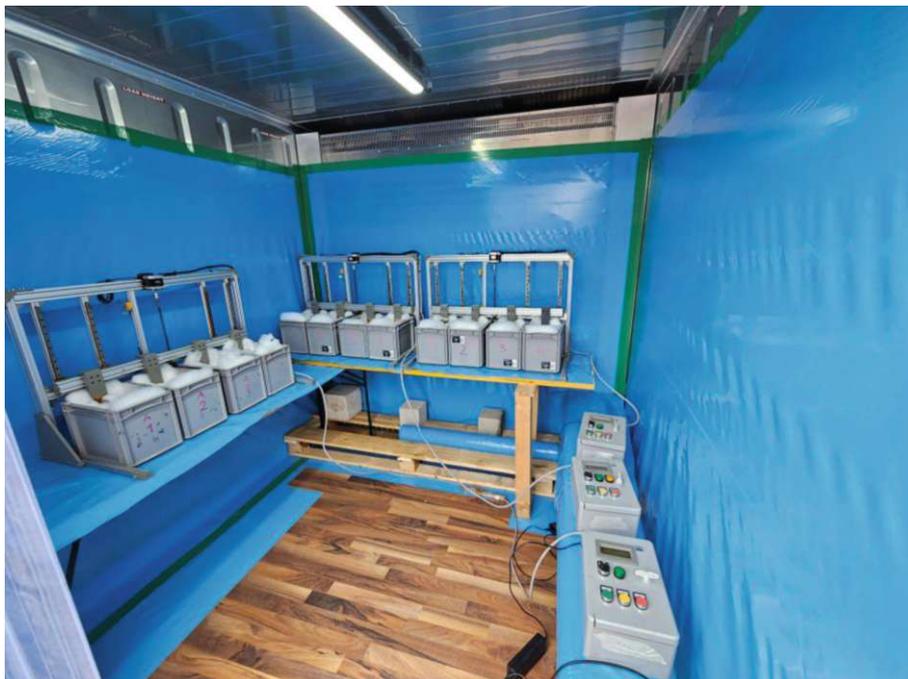


Abbildung 64. Aufbereitung Testdurchführung

Die Gefäße und die Halterungen für die Proben werden vor der Verwendung sorgfältig gereinigt. Besonders die Halterungen müssen mit Vorsicht gereinigt werden, da sie aus 3D-gedrucktem Kunststoff gefertigt sind und daher sehr zerbrechlich sein können. Nach der Reinigung werden die Halterungen und Gefäße gründlich gespült, um sämtliche Rückstände zu entfernen.

Die Gefäße werden mit einer Salzlösung von 8421 Gramm gefüllt, bestehend aus 8000 Gramm Wasser und 421 Gramm Salz. Diese Menge ist ausreichend, um eine 5%ige Salzlösung zu erzeugen, und die Bedingung (während des Tauchvorganges) dass die Proben etwa 10 mm unter der Oberfläche der Salzlösung eingetaucht sein müssen (siehe Abbildung 65).



Abbildung 65. Ausreichende Menge an Salzlösung beim Eintauchen

Um eine genaue Dokumentation zu gewährleisten und die Ergebnisse später nachverfolgen zu können, werden die eingegebenen Mengen für jedes Gefäß und das jeweilige Taumittel sorgfältig notiert.

Die Salzlösung wird mithilfe eines Magnetrührers gemischt, wobei der Vorgang in der Regel zwischen 5 und 10 Minuten dauert, abhängig von der Art des Taumittels.

Nach dem Mischen wird die Wand des Gefäßes an dem Punkt, an dem die Oberfläche der Salzlösung steht, mit einem nicht abwaschbaren Stift markiert. Dies dient dazu, während des Wechseltauchvorgangs, bei dem Wasser verdunstet, die richtige Menge an Wasser nachzufüllen (siehe Abbildung 66).

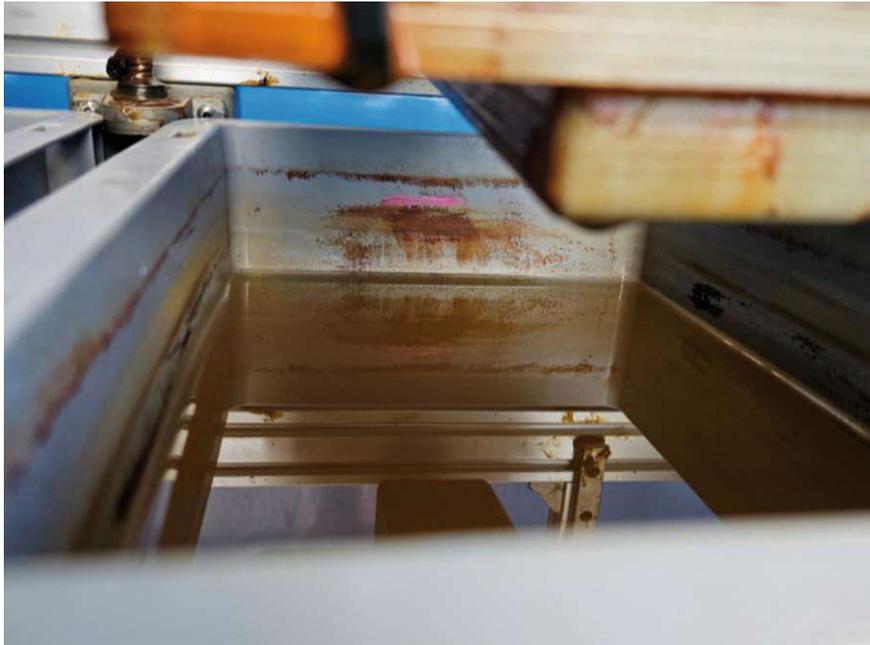


Abbildung 66. Markierung der Lösungsoberfläche bis wo man Wasser nachfüllen muss

Die Proben/Stahlplatten werden fotografiert, um Vorher-Nachher-Vergleiche durchführen zu können. Die werden auch gewogen und die entsprechenden Massen sowie die Zuordnung jeder Probe zu einem bestimmten Stand und Gefäß werden dokumentiert. Zum Beispiel steht Probe A2.1 für Behälter A2 und Position 1 (vorne) im Ständer (siehe Abbildung 66).



Abbildung 67. Zuordnung der Proben/Stahlplatten

Dann werden die Proben in die entsprechenden Ständer gestellt, wobei die Gefäße sorgsam darunter positioniert werden, um sicherzustellen, dass die Ständer beim Absenken nicht an den Gefäßen hängen bleiben und somit keine Beschädigungen verursacht werden. Auf diese Weise kann der Versuch reibungslos gestartet werden.

Der Klimacontainer wird auf +35°C eingestellt und diese Temperatur wird während des gesamten Versuchs konstant gehalten. Diese Temperatur wird eingestellt, um ideale Bedingungen für den Trockenprozess. Der Versuch wird über einen Zeitraum von insgesamt 21 Tagen durchgeführt. Während dieser Zeit werden die Proben in einem wiederkehrenden Zyklus von 10 Minuten Eintauchen gefolgt von 50 Minuten Trocknen behandelt (Eine Darstellung des Prozesses ist in Abbildung 67 zu finden).

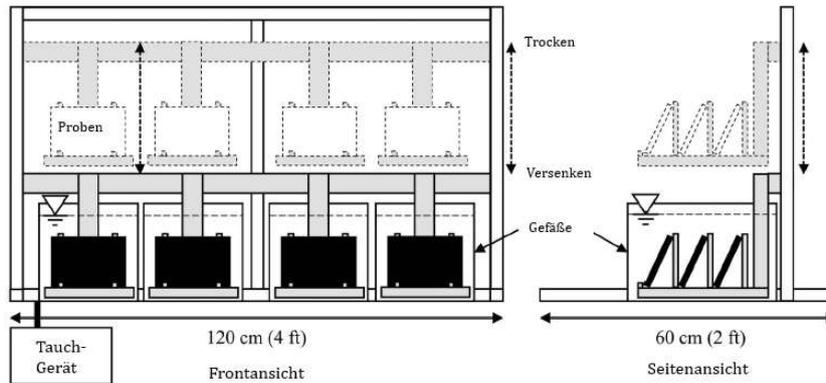


Abbildung 68. Wechseltauchgerät [8, 13]

Alle 7 Tage wird die Lösung komplett ausgetauscht (ein Beispiel hierfür ist in Tabelle 12 gegeben).

Tabelle 11. Beispiel Versuchsausführung

Mittwoch	Tag 0	Fotos - Wiegen - Versuchsstart
Donnerstag	Tag 1	
Freitag	Tag 2	Nachfüllen
Samstag	Tag 3	
Sonntag	Tag 4	
Montag	Tag 5	Nachfüllen
Dienstag	Tag 6	
Mittwoch	Tag 7	Lösungen neu Mischen
Donnerstag	Tag 8	
Freitag	Tag 9	Nachfüllen
Samstag	Tag 10	
Sonntag	Tag 11	
Montag	Tag 12	Nachfüllen
Dienstag	Tag 13	
Mittwoch	Tag 14	Lösungen neu Mischen
Donnerstag	Tag 15	
Freitag	Tag 16	Nachfüllen
Samstag	Tag 17	
Sonntag	Tag 18	
Montag	Tag 19	Nachfüllen
Dienstag	Tag 20	
Mittwoch	Tag 21	Versuchsende - Fotos - Reinigen/Wiegen - Fotos

Es wird empfohlen, den Versuchsstart am Vormittag zu planen, da auch das Ende des Experiments und der Rückbau am Vormittag erfolgen können. Dies bietet den Vorteil, dass ausreichend Zeit für die gründliche Reinigung der Proben zur Verfügung steht.

Während des Prozesses verdampft Wasser, daher wird alle 2 bis 3 Tage (3 Tage am Wochenende) Wasser nachgefüllt, um die 5%ige Lösung aufrechtzuerhalten und den Flüssigkeitsstand konstant zu halten. Dies gewährleistet, dass die Proben immer vollständig in die Salzlösung eingetaucht sind, da sie unter der Oberfläche bleiben müssen. Um dies zu ermöglichen, wird empfohlen, dass der Versuchsstart am Vormittag an einem Montag, Mittwoch oder Freitag erfolgt.

Die Proben werden behutsam aus den Ständern entnommen und ihre ursprüngliche Position wird gemerkt, um die Nachverfolgbarkeit nicht zu verlieren. Dies geschieht mithilfe von Ständern, wobei in Ständer 1 die Proben aus Box A1 von vorne nach hinten angeordnet sind und dasselbe für Box 2 gilt usw. (zur besseren Veranschaulichung siehe Abbildung 69).



Abbildung 69. Nachverfolgbarkeit der Proben wird gewährleistet

Die Vorder- und Rückseite der gerosteten Proben werden fotografiert, um einen visuellen Vergleich (vor und nach der Korrosion) durchführen zu können. Die Nachverfolgbarkeit wird gemäß Abbildung 69 sichergestellt.

Die Proben werden mithilfe eines Ultraschallbads gereinigt [15]. Die Lösung im Ultraschallgerät besteht aus 20% diabasischem Ammoniumcitrat und wird auf eine Temperatur von 50°C erwärmt. Die Proben (9 Stück) werden im Ständer platziert (siehe Abbildung 70) und gemerkt, um ihre Position nachvollziehbar zu halten und sie in das Ultraschallgerät einzusetzen.



Abbildung 70. Vorbereitung Ultraschallbad: Stahlplatten im Ständer platziert

Nach einem 30-minütigen Durchgang werden die Proben entnommen, gründlich mit Wasser gespült und anschließend sanft mit Papiertüchern abgewischt. Es wird empfohlen, auf starke mechanische Beanspruchungen zu verzichten, um eine mögliche Beeinträchtigung der Probe zu vermeiden. Nach dem Trocknen und Wiegen werden die Proben erneut im Ultraschallbad platziert (siehe Abbildung 71).



Abbildung 71. Ultraschallbad

Die weiteren Durchgänge im Ultraschallbad dauern jeweils 10 Minuten, gefolgt vom Spülen, Abwischen und Wiegen der Proben. Es handelt sich um einen wiederholten Prozess, bis eine Massenkonsistenz der Proben erreicht ist. Die Massen der Proben werden nach jedem Durchgang notiert, um eine Auswertung durchführen zu können.

Es wird empfohlen, beim Entnehmen, Spülen, Abwischen und Zurückgeben der Proben Augenschutz zu tragen, um sich vor der Lösung und eventuellem Rost in den Proben zu schützen.

Anschließend werden die Vorder- und Rückseite der gereinigten Proben fotografiert, um einen visuellen Vergleich (vor und nach der Korrosion) durchführen zu können. Die Nachverfolgbarkeit wird analog Abbildung 68 sichergestellt (siehe Abbildung 72).



Abbildung 72. Nachverfolgbarkeit der Proben wird gewährleistet.

Der relative Massenverlust wird anhand folgender Formel ermittelt:

$$\text{relativer Massenverlust [\%]} = \frac{M_{\text{vor}} [\text{g}] - M_{\text{nach}} [\text{g}]}{M_{\text{vor}} [\text{g}]} 100 \dots (6)$$

6.2 Ergebnisse

In der nachfolgenden Abbildung sind beispielsweise die visuellen Vergleiche der Proben aufgeführt, die detailliert zeigen, wie stark die unterschiedlichen Taumittel die Metallplatten korrodiert haben. Darüber hinaus wird veranschaulicht, wie sich die Schäden nach dem Reinigungsvorgang entwickelt haben.

Diese Abbildung ermöglicht einen klaren und umfassenden Überblick über die Korrosionswirkung der Taumittel und veranschaulicht die Auswirkungen auf die Probenoberflächen nach der Behandlung.

Es ist anzumerken, dass die Bezeichnungen auf den Platten in nachstehender Abbildung die Positionen im Versuch (z.B. A 1,2) vermerken und nicht auf das verwendete Taumittel (z.B. A) hinweisen.

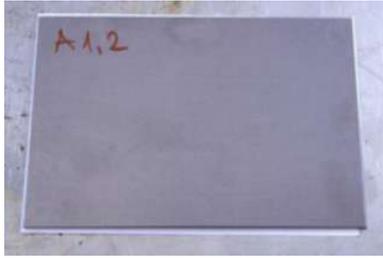
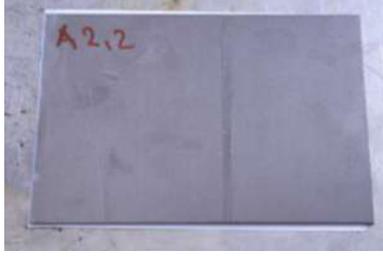
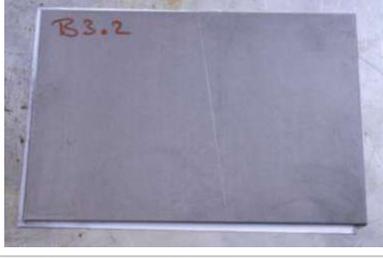
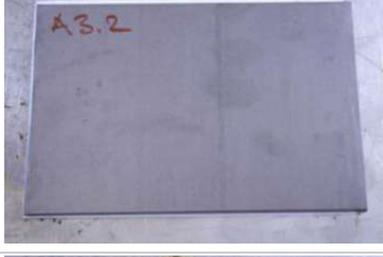
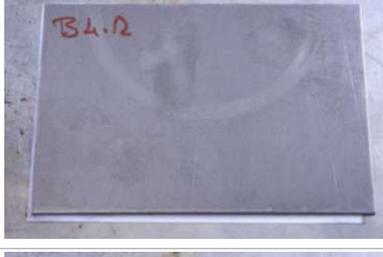
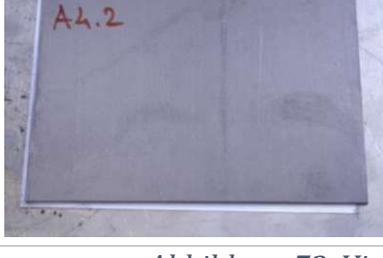
	Vor Korrosionsversuch	Nach Korrosionsversuch	Nach Reinigung
A			
B			
C			
D			
E			
NaCl			

Abbildung 73. Visueller Vergleich einer Auswahl von Proben

In der nachstehenden Tabelle sind die Masseverluste jeder einzelnen Probe detailliert dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass NaCl die stärkste Wirkung auf die Proben hat, mit einem sig-

nifikanten Masseverlust von 13,06%. Im Gegensatz dazu weist Taumittel D die geringste Wirkung auf, mit einem Verlust von lediglich 2,16%. Diese Unterschiede in den Masseverlusten verdeutlichen die unterschiedlichen Korrosionswirkungen der Taumittel und bieten wertvolle Einblicke in deren relative Effektivität und Verträglichkeit in praktischen Anwendungen.

Tabelle 12. Ergebnisse des Korrosionsversuchs

Box	Platten	Taumittel	Masseverlust (%)	Mittel (%)	Std. ABW.
A1	A1.1	Taumittel A	9,94%	9,47%	0,33
	A1.2		9,26%		
	A1.3		9,21%		
A2	A2.1	Taumittel B	6,58%	6,37%	0,15
	A2.2		6,26%		
	A2.3		6,26%		
A3	A3.1	Taumittel D	2,34%	2,21%	0,10
	A3.2		2,14%		
	A3.3		2,14%		
A4	A4.1	NaCl	13,32%	13,02%	0,21
	A4.2		12,90%		
	A4.3		12,84%		
B1	B1.1	Taumittel A	8,79%	8,66%	0,19
	B1.2		8,39%		
	B1.3		8,80%		
B2	B2.1	Taumittel B	6,91%	7,07%	0,18
	B2.2		6,99%		
	B2.3		7,32%		
B3	B3.1	Taumittel C	4,78%	5,16%	0,29
	B3.2		5,20%		
	B3.3		5,49%		
B4	B4.1	Taumittel E	9,69%	9,49%	0,23
	B4.2		9,16%		
	B4.3		9,61%		
C1	C1.1	Taumittel D	2,06%	2,11%	0,05
	C1.2		2,10%		
	C1.3		2,18%		
C2	C2.1	Taumittel E	10,01%	9,75%	0,26
	C2.2		9,39%		
	C2.3		9,86%		
C3	C3.1	Taumittel C	5,11%	5,19%	0,19
	C3.2		5,01%		
	C3.3		5,45%		
C4	C4.1	NaCl	13,40%	13,10%	0,21
	C4.2		12,89%		
	C4.3		13,02%		

Die Tabelle ermöglicht eine umfassende Analyse und Vergleich der Taumittel hinsichtlich ihrer Leistung in Bezug auf Masseverluste.

Zur besseren Veranschaulichung der Vergleiche zwischen den verschiedenen Taumitteln sind im folgenden Diagramm die Durchschnittswerte der getesteten Taumittel detailliert und übersichtlich dargestellt. Dieses Diagramm bietet eine anschauliche Übersicht, die es ermöglicht, die Wirksamkeit jedes Taumittels auf einen Blick zu vergleichen.

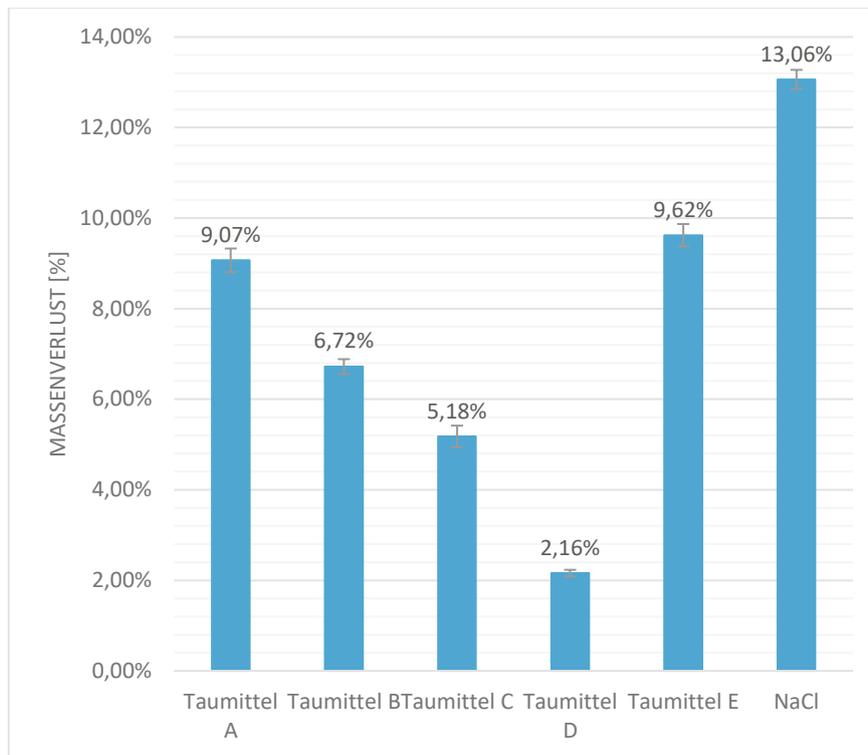


Abbildung 74. Die durchschnittlichen Masseverluste der getesteten Taumittel.

Die Ergebnisse der Masseverluste, die bei den getesteten Taumitteln ermittelt wurden, verdeutlichen deutliche Unterschiede in der Korrosionswirkung. Taumittel D weist mit einem Masseverlust von nur 2,16% den geringsten Verlust auf, was auf eine relativ hohe Stabilität und Verträglichkeit hindeutet. Dahinter folgt Taumittel C mit einem Verlust von 5,18%, das ebenfalls relativ wenig an Masse eingebüßt hat.

Anschließend kommt Taumittel B, das einen Masseverlust von 6,72% zeigt, gefolgt von Taumittel A mit 9,07%. Taumittel E hat einen Masseverlust von 9,62%, was es zu einem der weniger stabilen Taumittel im Vergleich macht.

Im Gegensatz zu diesen Taumitteln verzeichnet NaCl den höchsten Masseverlust mit 13,06%, was darauf hindeutet, dass es signifikant korrosiver ist und möglicherweise negative Auswirkungen auf die Substrate hat, mit denen es in Kontakt kommt. Diese umfassende Analyse der Masseverluste liefert wertvolle Erkenntnisse über die relative Beständigkeit und Effektivität der unterschiedlichen Taumittel in praktischen Anwendungen.

7 Zusammenfassung und Empfehlungen

In dieser Arbeit wurden Eignungsprüfungen an auftauenden Streumitteln durchgeführt. Die Prüfungen umfassten die Bestimmung der Tauleistung, des Gefrierpunkts, der Feuchtigkeit, der Korngrößenverteilung, der Rieselfähigkeit und der Korrosivität, um ein umfassendes Bild ihrer physikalischen Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten zu erhalten. Zudem wurde die Lagerfeuchtigkeit analysiert, um das Verhalten der Taumittel unter realistischen Lagerbedingungen zu bewerten und ihre Leistungsfähigkeit über längere Zeit zu sichern. Diese systematische Vorgehensweise ermöglicht einen fundierten Vergleich der Taumittel und unterstützt Entscheidungen zur zukünftigen Anwendung.

Im Folgenden werden, mit Ausnahme der Gefrierpunktsbestimmung, alle Versuchsergebnisse nach Taumittel getrennt beschrieben. Bei der Gefrierbestimmung sind zwei Halteplateaus vorhanden, wobei das zweite Plateau den vollständigen Gefrierprozess darstellt. Da sich das zweite Plateau jedoch nur geringfügig bei unterschiedlichen Taumittelkonzentrationen unterscheidet, wird es in den jeweiligen Ergebnisdarstellungen der Taumittel nicht berücksichtigt. Somit ist der genaue Gefrierpunktsverlauf anhand der Messdaten nicht eindeutig bestimmbar und daher wird auf die Ergebnisse nicht weiter eingegangen (siehe auch Kapitel 4.2).

Taumittel A erzielte in Bezug auf die Tauleistung gute Ergebnisse, wobei eine maximale Taurate von 12 mg Eis je mg Taumittel und eine steile Regressionslinie festgestellt wurden. Die Lagerung des Taumittels zeigt keine Verschlechterung des Feuchtigkeitsgehaltes auf. Diese Ergebnisse sind besonders wichtig, da sie die langfristige Verwendung und Effektivität der Taumittel in praktischen Anwendungen sicherstellen. Zusätzlich haben die Versuche zur Rieselfähigkeit, bei denen das Taumittel im gelieferten Feuchtigkeitszustand (2,78% Feuchte) getestet wurde, ebenfalls gute Resultate (Auslaufwinkel von 51,50 Grad) gezeigt und bekräftigen damit die Handhabungseigenschaften des Taumittels. Bei den Korrosionsversuchen konnte festgestellt werden, dass Taumittel A mit einem Masseverlust der Proben von 9,07% eine geringere Korrosivität als NaCl (13,06%) aufweist. Abschließend lässt sich festhalten, dass Taumittel A als gut eingestuft werden kann.

Taumittel B erzielte in Bezug auf die Tauleistung gute Ergebnisse, mit einer maximalen Taurate von 13, die durch eine steile Regressionslinie unterstützt wird. Diese Kennzahlen deuten auf eine guten Effektivität beim Schmelzen von Schnee und Eis hin, was Taumittel B zu einem vielversprechenden Kandidaten für den praktischen Einsatz macht. Zusätzlich zeigte sich die Lagerung des Taumittels keine Verschlechterung des Feuchtigkeitsgehaltes auf, was für seine Handhabung von großer Bedeutung ist. Die durchgeführten Versuche zur Rieselfähigkeit, bei denen Taumittel B in seinem gelieferten Feuchtigkeitszustand (2,88% Feuchte) getestet wurde, lieferten ebenfalls gute Ergebnisse (Auslaufwinkel von 52,67 Grad). Die Rieselfähigkeit ist entscheidend, da sie die gleichmäßige Verteilung des Taumittels auf behandelten Flächen erleichtert und somit dessen Wirksamkeit maximiert. Darüber hinaus zeigte Taumittel B in den Korrosionsversuchen einen Masseverlust der Proben von lediglich 6,72%. Abschließend lässt sich festhalten, dass Taumittel B als sehr gut eingestuft werden kann.

Taumittel C erzielte eine maximalen Taurate von 13 bei einer steilen Regressionslinie. Darüber hinaus zeigte die Lagerung des Taumittels keine Verschlechterung des Feuchtigkeitsgehaltes auf. Dies ist besonders wichtig für die praktische Anwendung, da eine zuverlässige Lagerfähigkeit die Effektivität des Taumittels beim Einsatz erheblich steigert. Zusätzlich wurden Versuche zur Rieselfähigkeit durchgeführt, bei denen Taumittel C in seinem gelieferten Feuchtigkeitszustand von 3,56% getestet wurde. Die Ergebnisse (Auslaufwinkel von 54 Grad) dieser Tests waren gut und bestätigten die gute Handhabung des Taumittels. Schließlich ergab sich bei den Korrosionsversuchen für Taumittel C ein Masseverlust der Proben von nur 5,18%, was als sehr gut beurteilt werden kann. Abschließend lässt sich festhalten, dass Taumittel C als sehr gut eingestuft werden kann.

Taumittel D erzielte in Bezug auf die Tauleistung mäßige Ergebnisse, mit einer maximalen Taurate von 9,5 und einer flachen Regressionslinie. Die flache Regressionslinie deutet darauf hin, dass das Taumittel nur langsam wirkt und somit die Schmelzeffizienz beeinträchtigt. Darüber hinaus zeigte die Lagerung von Taumittel D eine sehr starke Zunahme der Feuchtigkeit um 35,95%. Dies zeigt, dass das Taumittel D nicht optimal für eine langanhaltende Nutzung geeignet ist, da sich die veränderten Eigenschaften negativ auf seine Anwendung auswirken könnten. Im Gegensatz dazu haben die Versuche zur Rieselfähigkeit, bei denen Taumittel D in seinem gelieferten Feuchtigkeitszustand von 4,24% getestet wurde, gute Ergebnisse (Auslaufwinkel von 40,33 Grad) gezeigt. Diese Resultate deuten darauf hin, dass Taumittel D eine gleichmäßige Verteilung auf den behandelten Flächen ermöglicht. Zusätzlich wies Taumittel D in den Korrosionsversuchen einen vergleichsweise niedrigen Masseverlust von nur 2,16%. Solche Eigenschaften sind entscheidend für die Anwendung von Taumitteln, insbesondere in sensiblen Umgebungen, wo die Erhaltung der Oberflächenintegrität von hoher Bedeutung ist. Abschließend lässt sich festhalten, dass Taumittel D, wegen der schwache Tauleistung und schlechte Handhabung, als nicht gut eingestuft werden kann.

Taumittel E erzielte in der Kategorie der Tauleistung insgesamt gute Ergebnisse, mit einer maximalen Taurate von 13 und einer steilen Regressionslinie. Bei der Lagerung zeigte Taumittel E keine Verschlechterung des Feuchtigkeitsgehaltes auf, was auf eine gute Handhabung hindeutet. Zusätzlich wurden Versuche zur Rieselfähigkeit durchgeführt, in denen Taumittel E in seinem gelieferten Feuchtigkeitszustand von 2,33% getestet wurde. Die Ergebnisse (Auslaufwinkel von 52,33 Grad) dieser Versuche waren durchweg positiv, was auf die gute Handhabung des Taumittels hinweist. Darüber hinaus wurde während der Korrosionsversuche ein Masseverlust der Stahlplatten von 9,62% für Taumittel E festgestellt, was als akzeptabel bewertet werden kann. Abschließend lässt sich festhalten, dass Taumittel C als gut eingestuft werden kann.

Um einen besseren Überblick über die Ergebnisse zu bieten, werden diese in einer zusammenfassenden Tabelle präsentiert (siehe Tabelle 14).

Tabelle 13. Darstellung der Ergebnisse

	Taumittel A	Taumittel B	Taumittel C	Taumittel D	Taumittel E
Tauleistung	gut	sehr gut	sehr gut	nicht gut	gut
Einsatztemperatur (Gefrierpunkt)	keine Unterscheidung				
Feuchtigkeit/Lagerung	sehr gut	sehr gut	sehr gut	nicht gut	sehr gut
Rieselfähigkeit/Korngrößenverteilung	gut	gut	gut	sehr gut	gut
Korrosion	gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut	gut
Gesamt	gut	sehr gut	sehr gut	nicht gut	gut

Wie in vorheriger Tabelle erkennbar, erzielte Taumittel C die besten Ergebnisse unter den getesteten Taumitteln, jedoch lediglich mit einem geringen Vorsprung gegenüber Taumittel B. Diese beiden Taumittel haben bei den Eignungsprüfungen insgesamt sehr gut abgeschnitten, was ihre Effektivität und Leistungsfähigkeit unter Beweis stellt. Somit sind beide Mittel ähnlich gut geeignet für den praktischen Einsatz im Winterdienst.

Taumittel A und E haben in den durchgeführten Tests ebenfalls vergleichbare Ergebnisse gezeigt, wobei Taumittel A in Bezug auf die Korrosionsbeständigkeit etwas überlegen ist. Im Gegensatz dazu erweist sich Taumittel E als leistungsstärker hinsichtlich der Tauleistung, was bedeutet, dass es effektiver beim Schmelzen von Schnee und Eis ist. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl Taumittel A als auch Taumittel E insgesamt gute Ergebnisse erzielt haben und damit als zuverlässige Optionen für den Einsatz im Winterdienst in Betracht gezogen werden können.

Taumittel D erzielte die schlechtesten Ergebnisse in Bezug auf die Tauleistung und zeigte darüber hinaus auch Defizite in der Handhabung, was zu einer insgesamt negativen Bewertung führt. Die unzureichende Leistung in diesen beiden wichtigen Kategorien deutet darauf hin, dass Taumittel D in praktischen Anwendungen möglicherweise nicht die gewünschten Ergebnisse liefern kann. Insgesamt wird daher das Taumittel D als unzureichend eingestuft.

Literaturverzeichnis:

- [1] Nutz P., 2015: Dissertation – Entwicklung eines Straßenzustandsmodells beim Einsatz auftauender Streumittel im Winterdienst, Tu Wien.
- [2] BMK Abteilung IV/IVVS1 – Planung, Betrieb und Umwelt, 2023: Statistik Straße und Verkehr, Wien.
- [3] <https://www.laenderdaten.info/Europa/Deutschland/verkehr.php> (25.09.2024).
- [4] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/282120/umfrage/streusalz-verbrauch-auf-deutschen-strassen/> (25.09.2024).
- [5] EAWAG, 2016: Faktenblatt Streusalz, Dübendorf/Schweiz.
- [6] FSV, 2001: RVS 12.04.11, Winterdienst Allgemeines.
- [7] Nutz P., 2019: Straßenbetrieb, Tu Wien.
- [8] Gruber M.R., Hofko B., Hoffmann M., Stinglmayr D., Seifried T.M., Grothe H., 2023: Deicing performance of common deicing agents for winter maintenance with and without corrosion-inhibiting substances, Cold Regions Science and Technology.
- [9] Chappelow, C.C., McErloy, A.D., Darwin, D., et al., 1992. Handbook of Test Methods for Evaluating Chemical Deicers. National Academy of Sciences: Strategic Highway Research Program. Volume SHRP-H-332. Washington DC.
- [10] TU Wien: Arbeitsanweisung zur Bestimmung des Gefrierpunktverlaufs von Lösungen in Abhängigkeit der Konzentration.
- [11] ISO, 1973: ISO 2483, Sodium chloride for industrial use – Determination of the loss of mass at 110°C.
- [12] ASI, 2016: OENORM EN 16811-1, Winterdienstausrüstung-Enteisungsmittel.
- [13] Gruber M.R., Hofko B., Hoffmann M., Stinglmayr D., Grothe H., 2023: Analysis of metal corrosion methods and identification of cost-efficient and low corrosion deicing agents, Corrosion Engineering, Science and Technology.
- [14] ISO, 2017: ISO 11130, Corrosion of Metals and alloys-alternate immersion test in salt solution.
- [15] ISO, 2021: ISO 8407, Corrosion of Metals and alloys-removal of corrosion products from corrosion test specimens.

Abbildungsverzeichnis:

- Abbildung 1. Einfluss der winterlichen Bedingungen auf die Griffigkeit [1]
 Abbildung 2. Wirkungsweise der auftauende Streumittel [7]
 Abbildung 3. Unterschied zwischen Feines und Grobes Salzkörnung [7]
 Abbildung 4. in dieser Arbeit geprüften Taumittel
 Abbildung 5. Versuchsaufbau im Klimaschrank nach SHRP Methode H-205.1/2
 Abbildung 6. Eis- /Wassergefäß im Klimaschrank, oben rechts Mikropipette
 Abbildung 7. Vorbereitung Taumittelproben
 Abbildung 8. Temperieren der Eisproben
 Abbildung 9. Zwischengefäß zur Übertragung der Taumittel ins Eisgefäß
 Abbildung 10. Versuchsaufbau im Kryostat
 Abbildung 11. Auswertung der Fotos
 Abbildung 12. ungenaue Abtragung von Taumittel
 Abbildung 13. Zwischengefäß aus dickerem Alufolie
 Abbildung 14. Zwischengefäß aus Aluminiumblech
 Abbildung 15. Taumittelabtragung: ohne (oben) und mit Zwischengefäß (unten)
 Abbildung 16. Beispiel der Unterschiede der Tauzeiten in Minuten im Gefäß (mit eine Standardabweichung von 8,49 Minuten)
 Abbildung 17. neue Gefäße mit gleichmäßige Wärmeleitung.
 Abbildung 18. Abweichung der Ergebnisse (Tauzeiten in Minuten) mit dem neuen Gefäß (mit einer Standardabweichung von 22,9 Minuten)
 Abbildung 19. Beispiel der Unterschiede der Tauzeiten im Gefäß mit 500µl Wasser/Eis (mit einer Standardabweichung von 4,07 Minuten)
 Abbildung 20. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für NaCl
 Abbildung 21. Vergleich der Ergebnisse: Taumittel A (Blau), Taumittel B (Rot), Taumittel C (Grün), Taumittel D (Orange), Taumittel E (Braun), NaCl (Lila)
 Abbildung 22. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für Taumittel A
 Abbildung 23. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für Taumittel B
 Abbildung 24. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für Taumittel C
 Abbildung 25. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für Taumittel D
 Abbildung 26. Klebrige Masse der Taumittel D auf dem Arbeitsgegenstand (Löffel)
 Abbildung 27. Diagramm der Ergebnisse der Tauleistung für Taumittel E
 Abbildung 28. Schwarze Körner, die die Unreinheit des Taumittel E aufzeigen.
 Abbildung 29. Temperaturfühler in die Kunststoffflasche ordnungsgemäß positioniert.
 Abbildung 30. Positionierung der Kunststoffflaschen im Klimaschrank.
 Abbildung 31. Grafische Ermittlung des Gefrierpunktes [10]
 Abbildung 32. Unreinheit de Taumittel E
 Abbildung 33. Aufscheinen 2 Halteplateaus auf dem Gefrierversuch
 Abbildung 34. Foto nach der 1 Plateau, Lösung nicht vollständig gefroren.
 Abbildung 35. Foto nach 2 Plateau, Lösung vollständig gefroren
 Abbildung 36. Gefrierkurve Taumittel A
 Abbildung 37. Gefrierkurve Taumittel B

- Abbildung 38. Gefrierkurve Taumittel C*
Abbildung 39. Gefrierkurve Taumittel D
Abbildung 40. Gefrierkurve Taumittel E
Abbildung 41. Taumittel vor Trocknen Abwiegen
Abbildung 42. Proben im Trockenschrank
Abbildung 43. Klumpenbildung der Taumitteln nach Trocknung
Abbildung 44. Zehnwöchige Lagerung der Taumittel im Büro
Abbildung 45. Taumittel D - Bildung der Oberflächenschicht während der Trocknungsprozesses
Abbildung 46. Taumittel D - Bildung der Oberflächenschicht während der Trocknungsprozesses
Abbildung 47 Darstellung der Taumittel A
Abbildung 48. Darstellung der Taumitteln
Abbildung 49. Ausführung der Siebung
Abbildung 50. Salzklassen laut der Norm EN 16811-1, 2016
Abbildung 51. Sieblinie Taumittel A
Abbildung 52. Sieblinie Taumittel B
Abbildung 53. Sieblinie Taumittel C
Abbildung 54. Sieblinie Taumittel D
Abbildung 55. Sieblinie Taumittel E
Abbildung 56. Vorbereitung Rieserversuch
Abbildung 57. Rieserversuch nach Auslauf des Taumittels
Abbildung 58. Messung des Auslaufwinkels
Abbildung 59. Befeuchtung der Taumittel: Sprühflasche(links) und angemessener Box(rechts)
Abbildung 60. Auslaufwinkel des Rieserversuchs bei gelieferter Feuchtigkeit
Abbildung 61. Auslaufrate des Rieserversuchs bei gelieferter Feuchtigkeit
Abbildung 62. Wechseltauchgerät mit angemessenen Gefäße
Abbildung 63. Aufbereitung Klimaschrank
Abbildung 64. Aufbereitung Testdurchführung
Abbildung 65. Ausreichende Menge an Salzlösung beim Eintauchen
Abbildung 66. Markierung der Lösungsoberfläche bis wo man Wasser nachfüllen muss.
Abbildung 67. Zuordnung der Proben/Stahlplatten
Abbildung 68. Wechseltauchgerät [8, 13]
Abbildung 69. Nachverfolgbarkeit der Proben wird gewährleistet
Abbildung 70. Vorbereitung Ultraschallbad: Stahlplatten im Ständer platzier
Abbildung 71. Ultraschallbad
Abbildung 72. Nachverfolgbarkeit der Proben wird gewährleistet
Abbildung 73. Visueller Vergleich ein paar Proben
Abbildung 74. Die durchschnittlichen Masseverluste der getesteten Taumittel.

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1. Anzahl der Versuchsdurchführungen

Tabelle 2. Beispiel der Reihenunterschiede bei eine Eismenge von 400m

Tabelle 3. Beispiel mit 10% Taumittel zur Erklärung der inkonsistenten Ergebnisse

Tabelle 4. Ergebnisse aus Untersuchungen mit Temperatur von -2,5°C

Tabelle 5. Feuchtigkeitsgehalt Taumittel A

Tabelle 6. Feuchtigkeitsgehalt Taumittel B

Tabelle 7. Feuchtigkeitsgehalt Taumittel C

Tabelle 8. Feuchtigkeitsgehalt Taumittel

Tabelle 9. Feuchtigkeitsgehalt Taumittel E

Tabelle 10. Feuchtigkeit nach 10 wöchigen Lagerung und nach Trocknung

Tabelle 11. Beispiel Versuchsausführung

Tabelle 12. Ergebnisse des Korrosionsversuchs

Tabelle 13. Darstellung der Ergebnisse