

Forschungsprojekt

WINTERLIFE

*WINTER*dienst mit effektiven, nachhaltigen und
nicht aggressiven Taumitteln sowie optimalen
LIFE Cycle Costs der Bahn

Verkehrsinfrastrukturforschung VIF2018


ARGE HOFFMANN / TUW Verkehr / TUW Chemie



Im Auftrag von

FFG – BMK – ÖBB



 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie



Wien, Stand 22. Dezember 2021


Impressum

Medieninhaber: OEBB-Infra, FFG, BMK / Hoffmann-Consult / TU Wien

AG: OEBB-INFRA, FFG, BMK

Vertreter AG: DI. Andreas Schön (Koordinator)
DI. Dr. Heinz Kietaiabl, Ing. Gerhard Loos, Dr. Ewelina Klein (alle OEBB-Infra)



 Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie



AN: Hoffmann-Consult & TU Wien

Priv.-Doz. DI. Dr. techn. Markus Hoffmann (Projektleitung)
Ing. Dr. Johannes Leubolt (alle Hoffmann-Consult)

Univ. Prof. Dipl. Chem. Dr. Hinrich Grothe, Dr.rer.nat. Ayse Nur Koyun, Dr.rer.nat. Teresa Seifried,
David Stinglmayr BSc. (alle TU Wien - Materialchemie)

Assoc. Prof. DI. Dr. Bernhard. Hofko, Univ. Ass. DI. Michael Gruber
(alle TU Wien - Verkehrswissenschaften)

Stand 22. Dezember 2021



Zitationsvorschlag:

Hoffmann, M., Gruber, M., Leubolt, J., Grothe, H. Koyun, A. N., Seifried, T., Stinglmayr, D., Hofko, B. (2021), WINTERLIFE - WINTERdienst mit effektiven, nachhaltigen und nicht aggressiven Taumitteln sowie optimalen LIFE Cycle Costs der Bahn; Endbericht VIF2018-Verkehrsinfrastrukturforschung, Wien

Die Verfasser und Auftraggeber behalten sich alle Rechte an der Arbeit sowie den darin enthaltenen Erkenntnissen selbst sowie die weitere Verwendung z.B. in Form von Präsentationen, Rechenverfahren oder Programmen vor, sofern diese nicht im Rahmen des Fördervertrages der FFG, Software oder Patenten anderweitig definiert sind. Ein auszugsweiser Nachdruck und Verwertung in anderen Medien bzw. Software ist ausnahmslos nur mit schriftlicher Zustimmung der Verfasser gestattet. Das verwendete Daten- und Bildmaterial wurde weitgehend selbst sowie fallweise im Zuge von Publikationen und Forschungsarbeiten erstellt bzw. gemäß dem Kontext der Arbeit auf Basis der genannten Quellen überarbeitet. Alle dargestellten Inhalte und Funktionen wurden umfassend auf Richtigkeit und Zuverlässigkeit gemäß dem Stand von Technik und Wissenschaft getestet. Eine Haftung für Folgen, die sich aus der Verwendung der Inhalte und Ergebnisse der Arbeit durch Dritte ergeben, wird von den Verfassern dezidiert ausgeschlossen.

Zusammenfassung

Im FFG-VIF2018 Forschungsprojekt WINTERLIFE wurden umfassende Untersuchungen zu effektiveren und nachhaltigeren, umweltverträglichen und nicht-aggressiven Taumitteln im Winterdienst für die ÖBB-INFRA angestellt. Die Literatur kann in Primärliteratur mit Untersuchung einer begrenzten Anzahl an Taumitteln oder Produkten sowie Querschnittsanalysen unterschieden werden. In WINTERLIFE wird ein universeller Ansatz verfolgt, in dem alle Produkte nach Grundtaumittel, Zusätzen und Verunreinigungen klassifiziert werden. Die Analyse der Grundtaumittel bestimmt die maßgebenden Eigenschaften in Bezug auf das Taumittel, während die Zusätze spezifisch die Eigenschaften verbessern (z.B. Antitackmittel, Korrosionsinhibitoren) und die Verunreinigungen ein Qualitätsmerkmal darstellen (Rückstände). Dementsprechend ist auf Basis der Ergebnisse eine Ersteinschätzung jedes relevanten Produkts möglich.

Wie die Ergebnisse in WINTERLIFE gezeigt haben, ist Natriumchlorid (NaCl) aus Sicht des Winterdienstes allein eindeutig das wirtschaftlichste und effektivste Taumittel. Diese Einschätzung basiert auf den Ergebnissen zu Kosten und Verfügbarkeit, Lagerfähigkeit und Ausbringbarkeit, Taumittelbedarf sowie insbesondere der Kosteneffizienz bei vergleichbarer Wirkung. Dabei ist zu beachten, dass die Kosten für Taumittel nur einen Bruchteil der Gesamtkosten des Winterdienstes ausmachen. Bezogen auf einen Referenzbahnhof und einen Winter sind die Mehrkosten für alternative Taumittel gering, bei flächendeckender Anwendung im Lebenszyklus sind die Mehrkosten aber gravierend und nur bei entsprechenden anderen Vorteilen im Vergleich zu rechtfertigen. Im Rahmen umfassender Korrosionsversuche auf Stahl, verzinktem Blech und Kupfer wurde daher der Nachweis erbracht, dass sich mit alternativen Grundtaumitteln (z.B. Calciumchlorid, Magnesiumchlorid, Natrium- und Kaliumacetate, -formiate sowie Kaliumcarbonat) die Korrosivität erheblich reduzieren lässt. Zu beachten ist dabei, dass alternative Grundtaumittel meist hygroskopisch sind, feucht oder als Sole ausgebracht werden und Mehrkosten in der Streuung verursachen.

Aufgrund der Ergebnisse der Markt- und Patentrecherche in WINTERLIFE ergab sich eine starke Indikation die hohe Verfügbarkeit, geringen Kosten und hohe Tauwirksamkeit von NaCl durch Zusätze in Hinblick auf die Korrosivität zu verbessern. Dazu wurde sowohl ein Marktprodukt, als auch herkömmliches NaCl mit unterschiedlicher Dosierung von Inhibitoren untersucht. Die Ergebnisse für das Marktprodukt zeigen, dass zwar eine Reduktion der Korrosivität auf 74% möglich war, die insgesamt vom Hersteller angegebenen Vorteile aber nicht reproduzierbar waren und gravierende Mehrkosten anfallen würden. Die Kombination von NaCl mit Korrosionsinhibitoren wie Zucker (z.B. Glucose), Natriummetasilikat, Calciumnitrit (4-8 m%) kann dagegen die Korrosivität auf 10% bis 60% mit geringen Mehrkosten senken, wobei Zucker am unbedenklichsten für Mensch und Natur ist. Die einfache Herstellbarkeit und flexible Ausbringung trocken, als Feuchtsalz oder Sole bei nur geringfügig niedrigerer Tauleistung würden eine Beibehaltung der üblichen Streupraxis ermöglichen. Weitere Vorteile für den breiteren Einsatz von NaCl + Inhibitoren liegen darin, dass die Herstellung und Lieferung durch viele Anbieter erfolgen kann, wodurch keine Abhängigkeit von Monopolanbietern entstehen und erhebliche Kostenvorteile erzielbar sind.

Zusammenfassend hat die Entscheidung für alternative Taumittel bei vergleichbarer Wirkung erhebliche wirtschaftliche, technische, praktische und umweltrechtliche Konsequenzen. Mit den Ergebnissen von WINTERLIFE wird empfohlen, die gezeigten Alternativen an Bahnhöfen für 1-2 Winter in Bezug auf Bestellung, Handhabung und Anwendung zu testen. Weiters werden Untersuchungen im Labor empfohlen, um negative Überraschungen zuverlässig auszuschließen. Aufgrund des hohen Wertes der von Betonschäden und Korrosion betroffenen Anlagen der ÖBB rechnen sich die Mehrkosten der gezeigten Alternativen, wenn die Lebensdauer im Schnitt auch nur 1-2 Jahre verlängert werden kann. Angesichts des gezeigten Reduktionspotenzials in der Korrosion ist dies mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit erreichbar. Aus der starken Beschleunigung der Korrosion bei wärmeren Temperaturen ergibt sich die Empfehlung die Eintragung von Taumitteln in geheizte Innenräume zu minimieren bzw. betroffene Flächen regelmäßig zu reinigen. Weiters ist es sinnvoll vor längeren Trockenperioden bzw. insbesondere am Ende des Winters alle Bereiche gründlich von Taumittelresten zu reinigen. Letztendlich liegt die Entscheidung über die Gewichtung der einzelnen Entscheidungsaspekte und Vorgehensweise in der Verantwortung der Anwender, wobei die gezeigten Grundlagen und Ergebnisse des Berichts eine wesentliche Hilfe sein können.

Summary

In the FFG VIF2018 research project WINTERLIFE, comprehensive research, analyses and investigations were carried out with the aim of enabling more effective and sustainable winter maintenance in and around train stations using tested, environmentally compatible and non-aggressive de-icing agents for ÖBB-INFRA. The literature on this topic can be divided into primary literature with investigations of a limited number of de-icing agents or products and cross-sectional analyses based on existing literature and research. In WINTERLIFE, a universal approach is followed in which all products are classified according to basic de-icing agents, additives and contamination. The analysis of the basic de-icing agents determines de-icing capabilities and applicability, while the additives specifically improve the properties (e.g. anti-caking agents, corrosion inhibitors) and the impurities represent a quality feature (residues). Accordingly, an initial assessment of each relevant product on the market is possible based on the results of the report.

As the results in WINTERLIFE have shown, sodium chloride (NaCl) is clearly the most economical and effective de-icing agent with the main focus on winter maintenance. This assessment is based on the results on costs and availability, storability and application, de-icing agent requirements and, in particular, cost efficiency with comparable effectiveness. It should be noted that the cost of de-icing agents is only a fraction of the total cost of winter maintenance. In relation to a reference station and a winter, the additional costs of alternative de-icers are low, but if applied throughout the life cycle on all stations, the additional costs are serious and can only be justified if there are corresponding other benefits. Within the framework of comprehensive corrosion tests on steel, galvanized sheet and copper, it was therefore demonstrated that alternative de-icing agents (CaCl₂, MgCl₂, NAc, NFO, KAc, KCO) can significantly reduce corrosivity. It should be noted that these alternatives are usually hygroscopic and are therefore applied moist or as brine. In addition, using these alternatives on a large scale would incur significant additional maintenance costs.

Based on the results of the market and patent search in WINTERLIFE, there was a strong indication that the high availability, low cost and high thawing efficiency of NaCl could be combined with the positive effects of additives on corrosivity. For this purpose, both a market product and conventional NaCl with different dosages of inhibitors were investigated. The results for the market product showed that although a reduction in corrosivity down to 74% was possible, the overall benefits claimed by the manufacturer could not be reproduced and serious additional costs would be incurred. The combination of NaCl with corrosion inhibitors such as glucose (sugar), sodium metasilicate, calcium nitrite or mannose (4-8 m%), on the other hand, can reduce corrosivity from 10% to 60% at very moderate additional cost. The ease of production and flexibility of application dry, as pre-wetted salt or brine, with only a slightly lower thawing rate, would also have the advantage that there would be virtually no change in normal winter maintenance practice. Other advantages to the wider use of NaCl + inhibitors are the possibility to be manufactured by many suppliers, eliminating dependence on monopoly providers resulting in significant cost advantages.

In summary, the decision to use alternative de-icing agents for achieving comparable results to NaCl has immediate significant economic, technical, practical and environmental consequences. Based on the results of WINTERLIFE, it is recommended to test the highlighted alternatives at selected train stations for 1-2 winters with regard to supply, handling and application limits. Furthermore, comparable investigations in the lab are recommended in order to reliably exclude negative surprises regarding other metals and concrete. Due to the high value of the ÖBB assets affected by concrete damage and corrosion, the additional costs of the alternatives shown are economic, even if the service life can only be extended by 1-2 years on average. In view of the reduction potential in corrosion effects and expected impact on service life this is almost certainly achievable. The strong acceleration of corrosion at warmer temperatures leads to the recommendation to minimize the introduction of de-icing agents into heated interior spaces (foot walkers) and to clean affected areas regularly. Furthermore, it is advisable to thoroughly clean all areas of de-icing agent residues before longer dry periods or especially at the end of each winter. Ultimately, it is up to the user to decide on the weighting of the individual decision-making aspects, the further procedure in procurement and winter maintenance, and the responsibility for the results achieved in each case. The provided research results and decision criteria of this report can be an invaluable resource in such tasks.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
1.1	Ausgangslage.....	7
1.2	Zielsetzungen und Aufgaben	8
1.3	Methodik und Arbeitspakete	9
1.4	Kurzüberblick Literaturanalyse	12
2	Grundlagen Taumittel.....	14
2.1	Wirkung abstumpfender und auftauender Streumittel.....	14
2.2	Winterdienstpraxis ÖBB.....	15
2.3	Kriterien und Bewertung Taumittel.....	16
3	Forschung und Entwicklung Taumittel.....	19
3.1	Marktuntersuchung Taumittel	19
3.1.1	Überblick Grundtaumittel	19
3.1.2	Überblick Marktprodukte	27
3.1.3	Überblick Patente	29
3.1.4	Beispiel Produktanalyse	30
3.2	Lagerung und Ausbringung	32
3.2.1	Streumittellieferung und Lagerung	32
3.2.2	Eignungskriterien Lagerung	33
3.2.3	Räumung und Taumittelausbringung	36
3.3	Gefrierkurven und Tauwirkung	38
3.3.1	Gefrierkurven und Eutektik	38
3.3.2	Empirische Gefrierkurven und Taumittelbedarf	39
3.3.3	Tauleistung Eisplatte	45
3.3.4	Tauleistung Poxic	48
3.4	Korrosion und Inhibitoren	52
3.4.1	Korrosionsmechanismen und Einflussfaktoren	52
3.4.2	Korrosionsinhibitoren und Wirkmechanismen	54
3.4.3	Korrosionsversuche WINTERLIFE	56
3.4.4	Chemische Untersuchungen WINTERLIFE	64
3.4.5	Ergebnisvergleich Korrosionsversuche	70
3.5	Umweltwirkung.....	75
3.5.1	Mensch	75
3.5.2	Fauna	77
3.5.3	Flora	80
3.6	Ergebnisse und Bewertung.....	84
3.6.1	Grundlagen Referenzbeispiel Bahnhof	84
3.6.2	Grundlagen Referenzbeispiel ÖBB-INFRA	85

3.6.3	Berechnung und Ergebnisse	86
4	Zusammenfassung	92
5	Anhang	94
5.1	Literaturverzeichnis	94
5.2	Abbildungsverzeichnis	99
5.3	Tabellenverzeichnis	102
5.4	Publikationen und Papers	103
5.5	Daten und Materialien	104
5.5.1	Sicherheitsdatenblätter	104
5.5.2	XPS – Untersuchungen	107
5.5.3	Korrosionsprüfungen	114
5.6	Projektteam WINTERLIFE	129
5.6.1	Projektteam ÖBB - INFRA	129
5.6.2	Projektteam Hoffmann-Consult	129
5.6.3	Projektteam TU Wien	129

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Winterdienst wirkt der Glätte von Verkehrsflächen infolge von Schneefällen, Reif, gefrierendem Regen und überfrierender Nässe entgegen. Im langjährigen Schnitt ist in Österreich von 1. November bis 31. März mit ca. 25 Schneefalltagen (Ø 5,2 cm Schnee) zu rechnen. Reifglätte ist bei hoher Luftfeuchte >90% und Minusgraden an etwa 40-70 Tagen (Eismenge 30 – 150 g/m²) zu erwarten. Gefrierender Regen ist dagegen vergleichsweise selten und überfrierende Nässe hängt von den lokalen Verhältnissen ab. Die Kenntnis von Häufigkeit und Intensität der regionalen Wetterereignisse ist von wesentlicher Bedeutung für die Planung eines effizienten Winterdienstes. Die ÖBB investiert jährlich rund 40 Mio. € in den Winterdienst zur Gewährleistung eines schnellen und sicheren Bahnverkehrs. Rund 5.000 km Streckennetz sowie 1.100 Stationen werden maschinell bzw. per Hand geräumt. Die rasche Beseitigung von Eis und Schnee mit abstumpfenden und auftauenden Streumitteln hat für die ÖBB zur Gewährleistung von Kunden- und Rechtssicherheit eine hohe Priorität. Weiters ist dabei zu beachten, dass der Winterdienst in der überwiegenden Anzahl an Stationen durch beauftragte Dienstleister mit Rahmenverträgen durchgeführt wird.¹

Auftauende Streumittel wie das üblicherweise im Winterdienst verwendete Natriumchlorid (NaCl) weisen vergleichsweise geringe Kosten und hohe Tauwirksamkeit auf, wirken aber stark korrosiv, wodurch die Lebensdauer der Bauwerke erheblich reduziert wird. Diese Verkürzung der Lebensdauer wird zwar nicht unmittelbar im Budget für den Winterdienst wirksam, verursacht aber im Bereich der Instandsetzung und Erneuerung erhebliche Mehrkosten. Die sich daraus unmittelbar ergebende Fragestellung ist, inwieweit Auftaumittel mit geringerer Korrosionswirkung verfügbar sind bzw. entwickelt werden können. Aufgrund der Bedeutung des Winterdienstes für die Sicherheit der Kunden lässt sich die Fragestellung jedoch nicht nur auf die Korrosivität reduzieren. Vielmehr ist auch eine entsprechende Ausbringbarkeit in der Winterdienstpraxis sowie Tauwirksamkeit auch bei tiefen Temperaturen gefordert, um einen möglichst durchgängig sicheren Zustand der Verkehrsflächen zu gewährleisten. Darüber hinaus ist auch eine entsprechende Verfügbarkeit des ausgewählten Taumittels zu vertretbaren Kosten erforderlich, um einen sparsamen, wirtschaftlichen und zweckmäßigen Winterdienst der ÖBB zu gewährleisten.

Aufgrund der durchschnittlich über die Lebensdauer der Anlagen ausgebrachten Streumengen sind auch die Wirkungen auf Menschen und Umwelt nicht zu vernachlässigen. Dementsprechend müssen Auftaumittel und allfällige Zusätze eine ausreichende Verträglichkeit aufweisen und die einschlägigen Grenzwerte gemäß Gesetzen und Normen dürfen nicht überschritten werden. Im Fall einer Verwendung von alternativen Taumitteln zu Natriumchlorid ist zudem auf die sich daraus ergebenden Änderungen in der Streustrategie Bedacht zu nehmen. Zusammenfassend handelt es sich bei der Suche nach effektiven, nachhaltigen und nicht-aggressiven Taumitteln um eine mehrdimensionale Fragestellung, die aufgrund ihrer Tragweite eine umfassende, systematische und nachvollziehbare Untersuchung und Bewertung erfordert. Das in der Verkehrsinfrastrukturforschung VIF 2018 unter Pkt. 2.2.4 Auftaumitteluntersuchung ausgeschriebene Forschungsprojekt dient der Klärung genau dieser Fragestellungen. Die wichtigsten in der Projektdauer von ca. 24 Monaten zu untersuchenden Anforderungskriterien in der VIF - Ausschreibung waren:

- Keine/geringe Schädigung Anlagen (Beton/Stahl)
- Unschädlich Mensch/Tier/Pflanze/Gewässer
- Gleichwertige Auftauzeit (Haftungsfrage)
- Geringe Ausbringungsmengen (Umwelt)
- Einfache Handhabung & Ausbringung
- Gute Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit

¹ vgl. HOFFMANN, M. (2018), HOFFMANN, M. et al. (2018), KLUGER-EIGL, W. et al. (2018)

1.2 Zielsetzungen und Aufgaben

Das FFG-VIF2018 Forschungsprojekt WINTERLIFE soll einen effektiveren und nachhaltigeren Winterdienst unter Einsatz geprüfter, umweltverträglicher und nicht-aggressiver Taumittel ermöglichen. Aufbauend auf etablierte Testverfahren aus mehr als 10 Jahren Winterdienstforschung soll eine umfassende Untersuchung alternativer Taumittel erfolgen. Aufbauend auf die Analyse der Winterdienstpraxis in den ÖBB sollen zudem die Anwendbarkeit alternativer Taumittel geprüft sowie die Folgen einer praktischen Anwendung abgeschätzt werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Suche nach wirksamen, nachhaltigen und nicht-aggressiven Enteisungsmitteln ein mehrdimensionales Thema ist, das eine umfassende, systematische Untersuchung und Bewertung erfordert. Das Forschungsprojekt WINTERLIFE von Hoffmann-Consult und der TU Wien dient der Klärung genau dieser Fragen. Die Hauptaufgaben in diesem Forschungsprojekt waren demnach:

1. **Literatur Taumittel:** Ziel der Literaturanalyse war es, mögliche Enteisungsmittel und Produkte zu identifizieren, diese in die Kategorien Grundtaumittel, Zusatzstoffe und Verunreinigungen zu unterscheiden und für weitere Analysen vorzubereiten
2. **Entscheidungskriterien und Vorgehensweise:** Ziel war die Ermittlung der wesentlichen Entscheidungskriterien und des Bewertungsansatzes für Taumittel und Produkte als Basis für eine ganzheitliche Auswahl für verschiedene Anwendungsbereiche
3. **Gefrierkurven und Auftauvermögen:** Ziel war die Analyse der Literatur und die Durchführung von Versuchen zur Ermittlung der Gefrierkurven und des Auftauverhalten bzw. der Tauleistung aller wichtigen Taumittel für eine Referenztemperatur
4. **Reinheit, Lagerung und Anwendung:** Ziel war die Analyse der Reinheit, der Lagerungsanforderungen mit Fließfähigkeit (Rieselfähigkeit, Hygroskopizität) sowie der Anwendungsmöglichkeiten (trocken, vorbenetzt, gelöst)
5. **Kosten, Verfügbarkeit und Effizienz:** Ziel war die Marktanalyse hinsichtlich Einheitskosten, Verfügbarkeit und Effizienz auf Basis der benötigten Menge sowie der Ermittlung der Gesamtkosten für alternative Taumittel auf Basis des Streubedarfs
6. **Korrosion und Inhibitoren:** Ziel war die Analyse von Korrosionsprüfverfahren auf ihre Eignung, die Durchführung von Korrosionstests für die wichtigsten Taumittel und Metalle sowie der Vergleich der Korrosivität ausgewählter Grundtaumittel mit/ohne Inhibitoren
7. **Umweltauswirkungen:** Ziel war die Analyse ausgewählter Grundtaumittel, Zusatzstoffe und Verunreinigungen hinsichtlich möglicher schädlicher Auswirkungen, gesetzlicher Grenzwerte und Anwendbarkeit im Winterdienst der ÖBB (Handhabung, Kunden)
8. **Zusammenfassung der Ergebnisse:** Ziel war der Vergleich der in Frage kommenden Taumittel unter Berücksichtigung der relevanten Anforderungen mit Schwerpunkt auf Kosteneffizienz, Mehrkosten für Enteisungsmittel und notwendige Einsparungen im Hinblick auf die Verlängerung der Lebensdauer der vom Winterdienst betroffenen Anlagen der ÖBB

In Bezug auf den ursprünglichen Zeitplan der Bearbeitung von WINTERLIFE innerhalb von 24 Monaten von 09/2019 bis 08/2021 ergaben sich Verzögerungen, insbesondere infolge der weltweiten Covid-19 Pandemie und den dadurch bedingten Beschränkungen in Laborzugang und Lieferproblemen. In Abstimmung mit FFG und ÖBB-INFRA wurde der Bearbeitungszeitraum von 09/2019 bis 12/2021 verlängert. Weiters hat sich in der Bearbeitung und den Abstimmungsgesprächen gezeigt, dass für die Auftraggeber eine vertiefte Untersuchung der Korrosivität wesentlich ist. Dementsprechend wurde von den Forschungsnehmern der Schwerpunkt der Untersuchungen in diese Richtung gelegt, sowie die Entwicklung einer ganzheitlichen Bewertungsmethodik zur Berücksichtigung der Lebenszykluskosten forciert.

1.3 Methodik und Arbeitspakete

Die Suche nach möglichen Alternativen zum weltweit gebräuchlichsten Taumittel NaCl werden in der Ausschreibung mit der Schädigung von Beton und Stahl (#1) sowie dem resultierenden erhöhten Erhaltungsaufwand begründet. Die Anforderungen umfassen weiters die Unschädlichkeit für Mensch/Tiere/Pflanzen (#2) eine gleichwertige Auftauzeit (#3), möglichst geringe Ausbringungsmengen (#4) sowie einfache Handhabung und Ausbringung (#5). Nicht explizit in der Ausschreibung erwähnt sind die für alternative Taumittel ebenfalls relevanten Kriterien Kosten und Verfügbarkeit (#6), die dementsprechend in das Forschungsprojekt WINTERLIFE aufgenommen werden. Ausgehend von Stand der Technik und Wissenschaft, den nachstehend angeführten Arbeitspaketen, Methoden & Lösungsansätzen lässt sich der angestrebte Innovationsgehalt sowie die erwarteten Ergebnisse in WINTERLIFE wie folgt zusammenfassen:

- Umfassende Erhebung der Anforderungen, Streustrategien und der Winterdienstpraxis, der gestreuten Flächen und Schäden als Basis für Analyse & Optimierung
- Die chemische Analyse und quantitative Untersuchung der Korrosivität geeigneter alternativer Auftaumittel ohne/mit Zusatz von Korrosionsinhibitoren
- Eine vergleichende Untersuchung der praktischen Einsatzkriterien (Gefrierkurve, Tauleistung, Reinheit, Rieselfähigkeit etc.) für Empfehlung und Ausschreibung
- Der Nachweis der Verträglichkeit sowie Einhaltung der einschlägigen Grenzwerte samt Marktanalyse der Verfügbarkeit und Kosten der alternativen Auftaumittel
- Die ganzheitliche Betrachtung aller möglichen Alternativen auf Basis optimierter Winterdienststrategien für einen effektiven und nachhaltigen Winterdienst
- Weitergehende Empfehlungen für Materialwahl und Vorgehensweisen in Neubau und Instandsetzung für langlebige Bauwerke und geringe Lebenszykluskosten
- Nachvollziehbare, anwendbare Zusammenfassung der Ergebnisse in Präsentation und Endbericht sowie Publikation in wissenschaftlichen Journalen und auf Kongressen

Projektmanagement & Dokumentation (AP1):

Die Fragestellung und Anforderungen an WINTERLIFE implizieren eine umfassende Herangehensweise und Untersuchung, was eine entsprechende Konzeption, Koordination und Dokumentation (AP1) des Forschungsprojektes erfordert. Neben einer seit vielen Jahren bewährten Zusammenarbeit setzten die Forschungsnehmer daher auf eine lösungsorientierte Herangehensweise mit stringentem Projekt- und Zeitmanagement als Basis einer erfolgreichen Abwicklung in Bezug auf Zeit, Kosten und geplanter Inhalte.

Winterdienstpraxis & Streumittel ÖBB (AP2):

Die Optimierung von Beschaffung und Einsatz nicht aggressiver Auftaumittel erfordert neben deren grundsätzlicher Eignung vor allem eine umfassende Erhebung der Anforderungen, der Streustrategien und der Winterdienstpraxis der ÖBB. Die stichprobenartige Erhebung der verwendeten Baumaterialien und auftretenden Schäden sowie betroffenen Verkehrsfläche ist demgemäß ebenfalls von Relevanz (#1). Vorbehaltlich neuer Erkenntnisse werden derzeit vor allem Potenziale in der Verwendung nicht aggressiver Taumittel durch Zusatz von Korrosionsinhibitoren (#1) sowie einem sparsamen Einsatz durch optimierte Streustrategien gesehen. Weitere Möglichkeiten mit Potenzial sind die Wahl geeigneter Bauweisen und Instandsetzungsstrategien.

Korrosionswirkung alternativer Taumittel (AP3):

Heute enthalten nahezu alle Betone Zusatzmittel, mit denen Betoneigenschaften gezielt gesteuert werden können. Ein wichtiges Ziel für Zuschläge ist der Korrosionsschutz. Die Wirkung einiger Zusatzmittel wurde meist rein empirisch bestimmt und es fehlen noch weitgehend wissenschaftlich begründete Kenntnisse. Korrosionsschutz ist aber nicht nur wichtig bei der Herstellung des Betons, sondern auch beim Ausbringen von Taumitteln auf die benutzte Betonoberfläche. Besonders durch chloridhaltige Taumittel wird die Betonoberflächen stark angegriffen und es entsteht Lochfraßkorrosion. Durch Hydrolyse entstehen Oxonium-

Ionen, die das Elektrolyt im Loch ansäuern. Durch den abgesenkten pH-Wert erhöht sich das freie Korrosionspotential und damit die Korrosionsgeschwindigkeit ($\text{FeCl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeClOH} + \text{H} + \text{Cl}^-$). Daneben gibt es auch andere chemische Angriffe mit lösender und treibender Wirkung. Die Auswirkungen der Taumittel auf Beton werden in WINTERLIFE über entsprechende Recherchen abgebildet.

In diesem Arbeitspaket sollen die gängigen Auftaumittel (NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 , CMA, K_2CO_3 u.a.m.) in Bezug auf ihre Korrosivität getestet werden. Sodann soll die Wirkung von Korrosionsinhibitoren (z.B. Acetate, organische Amine, Zuckerderivate, u.a.m.), auf das Korrosionsbild bestimmt werden. Dabei sind nicht nur chemische Passivierungsreaktionen von Bedeutung (Deckschichtbildner) sondern auch der Eingriff in die Kinetik der Korrosion (z.B. Destimulation durch eine Verlangsamung der Chlorid-gesteuerten Korrosion). Bewährte Untersuchungen sind potentiometrische Methoden aber auch ex-situ Oberflächenmethoden. In WINTERLIFE wurden zusätzliche zu den quantitativen Korrosionsversuchen Oberflächenuntersuchungsmethoden getestet: Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS), Fourier Transform Infrarotspektroskopie (FTIR), Raman Spektroskopie und Röntgendiffraktion (XRD). Damit lassen sich in der Oberfläche Änderungen in den Ionenkonzentrationen und Oxidationsprodukte nachweisen. Mikroskopische Methoden wie Raman-Mikroskopie und Rasterkraftmikroskopie (AFM), Rasterelektronenmikroskopie (ESEM) und 3D-Laserscan Techniken ermöglichen eine Ortsauflösung von Effekten als Basis für eine quantitative Beschreibung. Daneben können auch zeitabhängige Messungen durchgeführt werden, um die Kinetik der Inhibitoren besser zu verstehen.²

Einsatzkriterien Taumittel & Ausschreibung (AP4):

Im Rahmen des AP4 sollen die technischen Einsatzkriterien für ausgewählte Taumittel über Laborversuchen analysiert werden. Diese Kriterien umfassen u.a. die drei wesentlichen Eigenschaften (a) Gefrierpunktverlauf, (b) Tauleistung fester oder flüssiger Taumittel und (c) Rieselfähigkeit von festen Taumitteln. Weitere Kriterien sind Reinheit und Feuchtegehalt (#3, #4, #5).³ Im Rahmen der Ermittlung des Gefrierpunktverlaufs wird der Gefrierpunkt von Lösungen mit unterschiedlicher Konzentration des Taumittels festgestellt. So kann für jedes Taumittel ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Konzentration und Gefrierpunkt hergestellt werden. Dies ist notwendig, um Einsatzgrenzen von Taumitteln und maximal taubare Schneemenge zu ermitteln. Zudem können die abgeleiteten Gefrierkurven für die Analyse der klimatischen Randbedingungen (Temperatur, Niederschlag) des Wiedergefrierens verwendet werden.

Bei der Ermittlung der Tauleistung werden feste oder flüssige Taumitteln auf definierte Eisflächen bei einer festgelegten Temperatur aufgebracht und die abgetaute Sole in Abhängigkeit von Einwirkzeit und Streumenge ermittelt. Neben dem makroskopischen Eisplatten sollen in einem innovativen Ansatz mittels Cryo-Fotogrammetrie die Wechselwirkungen zwischen Eiskristallen und Salzkristallen/Sole in sehr kleinen Probenmengen beobachtet werden, um die Kinetik der Taumechanismen besser zu verstehen. So können eindeutige Zusammenhänge zwischen Temperatur, Einwirkzeit und der sich ergebenden Tauleistung hergestellt werden. Bei entsprechender Versuchswiederholung für unterschiedliche Einwirkdauer und Temperaturen lässt sich ein universelles Tauleistungsmodell für beliebige Taumittel berechnen. Sind zudem die Kosten für ein Taumittel bekannt, so kann auch die monetäre Tauleistung ermittelt werden. Diese ist als die Masse an Eis definiert, die bei einer bestimmten Temperatur pro Zeiteinheit und eingesetzter Geldmenge getaut werden kann. Dementsprechend lassen sich alternative Taumittel in Bezug auf ihre technische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit mit bewährten Taumitteln (z.B. NaCl) vergleichen (#3 #4).

Die Rieselfähigkeit von festen Taumitteln ist ein wesentliches Kriterium sowohl für eine längere Silolagerung, als auch eine gleichmäßige Ausbringung ohne Verklumpung (#5). Wechselnde Temperatur- und Feuchtebedingungen im Silo oder Lagerboxen können dazu beitragen, dass sich Taumittel verfestigen und dann nur mehr mit erheblichem mechanischem Aufwand lösen lassen. Die standardisierten Versuche mit der Auslaufbox nach Sonntag erlauben den Nachweis der Rieselfähigkeit von Taumitteln je nach Feuchte

² vgl. Dhairveegan, P. et al. (2016)

³ vgl. Hofko, B. et al. (2016)

bzw. Lagerungsbedingungen ohne bzw. mit Zusatzstoffen (z.B. Antbackmittel Ferrocyanid, Korrosionsinhibitoren etc.) im Vergleich zu üblichen Taumitteln. Basierend auf der Erfahrung der TU Wien lassen sich auf Basis dieser Versuche wechselnde klimatische Bedingungen und Lagerung aller Arten von Taumitteln praxisnahe simulieren, wodurch den Auftraggebern unangenehme Überraschungen erspart bleiben. Weiters werden im Forschungsprojekt WINTERLIFE in AP4 routinemäßig die Reinheit, der Bestandteil an unlöslichen Bestandteilen (wesentlich für Soleherstellung) sowie Feuchtegehalt und Sieblinie ermittelt. Alle genannten Versuche sind an der TU Wien etabliert bzw. entwickelt, validiert und regelmäßig Auftraggeber durchgeführt worden. Der Großteil dieser Verfahren hat mittlerweile Eingang in die Richtlinien (RVS) gefunden und findet bereits in Ausschreibungen Verwendung. Zusammenfassend erlauben die in AP4 genannten Methoden daher eine effiziente Bewertung von den entwickelten Taumittel(kombinationen) ohne/mit Zusatzstoffen unter Berücksichtigung der Einsatzbedingungen und Ressourcen (#3 #4 #5).

Kosten & Umweltverträglichkeit Taumittel (AP5):

Die Fragen nach der Unschädlichkeit für Mensch/Tiere/Pflanzen (#2) erfordern entsprechende Nachweise bzw. die Einhaltung entsprechender Grenzwerte (Normen und Gesetze) sowie Empfehlungen aus der Literaturrecherche. Ein wesentlicher Baustein dazu sind die Erhebungen der bisherigen Streustrategien und Streumengen für die Erstellung eines Mengengerüsts der Immissionsmengen und sich daraus ergebenden Belastungen. Die Erhebung der Kosten und Verfügbarkeit (#6) alternativer Taumittel ist ebenfalls wesentlicher Bestandteil in WINTERLIFE und erfolgt auf Basis einer Marktanalyse. Zusammen mit den Ergebnissen aus der Korrosionsuntersuchungen (#1) sowie den Einsatzkriterien Auftauzeit (#3), Ausbringungsmengen (#4) sowie Lagerung und Handhabung (#5) ist eine Gesamtbetrachtung alternativer Taumittel möglich. Aufbauend auf bisherige Analysen können darüber hinaus konkrete Empfehlungen für die Ausschreibung und Beschaffung alternativer Taumittel gegeben werden.

Einsatzstrategien & Umsetzung Winterdienst (AP6):

Die Optimierung der Winterdienst-Strategien (WD-Strategien) unter Verwendung der gefundenen/entwickelten umweltverträglichen und nicht-aggressiver Taumittel erlaubt die Ausarbeitung konkreter Empfehlungen für Winterdienst, Streumittelwahl, Streumengen und Beschaffung (AP6). Der Nachweis möglichst geringer Ausbringungsmengen, einer einfachen Handhabung, einem effizienten Einsatz und geringer Kosten kann dementsprechend aus der Gegenüberstellung mit den bisherigen Winterdienststrategien erfolgen. Die umfassenden Erfahrungen der Forschungsnehmer erlauben zudem konkrete Empfehlungen für das weitere Vorgehen im Winterdienst mit Hinweisen für die Anwendung (#1 #2 #3 #4 #5 #6). Die anschauliche Zusammenfassung von WINTERLIFE mit Endbericht, Präsentation und Publikation macht die Ergebnisse nachvollziehbar und erlaubt eine Folgeabschätzung für den Einsatz alternativer Taumittel sowie die konkrete Umsetzung in die Winterdienstpraxis der ÖBB.

Die Forschungsnehmer haben bei der Durchführung von WINTERLIFE die erforderliche Sorgfalt angewendet und haben sich bemüht unter Ausnutzung des neuesten Standes von Wissenschaft und Technik sowie unter Verwertung der eigenen Kenntnisse und Erfahrungen das bestmögliche Ergebnis zu erzielen. Ausgehend von den angeführten allgemeinen Vorgaben und Zielsetzungen geht es im betreffenden Forschungsvorhaben um eine inhaltlich und methodisch selbstbestimmte Vorgehensweise zur Erlangung wissenschaftlicher Erkenntnisse. Wesentlicher Bestandteil der Forschung sind Literaturstudium, Experiment und Diskurs zum Forschungsgegenstand. In diesem Sinne erfolgte auf Basis der Zwischenergebnisse sowie in enger Zusammenarbeit und Abstimmung mit ÖBB-INFRA eine Verlagerung der angeführten Inhalte und Arbeitsschwerpunkte nach Maßgabe der Erfordernisse. Wie die Analysen und Recherchen sowie die Abstimmung mit dem Auftraggeber ÖBB-INFRA gezeigt haben, war die Verlagerung des Aufwandes in Richtung Korrosionsversuche (vgl. Kap. 3.4) von entscheidender Bedeutung. Weiters war für die Beurteilung der Alternativen die Entwicklung einer geeigneten Methodik mit Gegenüberstellung der Mehrkosten von Alternativen zu dem Nutzen aus einer Verlängerung der Lebensdauer wesentlich (vgl. Kap. 2.3) die erst eine Gegenüberstellung und Bewertung erlauben (Kap. 3.6).

1.4 Kurzübersicht Literaturanalyse

Im Winterdienst hat die Bewertung der verschiedenen Eigenschaften alternativer Taumittel stets oberste Priorität. Im Allgemeinen lassen sich die Veröffentlichungen in Primärliteratur, die Ergebnisse tatsächlicher Labor- und Feldtests liefert, und Sekundärliteratur, die auf einer Zusammenstellung von Ergebnissen aus früheren Forschungsarbeiten beruht, unterteilen. Die Literaturrecherche in WINTERLIFE diente dem Ziel, Grundtaumittel, Zusätze und Verunreinigungen bzw. Produkte aus diesen zu identifizieren. Darüber hinaus mussten zusätzliche Kriterien, die über die bereits bekannten Kriterien und etablierten Prüfverfahren hinausgehen, identifiziert werden⁴. Wie die Übersicht gezeigt hat, gibt es eine große Anzahl von Veröffentlichungen über verschiedene Eigenschaften von Enteisungsmitteln. Da die Prüfverfahren jedoch weitgehend unterschiedlich sind und nur eine begrenzte Anzahl von Taumitteln einbezogen wurde, bleibt ein ganzheitlicher Vergleich und eine Entscheidung für verschiedene Anwendungsbereiche auf dieser Basis methodisch schwierig und von praktisch begrenztem Wert.

So veröffentlichten Chappelow⁵ eine der einflussreichsten frühen Arbeiten, in der die Anforderungen an Taumittel nach dem Stand der Technik definiert wurden: Eisschmelze, Eispenetration, Verträglichkeit mit Materialien wie Metallen und Beton sowie weitere technische und ökologische Parameter. Es wurden Labortestmethoden zur Bewertung der oben genannten Anforderungen entwickelt (SHRP H-205.1 bis H-205.12) und bestehende Testmethoden (ASTM und EPA) bewertet. Fischel⁶ befasste sich mit den Auswirkungen von Taumitteln auf Chlorid- und Acetatbasis, insbesondere im Hinblick auf deren chemische Verunreinigungen, Umweltauswirkungen und Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Es wurde eine Matrix erstellt, die alle Vor- und Nachteile der verschiedenen Enteisungsmittel enthält, von der benötigten Streumenge bis zu den Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit. Abschließend wurde darauf hingewiesen, dass bei der Auswahl von Taumitteln, die den Anforderungen eines zufriedenstellenden Winterdienstes entsprechen, bestimmte technische und ökologische Kompromisse eingegangen werden müssen.

In einer neueren Veröffentlichung des National Cooperative Highway Research Program⁷ wurden frühere Erkenntnisse zusammengefasst und rationale Entscheidungsrichtlinien in allen relevanten Bereichen aufgestellt, wobei auch die Schädigung von Stahlbeton und die Korrosion von Stahl und anderen Metallen berücksichtigt wurden. Zur Bewertung der Korrosion als Massenverlust wurde eine leicht veränderte elektrochemische Technik (Linear Polarization Resistance - LPR) verwendet. Trotz sehr geringer Korrosionsraten auf Stahl, die einen Vergleich verschiedener Taumittel erschweren, erwiesen sich Taumittel auf Acetatbasis als etwas weniger korrosiv als solche auf Basis von Chlorid. Andere Metalle wie Kupfer, Messing oder Aluminiumlegierungen zeigten bei LPR höhere Korrosionsraten.

Casey⁸ untersuchten die Verwendung von Inhibitoren, um die Korrosionsraten zu verringern, und gaben eine Bewertung ihrer Umweltauswirkungen ab. Bei den meisten der eingesetzten Inhibitoren handelte es sich um fertige Handelsprodukte, wobei die chemische Zusammensetzung nicht Teil der Untersuchung war. Die Studie befasste sich auch mit den Unterschieden zwischen den üblicherweise verwendeten Laborkorrosionstestmethoden und der fehlenden Verknüpfung von Laborergebnissen mit der Korrosion bei der realen Anwendung von Taumitteln. Laurinavicius⁹ konzentrierte sich auf die Hauptaufgabe, das Auftaumögen. Neben den üblichen Enteisungsmitteln auf Chloridbasis (NaCl, CaCl₂, MgCl₂) wurden Mittel auf Acetat- und Formiatbasis sowie verschiedene Mischungen untersucht. Bei der Betrachtung der Expositionszeiten bei verschiedenen Temperaturen zeigte sich, dass die Auftaukapazität bei niedrigeren Temperaturen abnimmt. Taumittel mit niedrigeren Gefrierpunkten sind daher in kälteren Regionen eher von Vorteil.

⁴ vgl. Hoffmann, M. et al. (2010 – 2020); Hofko, B. (2015, 2016);

⁵ vgl. Chappelow, C.C. et al. (1992)

⁶ vgl. Fischel, M. (2001)

⁷ vgl. NCHRP (2007)

⁸ vgl. Casey, P. C. et al. (2014)

⁹ vgl. Laurinavicius, A. et al. (2016)

Die Literaturrecherche und Marktuntersuchung deutet darauf hin, dass alle verfügbaren Produkte auf unterschiedlichen Mischungen von Grundtaumitteln, Additiven und Verunreinigungen beruhen und auf dieser Grundlage bewertet werden können. Grundtaumittel sind chemische Elemente, die den Gefrierpunkt von Wasser herabsetzen und so die Enteisung ermöglichen bzw. das Gefrieren verhindern. Additive sind zusätzliche Bestandteile zur Verbesserung der Lagerfähigkeit (Antibackmittel), zur Verbesserung der Sichtbarkeit (Farbgebung) oder zur Verringerung der Korrosionswirkung (Inhibitoren). Verunreinigungen sind unerwünschte Bestandteile aus dem Produktionsprozess, die keinen oder einen negativen Einfluss z.B. auf die Betonfestigkeit (Sulfat) oder das Grundwasser (Metalle) haben sowie Rückstände beim Mischen von Solen (z.B. Gesteinsmehl) hinterlassen.

Natriumchlorid (NaCl) ist aufgrund des Verhältnisses von Kosten, Verfügbarkeit und Tauleistung das in Österreich und Europa am häufigsten verwendete auftauende Streumittel (Eutektikum ~23,5 m%, -22,0°C). NaCl wird mit einer Reinheit von 97-99,5 m% geliefert und kann trocken (FS0), als Feuchtsalz und als reine Sole (FS100) ausgebracht werden. Calciumchlorid (CaCl₂) zeigt eine vergleichbare Gefrierkurve mit einem niedrigeren Gefrierpunkt (Eutektikum ~31,2 m%, -55,0°C). CaCl₂ ist stark hygroskopisch, leicht ätzend und wird in der Regel in Form von Flocken mit 77 m% Reinheit (CaCl₂•2H₂O) oder in einigen Fällen vakuumverpackt in Form von Pellets mit 95-99% Reinheit geliefert. Daher wird CaCl₂ in der Regel in Form von Sole allein oder zusammen mit NaCl eingesetzt. Magnesiumchlorid (MgCl₂) weist ein Eutektikum mit ~21,3 m% und einem Gefrierpunkt von -34,0 C auf und wird gewöhnlich mit einer Reinheit von 47 m% (MgCl₂•6H₂O) geliefert, da es noch hygroskopischer ist. Sowohl CaCl₂ als auch MgCl₂ sind als Taumittel geeignet und werden in der Regel alleine oder zusammen mit NaCl (trocken) in Form von Sole eingesetzt. Trotz ausreichender Verfügbarkeit ist die Verwendung von CaCl₂ und MgCl₂ im Winterdienst stark rückläufig, was auf die höheren Kosten (das 1.5 bis 2.5 fache), die Hygroskopizität sowie die berichtete Korrosivität und Wirkungen auf Beton zurückzuführen ist.¹⁰

Natriumacetat (C₂H₃NaO₂) und Kaliumacetat (C₂H₃KO₂) werden aufgrund ihrer geringeren Korrosivität und dem Eutektikum (~23,3 m%, -18,0 °C bzw. ~49 m%, -60 °C) sowie ihrer Hygroskopizität fallweise auf Flughäfen zur Enteisung verwendet. Calciummagnesiumacetat CMA ist als wässrige Lösung (Eutektikum (~32,5 m%, -27,5 °C) erhältlich und wurde als Enteisungsmittel und später als "Feinstaubkleber" massiv gefördert (EU - LIFE, LIFE+ Projekte). Aufgrund der geringeren Enteisungswirkung, der schlechten Anwendbarkeit und vor allem der verminderten Griffbarkeit sowie der extrem hohen Kosten (das 8-10fache im Vergleich zu NaCl) wird der Einsatz von CMA im Winterdienst derzeit nicht als echte Alternative angesehen. Kaliumcarbonat (K₂CO₃) ist stark alkalisch, enthält weder Chlor noch Natriumchlorid und hat eine gute Auftauwirkung (Eutektikum ~39,5 m%, -36,5 °C). Außerdem sind die Auswirkungen auf die Umwelt weniger nachteilig und die Korrosivität ist geringer. Daher wird Kaliumcarbonat in ausgewählten Fällen vor allem bei Salzstreuungsbeschränkungen eingesetzt, wobei der Hauptnachteil in den hohen Kosten (5-8 mal) und der begrenzten Lagerfähigkeit im Vergleich zu NaCl besteht.

Alkohole werden aufgrund ihres sehr tiefen Gefrierpunktes fallweise als Zusätze in geschlossenen Systemen zur Vermeidung eines Gefrierens oder einer lokalen Enteisung eingesetzt, finden aber kaum im Winterdienst eine Verwendung. Zuckerderivate (C_{xx}H_{yy}O_{zz}) haben eine vergleichsweise flache Gefrierkurve und gute Löslichkeit, werden aber aufgrund der Kosten und geringen Tauwirkung kaum eingesetzt. Darüber hinaus gelten diese als wirksames Korrosionsschutzmittel. Die Literaturanalyse zeigt, dass eine Kombination mit NaCl vielversprechend ist, weshalb diese Kombination in WINTERLIFE weiter untersucht wird. Stickstoffhaltige Enteisungsmittel wie Harnstoff CO(NH₂)₂ oder Ammoniumsulfat (NH₄)₂SO₄ sind ebenfalls weniger korrosiv, werden aber wegen ihrer hohen Kosten und ihrer geringen Enteisungseffizienz nur selten eingesetzt. Zusammenfassend lässt sich auf Basis der Literaturanalyse sagen, dass das größte Potenzial derzeit in der Kombination von primären Enteisungsmitteln (z. B. NaCl) in Verbindung mit Korrosionsinhibitoren gesehen wird. Eine vertiefte Analyse für den jeweiligen Anwendungsfall zusammen mit geeigneten Ausbringungsstrategien (selektiv & präventiv) und baulichen Maßnahmen wird dabei in allen Fällen zu empfehlen sein.

¹⁰ vgl. Laurinavicius, A. et al. (2016)

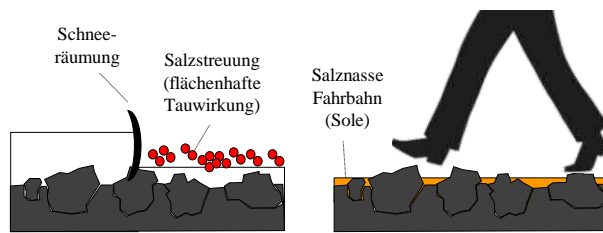
2 Grundlagen Taumittel

2.1 Wirkung abstumpfender und auftauender Streumittel

Abstumpfende Streustoffe wirken durch ihre Einbettung in die verbleibende Schneedecke (Weißräumung) was die Reibung von Fahrbahnen und Gehwegen rein mechanisch erhöht. Sie werden in typischen Körnungen von 2-8 mm und Streumengen von 150 – 200 g/m² ausgebracht. Je nach Qualität und Verfügbarkeit ergeben sich Kosten von 15-35 €/t. Der verbleibende Splitt ist einzukehren und zu entsorgen. Stellt man die Liegedauer gegenüber zeigt sich, dass Splitt im Gegensatz zur Streuung mit Feuchtsalz (≥ 30% Sole → ≥ FS30) bzw. reiner Solestreueung (FS100) bereits nach wenigen Überrollungen ausgetragen ist und nicht mehr zur Verfügung steht. Der Vorteil von Splitt gegenüber von Salz liegt daher in seiner sofortigen Wirkung. Diese hält jedoch mit Ausnahme von Gehsteigen, Bahnsteigen bzw. Straßen sehr geringer Verkehrsbelastung nicht lange an. Weiters haben eine Reihe von Untersuchungen¹¹ gezeigt, dass Salzstreueung vor allem in Immissionsschutzgebieten (Luft) umweltfreundlicher und effizienter ist und daher den Stand der Technik an Straßen mit größeren Verkehrsmengen darstellt und gilt in der Form auch weitgehend für Bahnsteige und Gehwege. Fallweise ist auch die Splittstreueung auch in Kombination mit der Salzstreueung eine Alternative.

Auftauende Streumittel erzielen ihre Wirkung durch Erniedrigung des Gefrierpunktes, wodurch der verbleibende Schnee flächig geschmolzen wird (Schwarzräumung). Durch auftauende Streumittel entsteht daher in der Folge eine Lösung, die auch bei Temperaturen unter 0°C flüssig bleibt¹². Die Ausbringung in Österreich erfolgt entweder trocken (NaCl), in Form von Sole mit Wasser (20% NaCl bzw. 20 – 30% CaCl₂) bzw. standardmäßig über den Streuteller als Mischung von trockenem Salz (NaCl) und NaCl – Sole mit 20% Konzentration in Streumengen zwischen 5 bis 40 g/m² (Feuchtsalz). In WINTERLIFE liegt der Schwerpunkt auf auftauenden Streumitteln, weshalb auf diese in der Folge im Detail eingegangen wird.¹³

Salzstreueung (NaCl) 5-40 g/m² (ca. 110-130 €/t)



Vorteile Salz

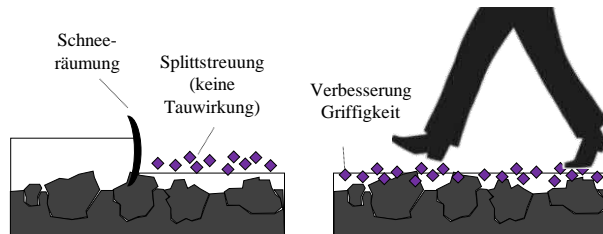
- 👉 Wirkung flächig
- 👉 Griffigkeit dauerhaft erhöht
- 👉 Umweltbelastung begrenzt
- 👉 Keine mechan. Schäden
- 👉 Für mittel/starken Verkehr

Nachteile Salz

- 👎 Dauer Tauvorgang
- 👎 Korrosive Wirkung
- 👎 Kurze Lebensdauer Anlagen
- 👎 Wirkung Grundwasser

→ Effizienter Einsatz für alle Arten von Verkehrsflächen, korrosiv

Splittstreueung (Korn 4/8) 100-150 g/m² (ca. 15-35 €/t)



Vorteile Splitt

- 👉 Wirkung lokal, sofort
- 👉 Sofortwirkung Eisglätte
- 👉 Keine mechan. Schäden
- 👉 Für geringen Verkehr

Nachteile Splitt

- 👎 Mechanische Schäden
- 👎 Geringe Liegedauer
- 👎 Feinstaubbildung
- 👎 Probleme ohne Schnee

→ Effizienter Einsatz bei geringem Verkehr & Gehwegen, Bahnsteigen

Liegedauer auftauende/abstumpfende Streumittel

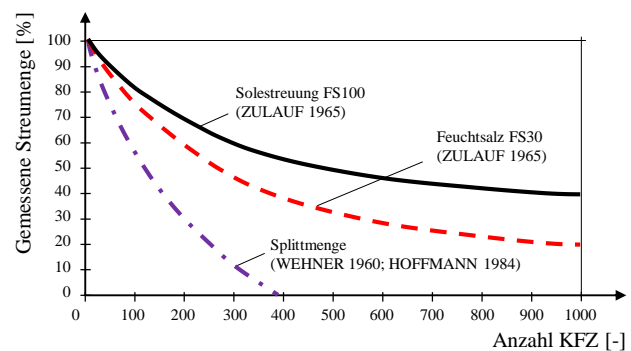


Abbildung 1: Gegenüberstellung Splittstreueung (Weißräumung) VS Salzstreueung (Schwarzräumung)

¹¹ vgl. Ruess, B. (1998)

¹² vgl. Durth, W. et al. (2004)

¹³ vgl. Hoffmann, M. (2016; 2017)

2.2 Winterdienstpraxis ÖBB

Die Vorbereitungen für den Winterdienst erfolgen bereits einige Monate vor Winterbeginn und umfassen die Vorbereitung der Einsatzpläne, die Überprüfung der Schneeräumgeräte und der Weichenheizung. Die ÖBB investiert jährlich rund 40 Mio. € in den Winterdienst zur Gewährleistung eines schnellen und sicheren Bahnverkehrs. Rund 5.000 km Streckennetz sowie 1.100 Stationen werden maschinell bzw. per Hand geräumt. Weiters werden 6.420 Brücken und 197 Kilometer Lawinen- und Steinschlagschutz auf die Wintertauglichkeit kontrolliert. Entscheidend für die Einsatzkräfte sind die Wetterprognosen basierend auf dem betriebseigenen Wetter-Vorwarnsystem mit lokalen Vorhersagen von Schneehöhe, Wind und Temperatur. Die rasche Beseitigung von Eis und Schnee mit abstumpfenden und auftauenden Streumitteln hat für die ÖBB zur Gewährleistung von Kunden- und Rechtssicherheit eine hohe Priorität. Der Winterdienst wird in der überwiegenden Anzahl an Stationen durch beauftragte Dienstleister mit Rahmenverträgen (z.B. Maschinenring, lokale Dienstleister) durchgeführt. In Abbildung 2 sind dazu ausgewählte Impressionen aus der Winterdienstpraxis der ÖBB im Bereich der Bahnsteige dargestellt.

Streumittel & Ausbringung:

- Nach Möglichkeit erfolgt eine Räumung der Verkehrsflächen vor der Streuung
- Vor allem an untergeordneten Stationen geringer Frequenz und auf Gehwegen kommen abstumpfende Streumittel je nach lokalen Erfordernissen/Bestimmungen zum Einsatz
- An höherrangigen Verkehrsflächen, Bahnhöfen und Bahnsteigen erfolgt überwiegend ein Einsatz auftauender Streumittel – fallweise zusammen mit Splitt (Eisglätte)
- Die Ausbringung auftauender Streumittel erfolgt vielfach manuell aufgrund der kleinteiligen Anordnung der Verkehrsflächen
- Insbesondere auf Vorplätzen und größeren Flächen auch maschinelle Räumung und Streumittelausbringung je nach Zugänglichkeit (Parkplätze, Verkehrsflächen vor Bahnhöfen etc.)
- Derzeit keine explizite Anordnung zur Verwendung bestimmter Taumittel – überwiegend NaCl, aber auch Einsatz von Alternativen (MgCl₂, CaCl₂, Sno-N-Ice etc.)
- Die Beschaffung der Streumittel (meist Splitt und NaCl) erfolgt durch die AN Winterdienst und ist in den Rahmenvertrag eingepreist – Aufwand alternativer Streumittel an AG weitergegeben
- Für den Winterdienst auf Bahnsteigen ist aus Sicherheitsgründen eine vertiefte Schulung zur Sicherstellung der besonderen Fachkenntnisse sowie Absolvierung einer Prüfung erforderlich

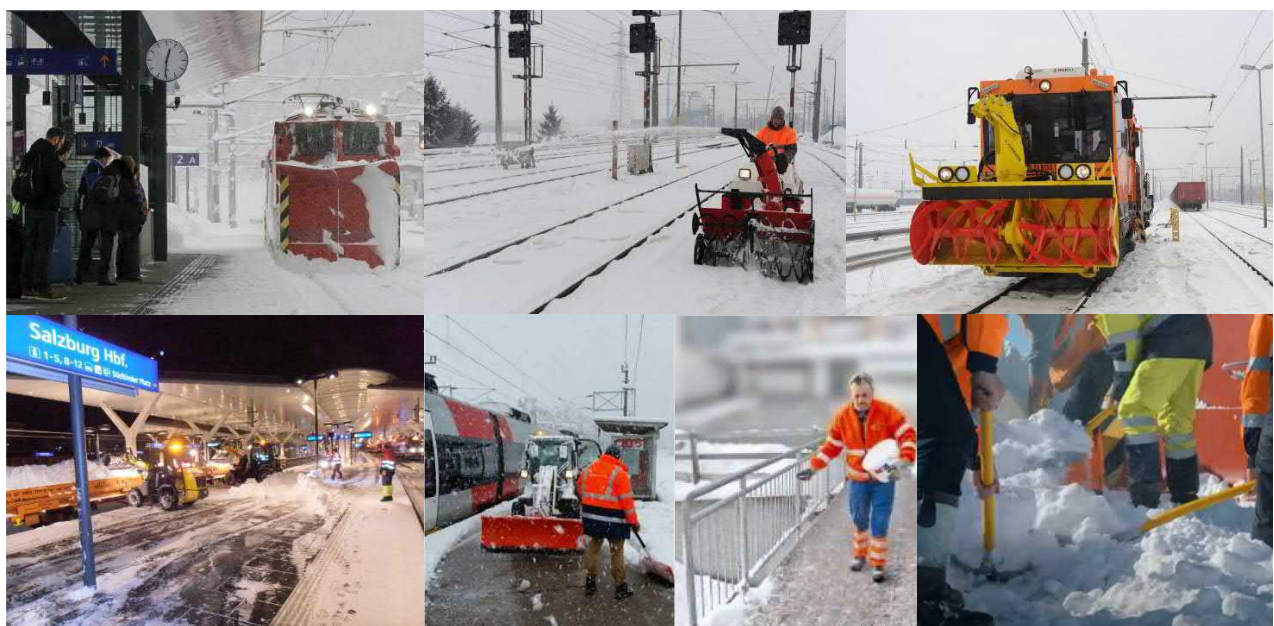


Abbildung 2: Ausgewählte Impressionen aus der Winterdienstpraxis der ÖBB (Quelle: ÖBB, Maschinenring)

2.3 Kriterien und Bewertung Taumittel

Wie in Kap. 1.2 beschrieben ist die Auswahl eines geeigneten Taumittels eine zukunftsbezogene Investitionsentscheidung mit unmittelbaren (z.B. Kosten, Eignung, Handhabung, Tauwirkung), mittelbaren (z.B. Kundensicherheit, Umwelt) und langfristigen Auswirkungen (z.B. Korrosion Anlagen). Eine rationale Entscheidung solcher mehrdimensionalen Fragestellungen erfordert einen systematischen Bewertungsansatz, welcher die angeführten Ziele über Kriterien und Indikatoren präzisiert. In Österreich kommen für vergleichbare Fragestellungen regelmäßig Nutzen-Kosten Untersuchungen (NKU) zur Anwendung, die in der Folge kurz vorgestellt und auf ihre Eignung für den konkreten Anwendungsfall beurteilt werden:

- **Wirkungsanalyse (WA):** Zusammenstellung aller relevanten Auswirkungen qualitativ und quantitativ in Tabellenform ohne definiertes Entscheidungskalkül aber mit verbaler Abwägung und Bewertung. Der Ansatz ist als Überblick und Argumente-Bilanz geeignet, die Abwägung ist aber stark subjektiv
- **Nutzwertanalyse (NWA):** Schwer quantifizierbare Auswirkungen werden über einen Bewertungsschlüssel in ein Punkte- oder Notensystem transformiert, gewichtet und zu einer Gesamtpunktzahl oder Note aggregiert. Für das Ergebnis sind die Wahl der Kriterien und die Gewichtung entscheidend
- **Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA):** Dieser Ansatz ist ähnlich der NWA auf Kriterien und Gewichtungen aufgebaut, wobei diese aber quantifizierten Kosten gegenübergestellt werden. Das Entscheidungskalkül der KWA ist der Quotient aus schwer quantifizierbarem Nutzen und definierten Kosten.
- **Nutzen-Kosten-Analyse (NKA):** Dieser Ansatz verfolgt eine vollständige Monetarisierung aller Auswirkungen mit Gegenüberstellung der Nutzen und Kosten als Verhältnis oder Differenz von diesen. Der Ansatz funktioniert gut, wenn alle Auswirkungen unmittelbar quantifizierbar sind.
- **Lebenszykluskostenanalyse (LZKA):** Darin werden die quantifizierten und monetarisierten Effekte in der Lebensdauer diskontiert gegenübergestellt und über Barwert bzw. Annuität bewertet. Der Ansatz eignet sich insbesondere dann, wenn Auswirkungen über eine längere Zeitperiode zu betrachten sind.

Ausgehend von den Zielsetzungen und Aufgaben von WINTERLIFE sowie den Ergebnissen der Recherchen und bisherigen Forschungsprojekte der beteiligten Partner wurde eine zweistufige Vorgehensweise mit Nutzwertanalyse für die Vorauswahl und eine vertiefte Betrachtung auf Basis der Versuchsergebnisse für ausgesuchte Taumittel mittels Lebenszykluskosten gewählt. Ausgehend von den in den Recherchen und Marktuntersuchung identifizierten Grundtaumitteln und Produkten erfolgt eine erste Einschätzung mittels Nutzwertanalyse (NWA). Auf Basis der Recherchen erfolgt eine Kurzbeschreibung (Gewinnung, Eigenschaften, Herstellung) mit einer Einschätzung auf Basis gemeinsam erarbeiteter Gewichtung und den nachstehenden Kriterien (Abbildung 3):

1. **Ausbringung:** a) Einsatz trocken, b) Einsatz Sole, c) Lagerung und Anwendungspraxis
2. **Tauwirkung:** a) Gefrierpunkt, b) Tauleistung, c) Taumittelbedarf
3. **Kosten:** a) Einheitskosten, b) Kostenwirksamkeit, c) Verfügbarkeit
4. **Korrosion:** a) Stahl, b) Beton, c) Chrom/Zink/Kupfer
5. **Umwelt:** a) Mensch, b) Fauna, c) Flora

Bewertung		Taumittel		
Kriterien	Gewicht	Name	Note	G*N
Beschreibung:	Bedeutung der Kriterien für die Eignung als Tau-mittel in Prozent (Summe Gewicht = 100%)	Allgemeine Beschreibung des Taumittels mit - Gewinnung bzw. Herstellung - Wichtigen Eigenschaften (Dichte) - Verwendung und Bedeutung Winterdienst - Wirkung auf Mensch/Tiere/Pflanzen - Sonstiges		
#1 Ausbringung:	20%	Standard - gut geeignet	1.00	0.20
- Einsatz_trocken	5%	Salz (trocken) oder mit Sole (FSXX)	1.0	0.05
- Einsatz_Sole	5%	Solestreuung (20%) präventiv	1.0	0.05
- Lagerung/Praxis	10%	Bewährt und weltweit eingesetzt	1.0	0.10
#2 Tauwirkung:	20%	Standard - gut geeignet	2.00	0.40
- Gefrierpunkt	5%	Eutektikum (-XX°C bei YY m%)	2.0	0.10
- Tauleistung	10%	Gut (100%) = Referenz	2.0	0.20
- Taumittelbedarf	5%	Gering (100%) = Referenz	2.0	0.10
#3 Kosten	20%	Standard - günstig, wirksam, verfügbar	1.00	0.20
- Einheitskosten	5%	Sehr günstig (ca. XX €/t)	1.0	0.05
- Kosten/Wirksamkeit	10%	Sehr gute Kostenwirksamkeit	1.0	0.10
- Verfügbarkeit	5%	Sehr hohe Verfügbarkeit, viele Anbieter	1.0	0.05
#4 Korrosion	20%	Mittel bis stark korrosiv (ohne Zusätze)	3.75	0.75
- Stahl	10%	Mittel bis stark korrosiv	4.0	0.40
- Beton	5%	Betonangreifend	4.0	0.20
- Chrom/Zink/Kupfer	5%	Mittel korrosiv	3.0	0.15
#5 Umwelt	20%	Gering bis Mittel schädlich	2.25	0.45
- Mensch	10%	Schwache Reizwirkung	2.0	0.20
- Fauna	5%	Bei ausreichend Verdünnung gering	2.0	0.10
- Flora	5%	Schädlich Bäume, Pflanzen	3.0	0.15
Bewertung	100%	Kurzbezeichnung	Summe	2.00
Begründung:	Zusammenfassende Beschreibung und Bewertung der Ergebnisse bei den einzelnen Kriterien bzw. insgesamt und im Vergleich zu Alternativen			

Abbildung 3: Struktur der verwendeten Nutzwertanalyse für die Vorauswahl von Grundtaumitteln und Produkten für weitere Untersuchungen

Obwohl es eine unendliche Anzahl möglicher Auswahlkriterien für eine spezifische Bewertung gibt, haben sich die in Abbildung 4 dargestellten Kriterien als entscheidend für die Eignungsbewertung der Taumittel samt einer Abschätzung der Auswirkungen mittels Lebenszykluskostenanalyse (LZKA) erwiesen. In Bezug auf die Umweltaspekte wird zudem als Mindestkriterium vorausgesetzt, dass eine weitgehend problemlose Ausbringung im üblichen Winterdienst möglich sein muss:

Gefrierkurve: Die Gefrierkurve gibt Aufschluss über den Gefrierpunkt verschiedener Enteisungsmittelkonzentrationen bis zum Erreichen eines Maximums (Eutektikum). Beim Auftauen wird das konzentrierte Taumittel kontinuierlich verdünnt, bis eine der Umgebungstemperatur und der Gefrierkurve entsprechende Konzentration erreicht ist. Eine steilere Gefrierkurve mit einer geringeren notwendigen Konzentration (Grenzwert 1) kann daher mit der gleichen Menge an Taumittel eine größere Eismenge auftauen (Grenzwert 2).

Tauleistung: Die Auftaukapazität oder Tauleistung kann durch Auftauversuche ermittelt werden, bei denen die Menge an aufgetautem Schnee/Eis bei einer bestimmten Referenztemperatur und Expositionszeit für die gleiche Menge an Enteisungsmitteln ermittelt wird. Die Tauleistung nimmt mit niedrigeren Temperaturen ab und erreicht nach langer Exposition entsprechend der Gefrierkurve ein Maximum. Für die Anwendungspraxis in Streuumläufen oder Anwendungszyklen ist die Tauleistung eine gute Orientierungsgröße, während die aus der Gefrierkurve abgeleiteten Maximalwerte erst nach sehr langer Einwirkdauer erreichbar sind.

Taumittelbedarf: Anhand der Gefrierkurven bzw. des Auftauvermögens für eine Referenztemperatur und Expositionszeit kann die benötigte Menge eines Taumittels ermittelt werden. Bei einer höheren Gefrierkurve und einem geringeren Auftauvermögen bedeutet dies, dass eine höhere Menge an Taumittel erforderlich ist, um vergleichbare Ergebnisse für eine Alternative zu erzielen.

Rieselfähigkeit: Für den Winterdienst müssen große Mengen an Taumitteln im Voraus gelagert werden, um sie bei ungünstigen Wetterlagen ausbringen zu können. Daher ist die Fähigkeit, über einen längeren Zeitraum in Silos, Tanks und Hallen gelagert zu werden, ohne dass die Qualität und Anwendbarkeit beeinträchtigt wird, von entscheidender Bedeutung. Im Falle von Natriumchlorid ist der Feuchtigkeitsgehalt entscheidend für die Lagerfähigkeit, was der Grund für die Verwendung von Additiven (Anti-Backmittel) ist. Stark hygroskopische Taumittel ziehen aktiv Wasser aus der Umgebungsluft bis zu einer Sättigung an und können daher nur in dieser Form bzw. unter Vermeidung von Luftzutritt ohne Qualitätsverlust gelagert werden.

Reinheit: Obwohl die Ermittlung der Gefrierkurven und anderen Kriterien an prinzipiell reinen Chemikalien (99% Reinheit) vorgenommen werden, sind diese in der Regel in verschiedenen Reinheitsgraden und Feuchtigkeitsgehalten erhältlich, was für einen Kostenvergleich wichtig ist. Um nicht für einen Feuchteanteil oder Verunreinigungen zu bezahlen, sind Beschaffungskosten nur auf Basis der Reinkosten sinnvoll möglich.

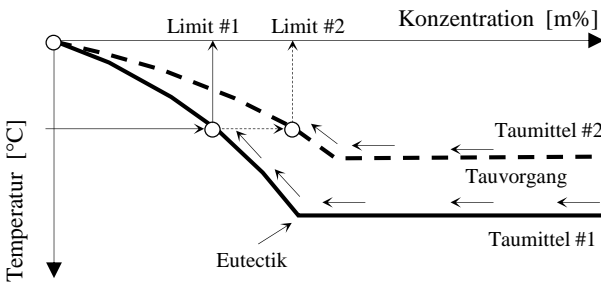
Beschaffungskosten: Abgesehen von der grundsätzlichen Verfügbarkeit in ausreichender Menge sinken die Stückpreise mit zunehmender Menge stark (Skalenerträge oder *Economy of Scales*), was ein wichtiger Faktor für die Marktanalyse und einen konsistenten Kostenvergleich ist.

Effizienz: Ausgehend von der Auftaukapazität, der Reinheit und den Kosten können die Kosten für das Auftauen einer bestimmten Menge Schnee/Eis in einer bestimmten Zeit und Temperatur ermittelt werden. Die relativen Auftaukosten geben Aufschluss über die zusätzlichen Kosten zur Erzielung vergleichbarer Ergebnisse bei vergleichbaren Bedingungen.

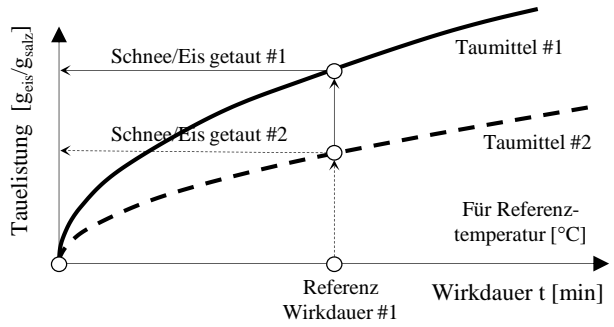
Korrosivität: Die Korrosivität basiert auf Korrosionstests und dem Massenverlust von Stahl oder anderen Metallen bei verschiedenen Grundtaumitteln ohne oder mit Zusätzen bzw. Produkten unter denselben Bedingungen und gibt Aufschluss über die negativen Auswirkungen auf die Lebensdauer. Obwohl die Alterung von Bauwerken komplex ist, wird Korrosion als einer der maßgebenden Ursachen für eine verkürzte Lebensdauer der Anlagen angesehen.

Lebenszyklus: Da die Verwendung alternativer Taumittel in der Regel zu einem erheblichen Kostenanstieg für den Winterdienst während der Nutzungsdauer führt, wird die notwendige Verlängerung der Lebensdauer für ausgewählte Eisenbahninfrastrukturen berechnet, um die zusätzlichen Kosten der Taumittel auszugleichen. Zusammen mit der Korrosivität kann abgeschätzt werden, ob diese Verlängerung der Lebensdauer infolge einer geringeren Korrosivität voraussichtlich erreichbar sein wird.

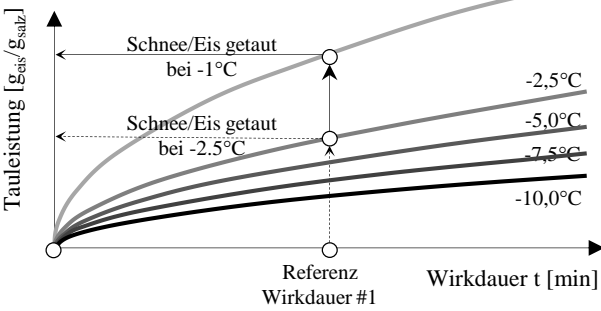
Gefrierkurven



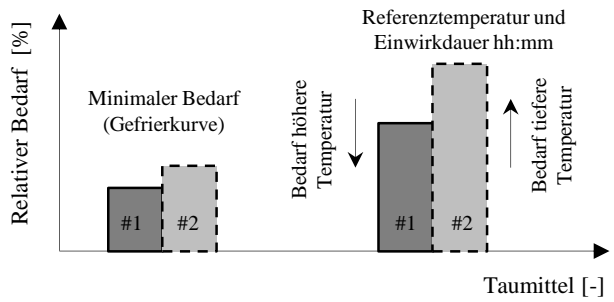
Tauleistung im Vergleich



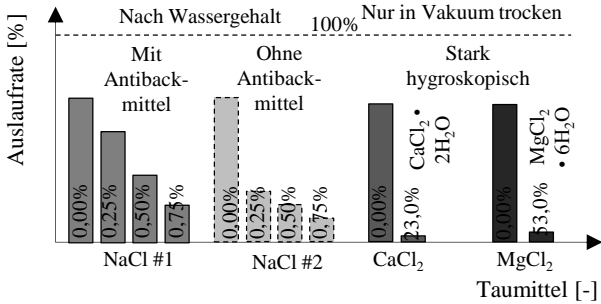
Tauleistung nach Temperatur



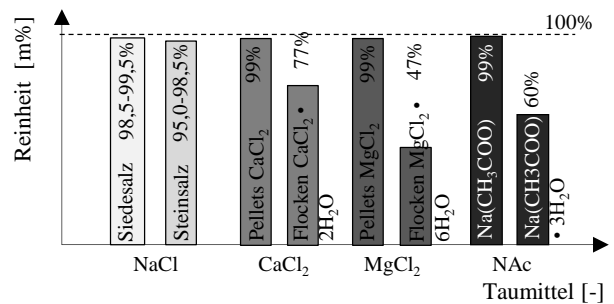
Taumittelbedarf



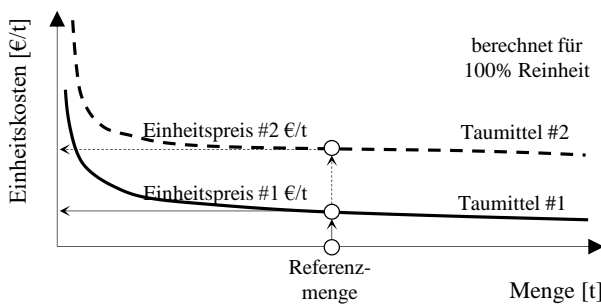
Rieselfähigkeit (trocken)



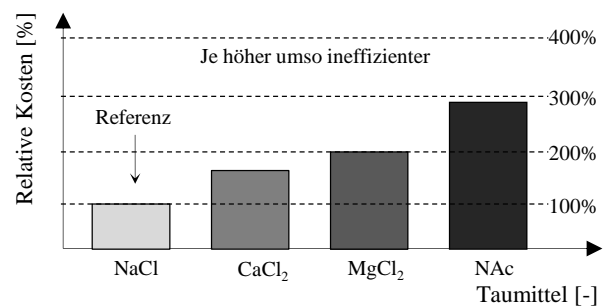
Reinheit Taumittel



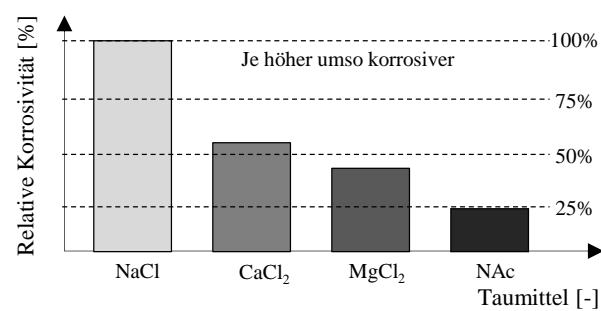
Beschaffungskosten



Effizienz – relative Kosten, gleiche Wirkung



Korrosivität



Lebenszyklus – Erfordernis längere Lebensdauer

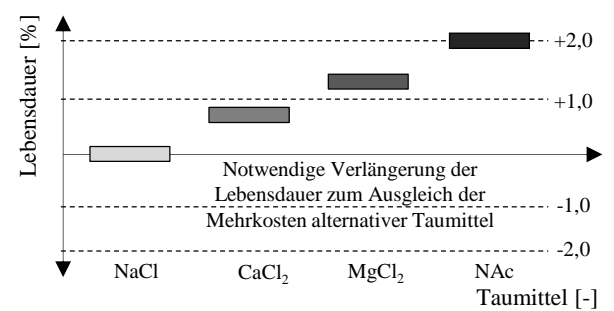


Abbildung 4: Kriterien Gefrierkurve, Tauleistung, Rieselfähigkeit, Reinheit, Kosten, Effizienz, Korrosivität, LCC

3 Forschung und Entwicklung Taumittel

3.1 Marktuntersuchung Taumittel

3.1.1 Überblick Grundtaumittel

Der nachstehende Überblick der Grundtaumittel sowie eines ausgewählten Produktes auf Basis von NaCl basiert auf einer umfassenden Recherche, der einschlägigen Literatur sowie den Ergebnissen aus vorhergehenden Untersuchungen. Die (Grund-)Taumittel sind gegliedert in anorganische Salze (Abbildung 5), organische Salze (Abbildung 6), Alkohole, Diole und Polyole (Abbildung 7) sowie organische, gemischte und sonstige Produkte (Abbildung 8) mit einer ersten Einschätzung in Form einer Nutzwertanalyse (NWA). Diese Taumittel mit den wichtigsten Eckdaten und Abkürzungen sind nachstehend angeführt:

NaCl Natriumchlorid (Sodium Chloride):

Dichte $2,16 \text{ g/cm}^3$, Eutektikum $-21,5$ bis $-22,5^\circ\text{C}$; 23,4 bis 23,6 m% (fest). Preise ca. 120 €/t (2021)*

Natriumchlorid (NaCl) wird als Siedesalz, Steinsalz oder Meersalz in großen Mengen erzeugt. Es wird in unterschiedlicher Qualität, Reinheit und Korngröße in weißen, gut wasserlöslichen Kristallen oder Salzsole geliefert. Das Salz ist gering hygroskopisch. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig. Natriumchlorid ist aufgrund der guten Ausbringbarkeit, Tauwirkung sowie Kosten weltweit der Standard im Winterdienst. Die Umweltwirkungen sind üblicherweise bei sparsamem Einsatz vertretbar. Ungünstig ist jedoch die korrosive Wirkung mit hohen Folgekosten (ohne Zusätze).

CaCl₂ Calcium(di)chlorid (Calcium Chloride):

Dichte $2,15 \text{ g/cm}^3$, Eutektikum -50 bis -55°C ; 30,5 bis 31,2 m% (fest). Preise ca. 170 €/t (2021)*

Calcium Dichlorid (CaCl₂) kommt in der Natur gelöst als Salzsole vor und bildet farb- und geruchlose stark hygroskopische Kristalle. Handelsüblich sind Pellets (98-99%) bzw. für Taumittel in Form von Flocken als Dihydrat (CaCl₂ • 2H₂O) mit 77% Reinheit bzw. Sole. Exotherm mit starker Wärmeentwicklung bei Auflösung in Wasser. Starke Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute (trocken), leicht giftig. Calciumchlorid ist stark hygroskopisch und hat einen vergleichsweise tiefen Gefrierpunkt. Wird daher meist als Sole bzw. mit NaCl ausgebracht. Es wird in machen Literaturstellen als korrosiver dargestellt und ist teurer als NaCl, führt zu Augenreizungen und wird in der Regel nur maschinell bei tiefen Temperaturen gestreut. Aufgrund der gesundheitlichen Bedenken stellt CaCl₂ für die ÖBB-INFRA derzeit keine Alternative dar.

MgCl₂ Magnesium(di)chlorid (Magnesium Chloride):

Dichte $2,32 \text{ g/cm}^3$, Eutektikum -33 bis -34°C ; 21,3 m% (fest.). Preise ca. 250 €/t (2021)*

Magnesium Dichlorid (MgCl₂) kommt im Meerwasser vor, ist das Magnesiumsalz der Salzsäure und bildet farblose, bitter schmeckende, zerfließende, hexagonale Kristalle. Handelsüblich als Taumittel in Form von Pellets (99%) oder Flocken als Hexahydrat (MgCl₂ • 6H₂O) mit 47% Reinheit bzw. Sole (staubbindend) verwendet. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig. Magnesiumchlorid ist sehr stark hygroskopisch und hat einen tieferen Gefrierpunkt. Wird daher meist als Sole bzw. mit NaCl ausgebracht. Es ist ähnlich bzw. etwas schwächer korrosiv, aber teurer als NaCl, weist aber aufgrund der Hygroskopizität staubbundene Eigenschaften auf. Nur schwache Reizwirkung und vertretbare Umweltwirkungen.

LiCl Lithiumchlorid (Lithium Chloride):

Dichte $2,07 \text{ g/cm}^3$, Eutektikum -75°C ; 25 m% (fest). Preise ca. 16.000 €/t (2021)*

Lithiumchlorid (LiCl) ist das Lithiumsalz der Chlorwasserstoffsäure und bildet farblose, stark hygroskopische Kristalle. Handelsüblich in Form von Pulver oder Sole bei extrem hohem Preis. Sehr tiefer Gefrierpunkt und gute Eignung als Frostschutzmittel. Akute Toxizität, verursacht Haut- und schwere Augenreizungen. Lithiumchlorid ist sehr stark hygroskopisch und hat einen im Vergleich extrem tiefen Gefrierpunkt und steilen Verlauf der Gefrierkurve. Wird aufgrund des extrem hohen Preises, Korrosivität und Toxizität als Kühlmittel und für Akkus, nicht aber als Streumittel verwendet. Zudem ist nur eine sehr begrenzte Verfügbarkeit gegeben.

NAC Natriumacetat (C₂H₃NaO₂, Sodium Acetate):

Dichte 1,50 g/cm³, Eutektikum -18°C; 23,3 m% (fest). Preise ca. 250 €/t (2021)*

Natriumacetat (C₂H₃NaO₂) ist das Natriumsalz der Essigsäure und bildet große, farblose gut wasserlösliche Kristalle. Wird in 99% Reinheit und als Trihydrat (Na(CH₃COO) • 3H₂O) mit 60% Reinheit hergestellt und verkauft. Das wasserfreie Salz ist hygroskopisch. Schwache bis keine Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig und weitgehend umweltverträglich. Natriumacetat wird aufgrund der guten Ausbringbarkeit, ausreichenden Tauwirkung, vertretbaren Kosten und geringen Korrosivität als Taumittel auf Flughäfen eingesetzt. Kosten, Verfügbarkeit und Wirksamkeit sind schlechter als bei NaCl, dafür gute Verträglichkeit.

KAc Kaliumacetat (CH₃CO₂K, Potassium Acetate):

Dichte 1,57 g/cm³, Eutektikum -60°C; 49 m% (fest). Preise ca. 600 €/t (2021)*

Kaliumacetat (CH₃CO₂K) ist das Kaliumsalz der Essigsäure, bildet farblose gut wasserlösliche Kristalle. Wird in 99% Reinheit hergestellt und verkauft. Das wasserfreie Salz ist hygroskopisch - geliefert als Pulver oder Kristalle. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz empfohlen, geringfügig wassergefährdend. Kaliumacetat wird aufgrund der guten Löslichkeit Ausbringbarkeit, sehr guten Tauwirkung und niedrigen Gefrierpunkt sowie geringen Korrosivität trotz höherer Kosten als Taumittel in Form von Sole auf Flughäfen eingesetzt. Kosten und Verfügbarkeit sind schlechter als bei NaCl, dafür ist es verträglicher und weniger korrosiv.

CMA Calciummagnesiumacetat (CaMg₂(CH₃COO)₆, Calcium Magnesium Acetate):

Dichte 0,72 g/cm³, Eut. -27,5°C; 32,5 m% (fest). Preise ca. 1200 €/t (2021)*

Calciummagnesiumacetat (CaMg₂(CH₃COO)₆) wird aus der Umsetzung von Dolomitmalk mit Essigsäure hergestellt und in Form von Pulver oder Pellets geliefert. CMA ist wasserlöslich, staubbindend, hygroskopisch, nicht korrosiv und gesundheitlich unbedenklich. Kann bei höherer Dosierung zu Glätte führen. Calciummagnesiumacetat hat einen niedrigeren Gefrierpunkt als NaCl, ist staubbindend, nicht korrosiv und weitgehend umweltverträglich. Hat sich aufgrund der vergleichsweise hohen Dosierung, der wesentlich höheren Kosten und Problemen mit der Griffigkeit trotz Werbung und EU-Projekten (EU-LIFE und LIFE+) nicht als Taumittel durchgesetzt.

NFO Natriumformiat (NaHCO₂ oder CHNaO₂, Sodium Formate):

Dichte 1,92 g/cm³, Eutektikum -16,0°C; 21,0 m% (fest). Preise ca. 250 €/t (2021)*

Natriumformiat (NaHCOO) ist das Natriumsalz der Ameisensäure, wird als weißes, geruchloses Pulver oder in Form einer Sole hergestellt. Es ist nicht/gering korrosiv und leicht löslich. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig. Wird als nicht korrosives Streumittel auf Flughäfen eingesetzt. Natriumformiat wird aufgrund der guten Ausbringbarkeit, ausreichenden Tauwirkung, vertretbaren Kosten und geringen Korrosivität als Taumittel auf Flughäfen eingesetzt. Kosten, Verfügbarkeit und Wirksamkeit sind schlechter als bei NaCl, dafür besteht eine etwas bessere Umweltverträglichkeit.

KFO Kaliumformiat (KHCO₂ oder CHKO₂, Potassium Formate):

Dichte 1,91 g/cm³, Eutektikum -53,0°C; 48,0 m% (fest). Preise ca. 700 €/t (2021)*

Kaliumformiat (KHCO₂) ist das Kaliumsalz der Ameisensäure, bildet farblose gut wasserlösliche Kristalle. Wird in 99% Reinheit hergestellt und verkauft. Das wasserfreie Salz ist hygroskopisch und wird als Pulver oder Kristalle geliefert. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz empfohlen, geringfügig wassergefährdend. Kaliumformiat wird aufgrund der Löslichkeit, Ausbringbarkeit, der sehr guten Tauwirkung und dem niedrigen Gefrierpunkt und Korrosivität trotz höherer Kosten als Taumittel in Form von Sole auf Flughäfen eingesetzt. Die Kosten und Verfügbarkeit sind ungünstiger als bei NaCl, dafür ist es für die Umwelt verträglicher und weniger korrosiv.

EA Ethylalkohol (C₂H₆O, Ethanol):

Dichte 0,789 g/cm³, Eutektikum -118,0°C; 93,5 m% (flüssig). Preise ca. 1900-2000 €/t (2021)*

Ethylalkohol oder Ethanol (C₂H₆O) ist der einwertige Alkohol und wird durch alkoholische Gärung erzeugt. Das flüssige Ethanol ist geschmacks- und geruchsneutral. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute. Geringfügig wassergefährdend. Ethylalkohol wird aufgrund der Löslichkeit Ausbringbarkeit, sehr guten Tauwirkung und des niedrigen Gefrierpunkts mit Zusätzen gegen Korrosion trotz der hohen Kosten als Taumittel auf Flughäfen flüssig eingesetzt. Vor allem die Kosten und teilweise die Verfügbarkeit sind schlechter als NaCl, dafür ist es deutlich weniger korrosiv.

EG Ethylenglykol (C₂H₆O₂, Ethylene Glycole):

Dichte 1,15 g/cm³, Eutektikum -46,3°C; 57,0 m% (flüssig). Preise ca. 1200-1300 €/t (2021)*

Ethylenglykol (C₂H₆O₂) ist der einfachste zweiwertige Alkohol und wird durch Addition von Wasser an Ethylenoxid erzeugt, ist zähflüssig, farblos und leicht süßlich. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute. Geringfügig wassergefährdend. Ungünstig Fauna & Flora. Basis üblicher Frostschutzmittel. Ethylenglykol wird aufgrund der Löslichkeit, Ausbringbarkeit, sehr guten Tauwirkung und des niedrigen Gefrierpunkts mit Zusätzen gegen Korrosion trotz der hohen Kosten als Taumittel auf Flughäfen eingesetzt. Kosten und Verfügbarkeit sind schlechter als bei NaCl, dafür ist es weniger korrosiv.

PG Propylenglykol (C₃H₈O₂, Propylene Glycole):

Dichte 1,10 g/cm³, Eutektikum -50,0°C; 59,0 m% (flüssig). Preise ca. 1850-1950 €/t (2021)*

Propylenglykol (C₃H₈O₂) ist eine klare, farblose, nahezu geruchlose und stark hygroskopische Flüssigkeit. Aerosole von Propylenglykol in der Luft wirken als Kondensationskeime für Nebel-Tröpfchen aus der umgebenden Luftfeuchtigkeit – was schlecht für den Winterdienst ist. Weist eine schwache Reizwirkung wie andere Alkohole auf und ist geringfügig wassergefährdend und gering korrosiv sowie ungünstig für Fauna & Flora. Propylen Glykol weist einen tiefen Gefrierpunkt und grundsätzlich eine Tauwirkung auf und ist von den Umweltwirkungen vergleichbar mit Ethylalkohol. Aufgrund der stark hygroskopischen Eigenschaften und der Nebelbildung sowie hohen Kosten aber nicht sinnvoll im Winterdienst einsetzbar.

MA Methylalkohol (CH₄O, Methanol):

Dichte 0,85 g/cm³, Eutektikum -116,0°C; 87,7 m% (flüssig). Preise ca. 400-450 €/t (2021)*

Methylalkohol (CH₄O Methanol) ist eine klare, farblose, entzündliche und leicht flüchtige Flüssigkeit mit alkoholischem Geruch. Ist eine der meisthergestellten organischen Chemikalien u.a. aus der Destillation. Methylalkohol ist giftig und kann zu Erblinden führen und ist wie andere Alkohole je nach Verdünnung geringfügig wassergefährdend und gering korrosiv. Methylalkohol weist einen tiefen Gefrierpunkt und grundsätzlich eine Tauwirkung auf. Aufgrund der Brennbarkeit, Giftigkeit für Menschen sowie negativen Umweltwirkungen ist ein Einsatz im Winterdienst nicht zielführend - der Einsatz als Treibstoff ist etabliert.

GL Glycerin (C₃H₈O₃, Glycerol, Glycerine Alcohol):

Dichte 1,27 g/cm³, Eutektikum -47,0°C; 67,0 m% (flüssig). Preise ca. 400-450 €/t (2021)*

Glycerin (C₃H₈O₃ Zuckeralkohol) ist ein dreiwertiger Zuckeralkohol bzw. eine farblose, süß schmeckende, leicht viskose Flüssigkeit und wird meist aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Guter Wasserbinder und nicht gefährdend. Verwendung als Frostschutz, nicht korrosiv. Keine negativen Auswirkungen auf Fauna & Flora. Einsatz als Kühlmittel & Futterzusatz. Glycerin wird aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, kann flüssig oder als Sole ausgebracht werden und ist gut verträglich. Nach neuen Untersuchungen u.a. im vorliegenden Forschungsprojekt WINTERLIFE wirkt es zudem als Korrosionsinhibitor, weshalb ein Einsatz mit NaCl in der Feuchtsalzstreuung denkbar ist.

KCO Kaliumcarbonat (K₂CO₃, Pottasche, Potassium Carbonate):

Dichte 2,43 g/cm³, Eutektikum -36,1°C; 40 m% (fest). Preise ca. 850-950 €/t (2021)*

Kaliumcarbonat ist das Kaliumsalz der Kohlensäure. Das weiße Pulver ist hygroskopisch und wurde früher aus Holzasche durch Auslaugen gewonnen. Kaliumcarbonat ist wenig bis gar nicht korrosiv und ist gut in Wasser löslich, wobei Wärme frei wird. Die wässrige Lösung ist stark alkalisch und für Menschen leicht

toxisch aber umweltverträglich. Kaliumcarbonat (Pottasche) wird als alternatives Taumittel mit geringer Korrosivität und guter Verträglichkeit für Pflanzen bei Salzstreuverboten eingesetzt. Die begrenzte Tauwirkung und Lagerfähigkeit sowie hohen Kosten begrenzen allerdings einen flächendeckenden Einsatz.

NH₃ Ammoniak (NH₃, Ammonia Solution):

Dichte 0,922 g/cm³, Eutektikum -49,6°C; 23,6 m% (gas, flüssig). Preise ca. 400-500 €/t (2021)*

Ammoniak (NH₃) ist eine chemische Verbindung von Stickstoff und Wasserstoff als ein stark stechend riechendes, farbloses, wasserlösliches und giftiges Gas, das zu Tränen reizt und erstickend wirkt. In flüssiger Form wirkt es als Base und ist gut mit Wasser löslich. Als Lösung mit Wasser weist es einen sehr steilen Gefrierpunktsverlauf auf. Wird zudem in industriellem Maßstab als Kühlmittel verwendet. Ammoniak in gelöster Form in Wasser weist aufgrund des Gefrierpunktverlaufes eine gute Tauwirkung auf bzw. Verhindert ein Gefrieren. Aufgrund des Geruchs und der toxischen Wirkung ist ein Einsatz im Winterdienst nicht denkbar - findet dagegen Einsatz als Kühlmittel mit Korrosionsinhibitoren.

GLC Glucose (C₆H₁₂O₆, Traubenzucker, Glucose):

Dichte 1,56 g/cm³, Eutektikum -11,2°C; 50 m% (fest). Preise ca. 230-270 €/t (2021)*

Glucose (C₆H₁₂O₆ Traubenzucker, Monosaccharid) ist ein farb- und geruchsloser Feststoff und wird meist aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Grundlage der meisten Stoffwechselprozesse und nicht gefährdend. Gering tauwirksam und nicht korrosiv. Keine negativen Auswirkungen auf Fauna & Flora. Wirkt gemäß Untersuchungen als Korrosionsinhibitor. Glucose kann trocken, flüssig oder als Sole ausgebracht werden und ist gut verträglich. Nach neuen Untersuchungen wirkt es als Korrosionsinhibitor, weshalb ein Einsatz mit NaCl in der Trocken- und Feuchtsalzstreuung denkbar ist und in der Folge untersucht wird.

SNI Sno-N-Ice (Produkt NaCl 96,2%, NaSO₄ 2,0%, KClO₂ 1,6%, MnCl₂ 0,2%):

Dichte 2,16 g/cm³, Eutektikum -21,5 bis -22,5°C; 23,5 m% (fest). Preise ca. 900-1100 €/t (2021)*

Das Produkt Sno-N-Ice wurde als Alternative zu Projektbeginn von den ÖBB-INFRA eingebracht und besteht gemäß der Analyse der TU Wien - Institut für Materialchemie im FFG Projekt WINTERLIFE zu wesentlichen Teilen aus NaCl (96,2%), NaSO₄ (2,0%), KClO₂ (1,6%), MnCl₂ (0,2%), Kohlenwasserstoff mit OH Gruppen und rotem Farbstoff. Von der Einteilung ist es ein anorganisches Taumittel mit Zusatzstoffen zur Verbesserung der Eignung bzw. Verringerung von Korrosion und Betonangriff. Hergestellt wird das Produkt in der Schweiz mit Vertrieb in Österreich. Das Produkt ist in erster Linie für die händische Ausbringung trocken gedacht und weist einen sehr hohen Preis in Relation zu anderen Taumitteln bzw. seinen Bestandteilen auf, die teilweise durch den aufwendigen Produktionsprozess (Mischung und Pelletierung) erklärbar sind. Im Gegensatz zu anderen Produkten aus der Marktuntersuchung (Kap. 3.1.1) ist das Produkt hier angeführt, da es in der vergleichbaren Weise wie die Grundtaumittel untersucht wurde.

Die Analyse der (Grund-)Taumittel (Abbildung 5 bis Abbildung 8) gibt einen Überblick über die wichtigsten tauwirksamen Substanzen und erlaubt eine Fokussierung der umfangreichen Untersuchungen in WINTERLIFE auf die vielversprechendsten Alternativen. Gleichzeitig können einzelne Substanzen wie Lithiumchlorid (LiCl), Ammoniak (NH₃) sowie einige Alkohole (EA, EG, PG, MA) aufgrund ihrer Kosten und Verfügbarkeit bzw. ihrer Umweltwirkungen und den Anforderungen des Winterdienstes der ÖBB-INFRA bereits an dieser Stelle von vertieften Untersuchungen ausgenommen werden. Andere Grundtaumittel wie CaCl₂ wurden dagegen trotz der Diskussion um die Handhabung und der Reizwirkung insbesondere für das Einsatzpersonal (in trockener Form) aufgrund ihrer allgemeinen Bedeutung als Taumittel im Winterdienst einbezogen. Weiters ist bei den angeführten Grundtaumitteln zu beachten, dass eine hohe Hygroskopizität meist dazu führt, dass die Taumittel bei Kauf nicht in hoher Reinheit (≥ 99%), sondern vielfach als Hydrat verkauft werden. Dies ist in weiterer Folge auch wesentlich für den Winterdienst, da hygroskopische Grundtaumittel entsprechende Anforderungen an die Lagerung stellen und meist nur in Form von Feuchtsalzstreuung oder Sole ausgebracht werden können.

*Alle angeführten Preise basieren auf der internationalen Marktanalyse für hinreichend große Beschaffungsmengen (>>10t) aus den Jahren 2020/2021 und können bei kleinen Mengen bzw. begrenzten Märkten signifikant höher sein.

		ANORGANISCHE SALZE					
Kriterien	Bewertung	NaCl #1, #2	CaCl ₂ #1, #2	MgCl ₂ #1, #2	LiCl	Note	G*N
		Note	Note	Note	Note		
Beschreibung:	Bedeutung der Kriterien für die Eignung als Tau-mittel in Prozent (Summe Gewicht = 100%)						
#1 Ausbringung:	20%	1.00	2.00	3.00	3.50	0.70	3.50
- Einsatz_trocken	5%	1.0	3.0	4.0	4.0	0.20	3.0
- Einsatz_Sole	5%	1.0	1.0	2.0	2.0	0.10	3.0
- Lagerung/Praxis	10%	1.0	2.0	3.0	3.0	0.30	4.0
#2 Tauwirkung:	20%	2.00	1.75	2.00	2.00	0.40	1.00
- Gefrierpunkt	5%	2.0	1.0	2.0	2.0	0.05	1.0
- Tauleistung	10%	2.0	2.0	2.0	2.0	0.20	1.0
- Taumittelbedarf	5%	2.0	2.0	2.0	2.0	0.10	1.0
#3 Kosten	20%	1.00	2.00	2.00	2.25	0.45	4.25
- Einheitskosten	5%	1.0	2.0	3.0	3.0	0.15	5.0
- Kosten/Wirksamkeit	10%	1.0	2.0	2.0	2.0	0.20	4.0
- Verfügbarkeit	5%	1.0	2.0	2.0	2.0	0.10	4.0
#4 Korrosion	20%	3.75	4.50	4.50	4.00	0.65	4.00
- Stahl	10%	4.0	5.0	5.0	3.0	0.30	4.0
- Beton	5%	4.0	5.0	4.0	4.0	0.20	4.0
- Chrom/Zink/Kupfer	5%	3.0	3.0	3.0	3.0	0.15	4.0
#5 Umwelt	20%	2.25	4.00	1.75	1.75	0.35	4.75
- Mensch	10%	2.0	5.0	2.0	2.0	0.20	5.0
- Fauna	5%	2.0	3.0	1.0	1.0	0.05	5.0
- Flora	5%	3.0	3.0	2.0	2.0	0.10	4.0
Bewertung	100%	Summe 2.00	Summe 2.85	Summe 2.45	Summe 3.50	Lithiumchlorid LiCl	Summe 3.50
Begründung:	Natriumchlorid ist aufgrund der guten Ausbringung, Tauwirkung sowie Kosten weltweit der Standard im Winterdienst. Die Umweltwirkungen sind bei sparsamem Einsatz vertretbar. Ungünstig ist jedoch die korrosive Wirkung mit hohen Folgekosten (ohne Zusätze).	Calciumchlorid ist stark hyroskopisch und hat einen vergleichsweise tiefen Gefrierpunkt. Wird daher meist als Sole bzw. mit NaCl ausgebracht. Es ist stärker korrosiv und teurer als NaCl, führt zu Augenreizungen und wird in der Regel nur maschinell bei tiefen Temperaturen gestreut.	Magnesiumchlorid ist sehr stark hyroskopisch und hat einen extrem tiefen Gefrierpunkt. Wird aufgrund des extrem hohen Preises, Korrosivität und Toxizität als Kühlmittel und für Akkus, nicht aber als Streumittel verwendet. Zudem ist nur eine sehr begrenzte Verfügbarkeit gegeben.	Lithiumchlorid ist sehr stark hyroskopisch und hat einen extrem tiefen Gefrierpunkt. Wird aufgrund des extrem hohen Preises, Korrosivität und Toxizität als Kühlmittel und für Akkus, nicht aber als Streumittel verwendet. Zudem ist nur eine sehr begrenzte Verfügbarkeit gegeben.			
Produktnahmen ohne/mit Zusätzen	Siedesalz (ohne) - viele Anbieter Steinsalz (ohne) - viele Anbieter Meersalz (ohne) - viele Anbieter Sio-N-Ice (mit) - Ein Anbieter/Hersteller	Calciumchloridpellets 99% (ohne) - viele Anbieter Calciumchloridflocken 77% (ohne) - viele Anbieter Calciumchloridsole 30% (ohne) - einige Anbieter	Magnesiumchloridpellets 99% (ohne) - viele Anbieter Magnesiumchloridflocken 47% (ohne) - viele Anbieter Magnesiumchloridsole 20%, 25% (ohne) - wenige Anbieter	Lithiumchloridpulver 99% (ohne) - Kleinstmengen - einige Anbieter Lithiumchloridsole 25% (ohne) - Kühlmittel - einige Anbieter			
Quellenlage:	Auswertung: HOFFMANN (2020) Gestis-Stoffdatenbank (2019) NCHRP REPORT 577 (2007) Hofko, B. et al. (2015, 2016) Muthumani, A. et al. (2014) Hoffmann, M. et al. (2011)	Auswertung: HOFFMANN (2020) Gestis-Stoffdatenbank (2019) NCHRP REPORT 577 (2007) Hofko, B. et al. (2015, 2016) Muthumani, A. et al. (2014) Hoffmann, M. et al. (2011)	Auswertung: HOFFMANN (2020) Gestis-Stoffdatenbank (2019) NCHRP REPORT 577 (2007) Hofko, B. et al. (2015, 2016) Muthumani, A. et al. (2014) Hoffmann, M. et al. (2011)	Auswertung: HOFFMANN (2020) Gestis-Stoffdatenbank (2019) Melinder, A. (2007)			

Abbildung 5: Nutzwertanalyse Teil 1 – Anorganische Salze (NaCl, CaCl₂, MgCl₂, LiCl)

ORGANISCHE SALZE - AZETATE				ORGANISCHE SALZE - FORMIATE										
NAC	Note	G*N	KAc	Note	G*N	NFO	Note	G*N	KFO	Note	G*N			
<p>Natriumacetat (CH₃NaO₂) ist das Natriumsalz der Essigsäure und bildet große, farblose gut wasserlösliche Kristalle mit einer spezifischen Dichte von 1,42-1,52 g/cm³. Wird in 99% Reinheit hergestellt und verkauft. Das wasserfreie Salz ist leicht hygroskopisch. Schwache bis keine Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz empfohlen, geringfügig wassergeräufend. Ausbringung i.a. als Sole</p>			<p>Kaliumacetat (CH₃KO₂) ist das Kaliumsalz der Essigsäure, bildet farblose gut wasserlösliche Kristalle mit spezifischer Dichte von 1,57 g/cm³. Wird in 99% Reinheit hergestellt und verkauft. Das wasserfreie Salz ist hygroskopisch - geliefert als Pulver oder Kristalle. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz empfohlen, geringfügig wassergeräufend. Ausbringung i.a. als Sole</p>			<p>Natriumformiat (CHNaO₂) ist das Natriumsalz der Ameisensäure, wird als weißes, geruchloses Pulver oder in Form einer Sole hergestellt und weist eine spezifische Dichte von 1,92 g/cm³ auf. Es ist nicht/gering korrosiv und leicht löslich. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig. Wird als nicht korrosives Streumittel auf Flughäfen eingesetzt.</p>			<p>Kaliumformiat (KHCO₂) ist das Kaliumsalz der Essigsäure, bildet farblose gut wasserlösliche Kristalle mit spezifischer Dichte von 1,91 g/cm³. Wird in 99% Reinheit hergestellt und verkauft. Das wasserfreie Salz ist hygroskopisch - geliefert als Pulver oder Kristalle. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz empfohlen, geringfügig wassergeräufend. Ausbringung i.a. als Sole</p>					
<p>Alternative Flughäfen</p> <p>2.50 2.0 2.0 3.0</p>	<p>0.50 0.10 0.10 0.30</p>	<p>Satz (trocken) oder mit Sole (FSX) Solestreueung (20%) präventiv An Flughäfen, Verkehrsflächen selten</p>	<p>Alternative Flughäfen</p> <p>2.75 3.0 2.0 3.0</p>	<p>0.55 0.15 0.10 0.30</p>	<p>Satz (trocken) oder mit Sole (FSX) Solestreueung (20%) präventiv An Flughäfen, Verkehrsflächen selten</p>	<p>Alternative Flughäfen</p> <p>2.50 2.0 2.0 3.0</p>	<p>0.50 0.10 0.10 0.30</p>	<p>Satz (trocken) oder mit Sole (FSX) Solestreueung (20%) präventiv An Flughäfen, Verkehrsflächen selten</p>	<p>Alternative Flughäfen</p> <p>2.75 3.0 2.0 3.0</p>	<p>0.55 0.15 0.10 0.30</p>	<p>Gut bis sehr gut geeignet Eutektikum (-18°C ca.23 m%) Mittlere Tauleistung Gering bis mittel</p>			
<p>Gut bis mittel geeignet</p> <p>3.00 3.0 3.0 3.0</p>	<p>0.60 0.15 0.30 0.15</p>	<p>Eutektikum (-18°C ca.23 m%) Mittlere Tauleistung Gering bis mittel</p>	<p>Gut bis sehr gut geeignet</p> <p>2.75 3.0 2.0 3.0</p>	<p>0.55 0.10 0.30 0.15</p>	<p>Eutektikum (-60°C ca.50 m%) Mittlere Tauleistung Gering bis mittel</p>	<p>Gut bis mittel geeignet</p> <p>3.38 3.0 3.5 3.5</p>	<p>0.68 0.15 0.35 0.18</p>	<p>Eutektikum (-16°C ca.21 m%) Geringe Tauleistung Gering bis mittel</p>	<p>Gut bis sehr gut geeignet</p> <p>2.75 2.0 3.0 3.0</p>	<p>0.55 0.10 0.30 0.15</p>	<p>Eutektikum (-53°C ca.48 m%) Mittlere Tauleistung Gering bis mittel</p>			
<p>Mittlere Kosten, wirksam, verfügbar</p> <p>3.00 3.0 3.0 3.0</p>	<p>0.60 0.15 0.30 0.15</p>	<p>Mittlere Kosten, wirksam, verfügbar Mittel (ca. 250 €/t bei 99%) Mittlere Kostenwirksamkeit Mittlere Verfügbarkeit</p>	<p>Mittlere Kosten, wirksam, verfügbar</p> <p>3.25 4.0 3.0 3.0</p>	<p>0.65 0.20 0.30 0.15</p>	<p>Sehr hohe Kosten, verfügbar Sehr hohe Kosten (ca. 600 €/t bei 99%) Mittlere Kostenwirksamkeit Gute bis mittlere Verfügbarkeit</p>	<p>Mittlere Kosten, wirksam, verfügbar</p> <p>3.00 3.0 3.0 3.0</p>	<p>0.60 0.15 0.30 0.15</p>	<p>Mittlere Kosten, wirksam, verfügbar Mittel (ca. 250 €/t bei 99%) Mittlere Kostenwirksamkeit Mittlere Verfügbarkeit</p>	<p>Hohe Kosten, wirksam, verfügbar</p> <p>3.50 4.0 3.5 3.0</p>	<p>0.70 0.20 0.35 0.15</p>	<p>Hohe Kosten (ca. 700 €/t bei 99%) Mittlere bis geringe Kostenwirksamkeit Gute bis mittlere Verfügbarkeit</p>			
<p>Wenig bis nicht korrosiv</p> <p>1.75 2.0 2.0 1.0</p>	<p>0.35 0.20 0.10 0.05</p>	<p>Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht angreifend Nicht korrosiv</p>	<p>Wenig bis nicht korrosiv</p> <p>1.75 2.0 2.0 1.0</p>	<p>0.35 0.20 0.10 0.05</p>	<p>Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht angreifend Nicht korrosiv</p>	<p>Wenig bis nicht korrosiv</p> <p>1.75 2.0 2.0 1.0</p>	<p>0.35 0.20 0.10 0.05</p>	<p>Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht angreifend Nicht korrosiv</p>	<p>Wenig bis nicht korrosiv</p> <p>1.75 2.0 2.0 1.0</p>	<p>0.35 0.20 0.10 0.05</p>	<p>Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht angreifend Nicht korrosiv</p>			
<p>Wenig bis nicht schädlich</p> <p>1.50 1.0 2.0 2.0</p>	<p>0.30 0.10 0.10 0.10</p>	<p>Wenig bis nicht schädlich Keine relevante Reizwirkung Weitgehend verträglich Weitgehend verträglich</p>	<p>Wenig bis nicht schädlich</p> <p>1.50 1.0 2.0 2.0</p>	<p>0.30 0.10 0.10 0.10</p>	<p>Wenig bis nicht schädlich Keine relevante Reizwirkung Weitgehend verträglich Weitgehend verträglich</p>	<p>Wenig bis nicht schädlich</p> <p>1.50 1.0 2.0 2.0</p>	<p>0.30 0.10 0.10 0.10</p>	<p>Wenig bis nicht schädlich Keine relevante Reizwirkung Weitgehend verträglich Weitgehend verträglich</p>	<p>Wenig bis nicht schädlich</p> <p>1.50 1.0 2.0 2.0</p>	<p>0.30 0.10 0.10 0.10</p>	<p>Wenig bis nicht schädlich Keine relevante Reizwirkung Weitgehend verträglich Weitgehend verträglich</p>			
<p>Natriumacetat C₂H₃NaO₂ Summe 2.35</p>			<p>Kaliumacetat CH₃CO₂K Summe 2.40</p>			<p>CMA CaMg₂(CH₃COO)₆ Summe 2.50</p>			<p>Natriumformiat CHNaO₂ Summe 2.43</p>			<p>Kaliumformiat KHCO₂ Summe 2.45</p>		
<p>Natriumacetat wird aufgrund der guten Ausbringbarkeit, ausreichenden Tauwirkung, vertretbaren Kosten und geringen Korrosivität als Taumittel auf Flughäfen eingesetzt. Kosten, Verfügbarkeit und Wirksamkeit sind schlechter als bei NaCl, dafür gute Verträglichkeit.</p>			<p>Kaliumacetat wird aufgrund der guten Löslichkeit Ausbringbarkeit, sehr guten Tauwirkung und niedrigen Gefrierpunkt sowie geringen Korrosivität trotz höherer Kosten als Taumittel auf Flughäfen eingesetzt. Kosten und Verfügbarkeit schlechter als bei NaCl, dafür verträglicher, weniger korrosiv.</p>			<p>Calciummagnesiumacetat hat einen niedrigeren Gefrierpunkt als NaCl, ist staubbindend, nicht korrosiv und weitgehend umweltverträglich. Hat sich aufgrund der vergleichsweise hohen Dosierung, der wesentlich höheren Kosten und Problemen mit der Griffigkeit nicht durchgesetzt.</p>			<p>Natriumformiat wird aufgrund der guten Ausbringbarkeit, ausreichenden Tauwirkung, vertretbaren Kosten und geringen Korrosivität als Taumittel auf Flughäfen eingesetzt. Kosten, Verfügbarkeit und Wirksamkeit sind schlechter als bei NaCl, dafür gute Verträglichkeit.</p>			<p>Kaliumformiat wird aufgrund der Löslichkeit Ausbringbarkeit, sehr guten Tauwirkung und niedrigen Gefrierpunkt und Korrosivität trotz höherer Kosten als Taumittel auf Flughäfen eingesetzt. Kosten und Verfügbarkeit schlechter als NaCl, dafür verträglicher, weniger korrosiv.</p>		
<p>Natriumacetat pellets 99% (ohne) - einige Anbieter Natriumacetatsohle (ohne) - wenige Anbieter CRYOTECH NACAC (ohne/mt) - Ein Anbieter</p>			<p>Kaliumacetatpulver 99% (ohne) - einige Anbieter Kaliumacetatsohle (ohne) - wenige Anbieter</p>			<p>CMA Pulver 99% (ohne) - einige Anbieter CMA Pellets 99% (ohne) - einige Anbieter</p>			<p>Natriumformiat trocken 99% (ohne) - einige Anbieter Natriumformiatsohle (ohne) - wenige Anbieter</p>			<p>Kaliumformiat trocken 99% (ohne) - einige Anbieter Kaliumformiatsohle (ohne) - wenige Anbieter</p>		
<p>Gestis-Stoffdatenbank (2019) Berg, J. et al. (2015) DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.121 Droeschner, H. (2012) Muthumani, A. et al. (2014)</p>			<p>Gestis-Stoffdatenbank (2019) NCHRP REPORT 577 (2007) FHWA (1987)</p>			<p>Gestis-Stoffdatenbank (2019) NCHRP REPORT 577 (2007) Muthumani, A. et al. (2014) Hoffmann, M. et al. (2014)</p>			<p>Gestis-Stoffdatenbank (2019) Palmer, D. A. (1987) Achkeeva, M. V. (2015)</p>			<p>Gestis-Stoffdatenbank (2019) NCHRP REPORT 577 (2007)</p>		

Abbildung 6: Nutzwertanalyse Teil 2 – Organische Salze (Azetate = NAC, KAC, CMA; Formiate = NFO, KFO)

	EA	EG	PG	MA	GL	Note	G*N
Alkohole	Ethylalkohol (C₂H₆O) ist der einwertige Alkohol mit spezifischer Dichte von 0,789 g/cm ³ . Wird durch alkoholische Gärung erzeugt. Das flüssige Ethanol ist geschmacks- und geruchsneutral. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute. Geringfügig wassergerähdend. Gering korrosiv und nicht gefährdend. Verwendung als Frostschutz, nicht korrosiv. Keine negativen Auswirkungen auf Faune & Flora.	Ethylenglykol (C₂H₆O₂) ist der einfachste zweiwertige Alkohol mit einer Dichte von 1,15 g/cm ³ . Wird durch Addition von Wasser an Ethylenoxid erzeugt. zähflüssig, farblos und leicht süßlich. Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute. Geringfügig wassergerähdend. Gering korrosiv und mit Zusätzen auf Flughäfen eingesetzt. Ungünstig für Faune & Flora. Basis üblicher Frostschutzmittel.	Propylen Glykol (C₃H₈O₂) ist eine klare, farblose, nahezu geruchslos und stark hygroskopische Flüssigkeit mit einer Dichte von 1,1 g/cm ³ . Aerosole von Propylenglykol in der Luft wirken als Kondensationskeime für Nebeltröpfchen aus der umgebenden Luftfeuchtigkeit - schlecht für WD. Schwache Reizwirkung wie andere Alkohole. Geringfügig wassergerähdend. Gering korrosiv. Ungünstig für Faune & Flora.	Methylalkohol (CH₃O) ist eine klare, farblose, entzündliche und leicht flüchtige Flüssigkeit mit alkoholischem Geruch mit einer Dichte von 0,85 g/cm ³ . Ist eine der meisthergestellten organischen Chemikalien u.a. aus der Destillation. Methylalkohol ist giftig und kann zu Erblindungen führen. Geringfügig wassergerähdend. Gering korrosiv. Ungünstig für Faune & Flora. Einsatz als Treibstoff.	Glycerin (C₃H₈O₃ zuckeralkohol) ist ein dreiwertiger Zuckeralkohol bzw. eine farblose, süß schmeckende, leicht viskose Flüssigkeit mit einer Dichte von 1,27 g/cm ³ . Wird meist aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt. Guter Frostschutz, nicht korrosiv. Keine negativen Auswirkungen auf Faune & Flora. Einsatz als Kühlmittel & Futterzusatz.	Note	G*N
Diole	Alternative Flughäfen Keine Trockenstreuung möglich Sole oder rein mit Zusatzstoffen An Flughäfen, Verkehrsflächen	Alternative Flughäfen Keine Trockenstreuung möglich Sole oder rein mit Zusatzstoffen An Flughäfen, Verkehrsflächen	Keine Alternative - Nebelbildend Keine Trockenstreuung möglich Sole oder rein mit Zusatzstoffen Hygroskopisch, nebelbildend	Keine Alternative - giftig Keine Trockenstreuung möglich Theoretisch möglich Aufgrund Giftigkeit kein Einsatz	Alternative (mit NaCl denkbar) Keine Trockenstreuung möglich Sole oder mit NaCl denkbar Derzeit nicht eingesetzt	3.25 5.0 2.0 3.0	0.65 0.25 0.10 0.30
Polyole	Gut als Taumittel geeignet Eutektikum (-118°C ca. 93,5 m%) Hohe Tauleistung (hohe Konzentration) Mittel auf und flacher Gefrierkurve	Gut als Taumittel geeignet Eutektikum (-46°C ca. 57 m%) Mittlere Tauleistung Mittel auf und flacher Gefrierkurve	Nur begrenzt als Taumittel geeignet Eutektikum (-50°C ca. 59 m%) Mittlere Tauleistung Mittel auf und flacher Gefrierkurve	Nur begrenzt als Taumittel geeignet Eutektikum (-116°C ca. 88 m%) Mittlere Tauleistung Mittel auf und flacher Gefrierkurve	Gut als Taumittel geeignet Eutektikum (-47°C ca. 67 m%) Mittlere bis geringe Tauleistung Mittel auf und flacher Gefrierkurve	2.00 1.0 2.0 3.0	0.40 0.05 0.20 0.15
EA	Mittlere Kosten, wirksam, verfügbar Mittlere Kosten (ca. 400 €/t bei 99%) Geringe Kostenwirksamkeit Gute Verfügbarkeit	Hohe Kosten, wirksam, verfügbar Hohe Kosten (ca. 1000 €/t bei 99%) Sehr geringe Kostenwirksamkeit Gute Verfügbarkeit	Hohe Kosten, wirksam, verfügbar Hohe Kosten (ca. 1000 €/t bei 99%) Sehr geringe Kostenwirksamkeit Gute Verfügbarkeit	Mittlere Kosten, wirksam, verfügbar Mittlere Kosten (ca. 400 €/t bei 99%) Geringe Kostenwirksamkeit Gute Verfügbarkeit	Geringe Kosten, wirksam, verfügbar Geringe Kosten (ca. 200 €/t bei 99%) Geringe Kostenwirksamkeit Gute Verfügbarkeit	3.50 4.0 4.0 2.0	0.70 0.20 0.40 0.10
EG	Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht angreifend Wenig korrosiv	Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht angreifend Wenig korrosiv	Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht angreifend Wenig korrosiv	Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht korrosiv Wenig bis nicht angreifend Wenig korrosiv	Korrosionsinhibitor Wirkt als Korrosionsinhibitor Nicht angreifend Wirkt als Korrosionsinhibitor	2.00 2.0 2.0 2.0	0.40 0.20 0.10 0.10
PG	Gering bis Mittel schädlich Schwache Reizwirkung Bei ausreichend Verdünnung gering Schädlich Bäume, Pflanzen	Gering bis Mittel schädlich Schwache Reizwirkung Bei ausreichend Verdünnung gering Schädlich Bäume, Pflanzen	Gering bis Mittel schädlich Schwache Reizwirkung Bei ausreichend Verdünnung gering Schädlich Bäume, Pflanzen	Mittel bis hoch schädlich Giftig für Menschen Giftig für Tiere Schädlich Bäume, Pflanzen	Sehr gut verfügbar Verträglich Verträglich Futtermittel Verträglich Bäume, Pflanzen	2.25 2.0 2.0 3.0	0.45 0.20 0.10 0.15
MA	Ethylalkohol (C₂H₆O) Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂) Propylen Glykol (C ₃ H ₈ O ₂) Methylalkohol (CH ₃ O) Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)	Ethylalkohol (C₂H₆O) Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂) Propylen Glykol (C ₃ H ₈ O ₂) Methylalkohol (CH ₃ O) Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)	Ethylalkohol (C₂H₆O) Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂) Propylen Glykol (C ₃ H ₈ O ₂) Methylalkohol (CH ₃ O) Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)	Ethylalkohol (C₂H₆O) Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂) Propylen Glykol (C ₃ H ₈ O ₂) Methylalkohol (CH ₃ O) Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)	Ethylalkohol (C₂H₆O) Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂) Propylen Glykol (C ₃ H ₈ O ₂) Methylalkohol (CH ₃ O) Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)	Summe 2.60	Summe 2.80
GL	Ethylalkohol (C₂H₆O) Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂) Propylen Glykol (C ₃ H ₈ O ₂) Methylalkohol (CH ₃ O) Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)	Ethylalkohol (C₂H₆O) Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂) Propylen Glykol (C ₃ H ₈ O ₂) Methylalkohol (CH ₃ O) Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)	Ethylalkohol (C₂H₆O) Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂) Propylen Glykol (C ₃ H ₈ O ₂) Methylalkohol (CH ₃ O) Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)	Ethylalkohol (C₂H₆O) Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂) Propylen Glykol (C ₃ H ₈ O ₂) Methylalkohol (CH ₃ O) Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)	Ethylalkohol (C₂H₆O) Ethylenglykol (C ₂ H ₆ O ₂) Propylen Glykol (C ₃ H ₈ O ₂) Methylalkohol (CH ₃ O) Glycerin (C ₃ H ₈ O ₃)	Summe 2.20	Summe 3.45
Note	Ethylalkohol wird aufgrund der Löslichkeit Ausbringbarkeit, sehr guten Tauwirkung und des niedrigen Gefrierpunkts mit Zusätzen gegen Korrosion trotz der Kosten als Taumittel auf Flughäfen eingesetzt. Kosten und Verfügbarkeit schlechter als NaCl, dafür weniger korrosiv.	Ethylenglykol wird aufgrund der Löslichkeit Ausbringbarkeit, sehr guten Tauwirkung und des niedrigen Gefrierpunkts mit Zusätzen gegen Korrosion trotz der Kosten als Taumittel auf Flughäfen eingesetzt. Kosten und Verfügbarkeit schlechter als NaCl, dafür weniger korrosiv.	Propylen Glykol weist einen tiefen Gefrierpunkt und grundsätzlich eine Tauwirkung auf und ist von den Umweltwirkungen vergleichbar mit Ethylalkohol. Aufgrund der hygroskopischen Eigenschaften und der Nebelbildung sowie hohen Kosten aber nicht sinnvoll einsetzbar.	Methylalkohol weist einen tiefen Gefrierpunkt und grundsätzlich eine Tauwirkung auf. Aufgrund der Brennbarkeit, Giftigkeit für Menschen sowie negativen Umweltwirkungen ist ein Einsatz im Winterdienst nicht zielführend - vielversprechender ist der Einsatz als Treibstoff	Glycerin wird aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, kann flüssig oder als Sole ausgebracht werden und ist gut verfügbar. Nach neuen Untersuchungen wirkt es als Korrosionsinhibitor, weshalb ein Einsatz mit NaCl in der Feuchtsalzstreuung denkbar ist.	3.25 5.0 2.0 3.0	
G*N	0.65 0.25 0.10 0.30	0.65 0.25 0.10 0.30	0.95 0.25 0.20 0.50	0.95 0.25 0.20 0.50	0.95 0.25 0.20 0.50	0.65 0.25 0.10 0.30	

Abbildung 7: Nutzwertanalyse Teil 3 – Alkohole, Diole, Polyole (EA, EG, PG, MA, GL)

(AN-)ORGANISCH - SONSTIGE PRODUKTE														
KCO	Note	G*N	NH3	Note	G*N	Glc	Note	G*N	Sno-N-Ice	Note	G*N	Alternative-Zielsetzung	Note	G*N
Kaliumcarbonat (K2CO3 Pottasche) ist das Kaliumsalz der Kohlensäure. Das weiße Pulver mit einer Dichte von 2,43 g/cm3 ist hygroskopisch und wurde früher aus Holzasche durch Auslaugen gewonnen. Kaliumcarbonat ist wenig bis gar nicht korrosiv und ist gut in Wasser löslich, wobei Wärme frei wird. Die wässrige Lösung ist stark alkalisch. Die Lagerfähigkeit ist begrenzt, für Menschen leicht toxisch aber unumweltschädlich.	3.00	0.60	Keine Alternative - giftig, stark riechend	4.75	0.95	Alternative (mit NaCl denkbar)	3.00	0.60	Standard - gut geeignet	2.25	0.45	#1 Ausbringung:	1.00	0.20
Trockenstreumung taum möglich	4.0	0.20	Keine Trockenstreumung möglich	5.0	0.25	Trockenstreumung möglich	2.0	0.10	Salt (trocken)	1.0	0.05	k.A.	1.0	0.05
Typischer Einsatzbereich	2.0	0.10	Theoretisch möglich	4.0	0.20	Sole oder mit NaCl denkbar	2.0	0.10	Nicht vorgesehen - aber möglich	2.0	0.10	k.A.	1.0	0.05
Fallweise statt NaCl (Pflanzenschutz)	3.0	0.30	Aufgrund Giftigkeit kein Einsatz	5.0	0.50	Derzeit nicht eingesetzt	4.0	0.40	Marginaler Marktanteil - Nischenprodukt	3.0	0.30	k.A.	1.0	0.10
Als Taumittel geeignet	3.00	0.60	Gut als Taumittel geeignet	1.00	0.20	Begrenzt als Taumittel geeignet	4.00	0.80	Standard - gut geeignet*	2.00	0.40	#2 Tauwirkung	1.00	0.20
Hohe Kosten (ca. 300 €/t bei 99%)	3.0	0.15	Eutektikum (-49.6°C ca. 23.6 m%)	4.0	0.05	Eutektikum (-11,2°C ca. 50 m%)	2.0	0.10	Eutektikum (-21 bis -22,5°C bei 23 m%)	2.0	0.10	k.A.	1.0	0.05
Mittlere Taulistung	3.0	0.30	Hohe Taulistung	1.0	0.10	Sehr geringe Taulistung	4.0	0.40	Gut (100%) = Referenz	2.0	0.20	k.A.	1.0	0.10
Mittel aufgrund flacher Gefrierkurve	3.0	0.15	Gut aufgrund steller Gefrierkurve	1.0	0.05	Schlecht - sehr flache Gefrierkurve	4.0	0.20	Gering (100%) = Referenz	2.0	0.10	k.A.	1.0	0.05
Hohe Kosten, wirksam, verfügbar	4.00	0.80	Mittlere Kosten, wirksam, verfügbar	2.50	0.50	Geringe Kosten, wirksam, verfügbar	3.00	0.60	Sehr teuer, wirksam, verfügbar	4.00	0.80	#3 Kosten	1.00	0.20
Hohe Kosten (ca. 300 €/t bei 99%)	5.0	0.25	Mittlere Kosten (ca. 450 €/t bei 99%)	4.0	0.20	Geringe Kosten (ca. 250 €/t bei 99%)	2.0	0.10	Sehr teuer (ca. 1050 €/t)	4.0	0.20	k.A.	1.0	0.05
Schlechte Kostenwirksamkeit	4.0	0.40	Gute Kostenwirksamkeit	2.0	0.20	Geringe Kostenwirksamkeit	4.0	0.40	Sehr geringe Kostenwirksamkeit	4.0	0.40	k.A.	1.0	0.10
Gute bis mittlere Verfügbarkeit	3.0	0.15	Gute Verfügbarkeit	2.0	0.10	Gute Verfügbarkeit	2.0	0.10	Nur ein Anbieter, verfügbar	4.0	0.20	k.A.	1.0	0.05
Wenig korrosiv, nicht angreifend	1.25	0.25	Mittel bis stark korrosiv	3.25	0.65	Korrosionsinhibitor	1.00	0.20	Verringert durch Inhibitoren	2.25	0.45	#4 Korrosion	1.00	0.20
Wenig bis nicht korrosiv	1.0	0.10	Mittel bis stark korrosiv	4.0	0.40	Wenig bis nicht korrosiv	1.0	0.10	Gering	2.0	0.20	k.A.	1.0	0.10
Wenig bis nicht angreifend	1.0	0.05	Leicht angreifend	2.0	0.10	Nicht angreifend	1.0	0.05	Hoher Sulfatanteil - leicht treibend	3.0	0.15	k.A.	1.0	0.05
Wenig korrosiv	2.0	0.10	Mittel korrosiv	3.0	0.15	Wenig bis stark korrosiv	1.0	0.05	gering	2.0	0.10	k.A.	1.0	0.05
Leichtschädlich, ok für Pflanzen	2.50	0.50	Mittel bis hoch schädlich	4.50	0.90	Gut verträglich	1.25	0.25	Gering bis Mittel schädlich	2.25	0.45	#5 Korrosion	1.00	0.20
Mittlere Reizwirkung	3.0	0.30	Giftig für Menschen	5.0	0.50	Verrätlich	1.0	0.10	Schwache Reizwirkung	2.0	0.20	k.A.	1.0	0.10
Mittlere Reizwirkung	3.0	0.15	Giftig für Tiere	5.0	0.25	Verträglich	1.0	0.05	Begleitstoffe schädlich	2.0	0.10	k.A.	1.0	0.05
Für Pflanzen verträglich	1.0	0.05	Düngewirkung, Eutrophierung Gewässer	3.0	0.15	Weitgehend verträglich	2.0	0.10	Schädlich Bäume, Pflanzen	3.0	0.15	k.A.	1.0	0.05
Kaliumcarbonat K₂CO₃	Summe 2.75	Ammoniak NH₃	Summe 3.20	Glucose C₆H₁₂O₆	Summe 2.45	Sno-N-Ice mit NaCl	Summe 2.55	Alternative Winterlife	Summe 1.00					
Kaliumcarbonat (Pottasche) wird als alternatives Taumittel mit geringer Korrosivität und guter Verträglichkeit für Pflanzen bei Salzstreuboten eingesetzt. Die begrenzte Tauwirkung und Lagerfähigkeit sowie hohen Kosten begrenzen allerdings einen flächendeckenden Einsatz.	Ammoniak (ohne) - viele Anbieter	Ammoniak in wässriger Form weist einen tiefen Gefrierpunkt bei steilem Gefrierpunktverlauf und damit eine gute Tauwirkung auf. Aufgrund des Geruchs und der toxischen Wirkung ist ein Einsatz im Winterdienst nicht denkbar - findet dagegen Einsatz als Kühlmittel mit Korrosionsinhibitoren.	Glucose wird aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, kann trocken, flüssig oder als Sole ausgebracht werden und ist gut verträglich. Nach neuen Untersuchungen wirkt es als Korrosionsinhibitor, weshalb ein Einsatz mit NaCl in der Trocken- und Feuchtsalzstreuung denkbar ist.	Sno-N-Ice ist ein Produkt eines Herstellers basierend auf NaCl mit Zusatzstoffen zur Verringerung von Korrosion. Das Produkt ist in erster Linie für die händische Ausbringung trocken gedacht und weist einen sehr hohen Preis in Relation zu anderen Taumitteln auf	Gesucht ist das optimale Taumittel für den WINTERdienst mit effektiven, nachhaltigen und nicht aggressiven Taumitteln sowie optimalen LIFE Cycle Costs der Bahn...									
Ammoniak (ohne) - viele Anbieter	Ammoniak (ohne) - viele Anbieter	Ammoniak (ohne) - viele Anbieter	Glucose (ohne) - viele Anbieter	Sno-N-Ice (mit) - Ein Anbieter/Hersteller	Noch kein Hersteller	Bei Erfolg und Nachfrage Herstellung in Lizenz problemlos	Analyse in FFG - Projekt Winterlife HOFFMANN - TU WIEN (2020)	Analyse in FFG - Projekt Winterlife HOFFMANN - TU WIEN (2020)	Analyse in FFG - Projekt Winterlife HOFFMANN - TU WIEN (2020)					

Abbildung 8: Nutzwertanalyse Teil 4 – (An-)Organische & sonstige Produkte (NH3, Glc, KCO, Produkt, offen)

3.1.2 Überblick Marktprodukte

In einer Marktuntersuchung geht es um die Erhebung, Analyse und Interpretation aktueller Marktbedingungen und deren Entwicklungen. Zielsetzung, Methodik und Vorgehensweise einer Marktuntersuchung sind maßgebend durch die Art des Marktes sowie die Zielsetzungen bzw. Fragestellungen bestimmt. Die Ziele der Marktforschung bestehen in einer Gewinnung entscheidungsrelevanter Informationen um sich als neuer Anbieter am Markt zu platzieren, als bestehender Anbieter seine Marktposition zu verbessern oder die Beschaffungsvorgänge als Kunde zu verbessern. Die Marktuntersuchung im FFG-Forschungsprojekt WINTERLIFE dient in erster Linie dazu, die Verfügbarkeit und Kosten der Grundtaumittel sowie der von Produkten (Grundtaumittel+Zusätze+Verunreinigungen) für den Winterdienst der ÖBB-INFRA zu erfassen. Weiters geht es um eine generelle Einschätzung der Marktsituation und der Entwicklungstrends in Hinblick auf die Herstellbarkeit von Produkten mit definierten Anforderungen durch den Auftraggeber.

Die generelle Marktsituation ist durch wenige große Anbieter sowie eine Vielzahl an nationalen oder lokalen Händlern für die gängigeren Taumittel gekennzeichnet. Für gewerbliche Winterdienstleister sowie Private stellt der Bezug von Taumitteln über Baumärkte und lokale Händler (z.B. Salz List) eine relevante Bezugsquelle dar. Für Forschungseinrichtungen mit Bedarf nach Grundtaumitteln hoher Reinheit erfolgt der Zugang üblicherweise über Spezialanbieter mit entsprechend höheren Einheitskosten (z.B. Sigma Aldrich). Die größeren Anbieter sind neben ihrer Funktion als Händler zudem auch vielfach Produzenten mit direkten Lieferverträgen zu großen Abnehmern (z.B. Salinen, Salzwerke SWS). Entsprechend seltener verwendete Produkte und Zusätze sind bei entsprechendem Vorlauf aber auch im internationalen Handel vor allem aus China günstig zu beziehen, da viele Abnehmer (chemische Industrie) auch dort ihren Sitz haben. Die wesentlichen Eigenschaften und Kosten der Grundtaumittel aus der Marktuntersuchung wurden bereits behandelt (Kap. 3.1.1). Nachstehend werden nun ausgewählte Produkte (Abbildung 9) kurz vorgestellt:

Sno-N-Ice Fest, rosa Pellets,	Produkt (NaCl 96,2%, NaSO₄ 2,0%, KClO₂ 1,6%, MnCl₂ 0,2%): Preise ca. 900-1100 €/t (2021)
Safecote Flüssig,	Produkt (Reststoff aus der Zuckerproduktion): Preise ca. 900-1100 €/t (2021)*
Iceslicer Fest, Körner, Pellets	Produkt (90% NaCl, CaCl₂, KCl, Mineralien): Preise ca. 300-400 €/t (2021)*
Snow Joe Fest, Körner, Pellets	Produkt (NaCl, CMA, Inhibitor, Farbe): Preise ca. 300-400 €/t (2021)*
Eco Ice Melt Fest, Körner, Pellets	Produkt (NaCl, Safecote, Inhibitoren): Preise ca. 400-500 €/t (2021)*
Pro Powermelt Fest, Körner, Pellets	Produkt (NaCl, CaCl₂, KCl): Preise ca. 300-400 €/t (2021)*
Tru Melt Fest, Körner, Pellets	Produkt (NaCl, MgCl₂, Farbe): Preise ca. 500-600 €/t (2021)*
Caliber Flüssig	Produkt (MgCl₂, Wasser, Inhibitor): Preise ca. 300-400 €/t (2021)*

Wie die Ergebnisse der Marktuntersuchungen sowie Produktanalysen zeigen, gibt es eine große Anzahl an Anbietern für Grundtaumittel bzw. insbesondere Natriumchlorid als das am meisten verwendete Taumittel im Winterdienst. Während Unternehmen mit großem Taumittelbedarf je nach Anwendungsbereich (Straße, Schiene, Flughafen) vielfach zu Grundtaumitteln fallweise mit Zusatz von Korrosionsinhibitoren greifen, werden fertige Produkte (meist Sackware) überwiegend an gewerbliche Kleinanwender und Private verkauft. Die Anbieter solcher Produkte werben vielfach mit den herausragenden Eigenschaften ihrer Produkte, die sich auf Basis der Zusammensetzung nur sehr begrenzt nachvollziehen lassen. Für die Beschaffung im Rahmen des Vergabegesetzes ist daher insbesondere auf eine neutrale Anforderungsbeschreibung, wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Bieter und die Vermeidung von Monopolsituationen abzustellen.

Übersicht ausgewählte Produkte aus der Marktuntersuchung



Sno-N-Ice (>90% NaCl, Inhibitoren):

- NaCl (96,2%), NaSO₄ (2,0%), KClO₂ (1,6%), MnCl₂ (0,2%), OH-Gruppen, Roter Farbstoff

https://www.sno-n-ice.ch/fileadmin/Dateien/PDF/2040_SDB_Sno-N-Ice_d.pdf

Hersteller (Preis ca. 1.000 €/t):

STEINMANN ZÜRICH AG, Neunbrunnenstrasse 40, Postfach, 8052 Zürich, Tel. +41 44 307 18 18, info@sno-n-ice.ch; <https://www.sno-n-ice.ch/de>

Produktvideo:

<https://www.youtube.com/watch?v=UsarP4b1k3U>



Iceslicer (90% NaCl, CaCl, KCl, Mineralien):

- Natürlich für erhöhte Tauwirkung
- Reduziert Korrosion

<https://envirotechservices.com/wp-content/uploads/2014/04/Ice-Slicer-Elite-GHS-SDS-1.pdf>

Hersteller/Anbieter (Preis ca. 300 - 400 €/t):

EnviroTech Services, Inc. 910 54th Ave, Suite 230 Greeley, CO 80634; (970) 346-3900; <https://envirotechservices.com/deicing-anti-icing/bulk-granular-deicing-products/iceslicer/>

Produktvideo:

<https://www.youtube.com/watch?v=8DrApsbAbi0>



Eco ICE Melt (NaCl, Safecote, Inhibitoren):

- Meersalz, Inhibitoren, Verunreinig
- Reduziert Korrosion & Salzverluste
- Ausbringung trocken/Sole

<https://safecote.com/wp-content/themes/ideaschildtheme/pdf/EcolceMelt.pdf>

Hersteller (Preis ca. 400 – 500 €/t):

Safecote Ltd, Winnington Hall, Winnington, Northwich, or Eco Ice Melt, Tel. +44 353 86 254 7678; <http://ecoicemelt.ie/>

Produktvideo:

<https://www.youtube.com/watch?v=2fmACUE-obY>



TruMelt (NaCl, MgCl, Farbe):

- NaCl (90,0%), MgCl (10,0%), Grüner Farbstoff, Ausbringung trocken/Sole

<https://meltsnow.com/wp-content/uploads/2013/08/TruMelt-MSDS-2013-Website.pdf>

Hersteller/Anbieter (Preis ca. 500 – 600 €/t):

MeltSnow.com, Franklin, MA 02038, P:O:Box 675, USA Tel. 0 800 637-4504; <https://meltsnow.com/products/trumelt/>



SAFECOTE (Flüssiger Zusatz, patentiert):

- Reststoff Zuckerproduktion, H₂O, Mono- und Disaccharide, Aminosäure, Nitrogene (siehe Patent)

- Reduziert Korrosion und Salzverluste

<https://patentimages.storage.googleapis.com/48/78/97/8182c9c6744da3/EP1680476B1.pdf>

Hersteller (Preis ca. 1.000 €/t):

Safecote Ltd, Winnington Hall, Winnington, Northwich, Cheshire, CW8 4DU, Tel. +44 870 850 8987, info@safecote.com; <https://www.safecote.com>

Produktvideo:

<https://vimeo.com/15355628>



Snow Joe (NaCl, CMA, Inhibitor, Farbe):

- Mischung für erhöhte Tauwirkung
- Reduziert Korrosion

<https://snowjoecm.blob.core.windows.net/product-manuals/MeltEBSellSheet-NEWHiRes.pdf>

Hersteller/Anbieter (Preis ca. 300 - 400 €/t):

Snow Joe®, LLC Carlstadt, NJ, USA
1-866-SNOWJOE (1-866-766-9563); <https://www.snowjoe.com/products/melt-50-lb-resealable-bag-premium-environmentally-friendly-blend-ice-melter-w-cma>

Produktvideo:

<https://www.youtube.com/watch?v=5poHaBHrks>



Pro Powermelt (NaCl, CaCl, KCl, Inhibitor, Farbe):

- Mischung für erhöhte Tauwirkung
- Reduziert Korrosion

<https://rocksaltusa.com/wp-content/uploads/2019/10/Power-Melt-Cut-Sheet.jpg>

Hersteller (Preis ca. 300 - 400 €/t):

Rock Salt USA, 2354 North Lindbergh Blvd. St. Louis MO. 63114, 314-736-5111; mark@RockSaltUSA.com
<https://rocksaltusa.com/products/power-melt-ice-melt/>

Produktvideo:

<https://www.youtube.com/watch?v=VcEuB-LcvNw>



Caliber, Meltdown (MgCl, H₂O, Inhibitor, flüssig):

- Reduziert Korrosion

<https://envirotechservices.com/wp-content/uploads/2014/05/Caliber-M1000AP-GHS-SDS.pdf>

Hersteller (Preis ca. 300 - 400 €/t):

EnviroTech Services, Inc. 910 54th Ave, Suite 230 Greeley, CO 80634; (970) 346-3900
<https://envirotechservices.com/deicing-anti-icing/enhanced-liquid-deicing-products/caliber-m-1000/>

Abbildung 9: Ergebnisse Marktuntersuchung auftauende Streumittel – Auswahl erhältliche Produkte

3.1.3 Überblick Patente

Der Gegenstand des Patents ist eine technische Erfindung oder eine technische Neuerung und unterscheidet sich damit vom Urheberrecht (Werke, Literatur, Wissenschaft, Kunst), dem Markenrecht (Firmen, Produkt-nahmen) sowie dem Designrecht (äußere Gestaltung, Form Produkte). Mit dem Patent wird es Dritten verboten die eingereichten, geprüften Erfindungen oder Neuerungen herzustellen, nachzuahmen, anzubieten, zu importieren, zu bewerben oder zu nutzen. Der Patentschutz ist zeitlich, räumlich und territorial klar abgegrenzt und erfolgt gegen die Entrichtung entsprechender Gebühren. Dementsprechend besteht nur Patentschutz in den Gebieten mit Eintragung, wobei das Schutzrecht durch Zeitablauf oder bei nicht bezahlten Gebühren erlöscht. Allgemein bekannte und/oder veröffentlichte Erfindungen oder Neuerungen sind nicht patentfähig. Zudem können Mitbewerber gegen Patente vorgehen und die Aufhebung des Patentschutzes rechtlich vorantreiben, wenn sie der Meinung sind das Patent wurde zu Unrecht zuerkannt.¹⁴

Die Zielsetzung der Patentrecherche im FFG-Forschungsprojekt WINTERLIFE bestand darin, geeignete Taumittel und die verwendeten Nachweise zu identifizieren. Weiters allfällige Produkte und deren Zusammensetzung als einen Ausgangspunkt für die weitere Forschung und Entwicklung kennenzulernen sowie geeignete Zusätze zur Verbesserung der Eigenschaften (Korrosion, Haftung, Schäumen, Lagerung) von Grundtaumitteln und Produkten sowie die jeweilige Bandbreite der Dosierung abzuschätzen. Eine Prüfung möglicher Patentverletzungen durch die untersuchten und angeführten Taumittelkombinationen in WINTERLIFE ist ausdrücklich nicht erfolgt. Sofern nicht zuvor ein Schutz bestanden hat, ist durch die Veröffentlichung des Berichtes jedenfalls keine Patentierung der gezeigten Ansätze möglich. Zusammenfassend hat die Analyse der eingetragenen Patente jedenfalls gezeigt, dass überwiegend der Ansatz verfolgt wurde ein oder mehrere Grundtaumittel mit Zusätzen (0,1-10m%) zur Verbesserung der Eigenschaften zu kombinieren. Als Zusätze wurden teilweise Restprodukte aus der Industrie in größeren Dosierungen (z.B. Zucker, Stärke, etc.) und spezifische Zusätze (Harnstoffe, Tenside, Alkaliphosphate etc.) in geringer Dosierung verwendet. Weiters ist der Patentschutz in vielen Fällen durch Zeitablauf verfallen oder es wurde mangels wirtschaftlicher Perspektiven keine Verlängerung durch die Patentinhaber angestrebt.

Übersicht ausgewählte Patente aus der Patentrecherche

SAFECOTE (EP1680476B1 European Patent Office): Status 12-03-2020: Active;
<https://patents.google.com/patent/EP1680476B1/en>

COMPOSITION (NaCl, Melasse, EP1259575B1): Status 12-03-2020: Active;
<https://patents.google.com/patent/EP1259575B1/de?q=~patent%2fEP1680476B1&page=1>

COMPOSITION (NaCl, aldaric or aldonic acid US7658861B2): Status 12-03-2020: Active;
<https://patents.google.com/patent/US7658861B2/en?q=~patent%2fEP1680476B1>

COMPOSITION (Zucker, Wasser; NaCl EP1238037B1): Status 12-03-2020: Expired;
<https://patents.google.com/patent/EP1238037B1/de?q=~patent%2fEP1680476B1>

COMPOSITION (NaCl, CMA, (NH₄)₂SO₄ etc. EP1238037B1): Status 12-03-2020: Expired;
<https://patents.google.com/patent/US5645755A/en?q=~patent%2fEP0876441A1>

COMPOSITION (NaCl, Stärke, EP0870813A1): Status 12-03-2020: Withdrawn;
<https://patents.google.com/patent/EP0870813A1/de?q=~patent%2fEP1680476B1&page=1>

COMPOSITION (Grundtaumittel, 5% Inhibitor, US 5,645,755): Status 26-11-2021: abgelaufen;
<https://patents.google.com/patent/US5645755>

GLYCOLE (Glycole, Sucrose, manose, benzoate): Status 12-03-2020: Ceased;
<https://patents.google.com/patent/EP0494506A1/de?q=~patent%2fUS7658861B2>

Abbildung 10: Übersicht ausgewählte Patente aus der Recherche zu Taumitteln, Produkten und Inhibitoren



¹⁴ Ohly, A. (2020)

3.1.4 Beispiel Produktanalyse

Für den Winterdienst stehen eine Vielzahl an Grundtaumittel und Produkte als Kombination von Grundtaumitteln, Zusätzen und Verunreinigungen am Markt zur Verfügung. Vielfach kommen neue Produkte auf den Markt, die bei der Markteinführung entsprechend beworben werden und den Winterdienstverantwortlichen auf unterschiedlichste Art und Weise angeboten werden. Unabhängig davon auf welche Art und Weise ein Produkt einem Entscheidungsträger bekannt geworden ist, stellt sich immer die Frage, ob ein Einsatz im Winterdienst den gesetzlichen Prinzipien eines sparsamen, zweckmäßigen und wirtschaftlichen Mitteleinsatzes genügt und zudem keine wesentlichen nachteiligen Auswirkungen auf die Umwelt hat. Für eine verantwortungsvolle Beschaffung und Einsatz im Winterdienst ist es daher insbesondere für Alternativen zu den in den Normen und Vorschriften genannten Grundtaumitteln entscheidend, die entsprechenden Nachweise und Sicherheitsdatenblätter zu überprüfen.

Eine erste Analyse der Marktprodukte (Kap. 3.1.2) in Hinblick auf die Kriterien zur Bewertung von Taumitteln (Kap. 2.3) zeigt meist recht schnell, dass anhand der Angaben der Produzenten kein konsistenter Vergleich zu dem am häufigsten eingesetzten Grundtaumittel NaCl bzw. anderen Alternativen möglich ist. Vielmehr steht der Endnutzer vor einer Reihe farbiger Prospekte, Videos und Testimonials, die ein Produkt mit subjektiven Vergleichen und Adjektiven (besonders tauwirksam, ergiebiger, schonend etc.) anpreisen. Es ist naturgemäß das gute Recht eines jeden Produzenten und Händlers die eigenen Waren entsprechend zu vermarkten und auch fallweise zu übertreiben. In Hinblick auf die Bedeutung des Winterdienstes für die Erreichbarkeit und Sicherheit der Verkehrsteilnehmer ist jedoch eine entsprechende Sorgfalt und Überprüfung vor einer Beschaffung dringend anzuraten.

Neben den zentralen Kriterien für den Winterdienst wie Gefrierkurve, Tauleistung, Taumittelbedarf, Lager- und Rieselfähigkeit, Reinheit, Beschaffungskosten, Effizienz, Korrosivität und Auswirkung auf den Anlagenbestand ist auf die Umweltverträglichkeit (Mensch, Fauna, Flora) bedacht zu nehmen. Eine chemische Analyse der Bestandteile eines Produktes sowie der sich aus der Anwendung im Vergleich zu NaCl ergebenden Konsequenzen ist daher ein wichtiger erster Schritt vor Pilotprojekten oder der praktischen Anwendung. Im Forschungsprojekt WINTERLIFE wurde daher ein ausgewähltes Produkt chemisch auf seine Bestandteile analysiert und in das Versuchsprogramm zu den Eignungskriterien der Grundtaumittel ohne und mit Zusätzen mit aufgenommen. Ausgehend von der Marktuntersuchung wurde das Produkt Sno-N-Ice aufgrund der Verfügbarkeit am österreichischen Markt sowie den Vorerfahrungen der ÖBB-INFRA stellvertretend für die anderen angeführten Produkte ausgewählt.

Wie in dem Überblick der Grundtaumittel (Kap. 3.1.1) und der Marktprodukte (Kap. 3.1.2) dargestellt ist Sno-N-Ice ein seit 1987 in der Schweiz hergestelltes grobkörniges rosafarbiges Produkt der Steinmann Zürich AG. Gemäß den Herstellerangaben weist das Produkt eine doppelt so hohe Ergieblichkeit im Vergleich zu NaCl auf und kann im Gegensatz zu diesem bis -21°C (statt nur bis -8°C) eingesetzt werden. Sno-N-Ice ist wie NaCl nicht hygroskopisch und kann händisch und maschinell gestreut werden. Zudem soll es kostensparender als NaCl aufgrund der Langzeitwirkung (24h) und des geringeren Personaleinsatzes sein. Die Farbgebung mit Lebensmittelfarbe soll eine gleichmäßige Ausbringung erleichtern und durch Inhibitoren soll eine geringere betonangreifende und korrosive Wirkung erzielt werden. Dazu gibt das Produktblatt von 2021 eine deutlich reduzierte Korrosivität nach 2, 7 und 14 Tagen Versuchsdauer im Vergleich zu NaCl an (77%, 59% und 54%).

Die chemische Analyse von Sno-N-Ice erfolgte mittels XRF (Abbildung 11) und ergab die bereits vorher angeführten Bestandteile Halite ($\text{NaCl} = 96,2\%$), Natrium Sulfate ($\text{NaSO}_4 = 2,0\%$), Kalium Chlorit ($\text{KClO}_2 = 1,6\%$), Mangan Chlorid ($\text{MnCl}_2 = 0,2\%$). Die organischen Bestandteile (Zuckerderivate, Lebensmittelfarbe) sind mittels XRF nicht erfassbar. Der Zusammensetzung nach dürfte es sich um ein günstiges Steinsalz mittlerer bis geringe Reinheit handeln, das im Produktionsprozess mit den Zusatzstoffen und der Lebensmittelfarbe bei entsprechendem Energieeinsatz zu einem Granulat zusammengebacken wird. Aus der Zusammensetzung ergibt sich unmittelbar kein Hinweis, woraus sich die höhere Ergieblichkeit und Langzeitwirkung im Vergleich zu NaCl ergeben soll. Woraus sich die Kosteneinsparung bei einem ca. achtfachen Preis im Vergleich zu NaCl ergibt, ist aus den Unterlagen nicht nachvollziehbar. Für eine vertiefte Betrachtung wird daher auf die in der Folge dargestellten vertieften Untersuchungen verwiesen.

Chemische Analyse eines Produktes (Sno-N-Ice) im Vergleich zu NaCl

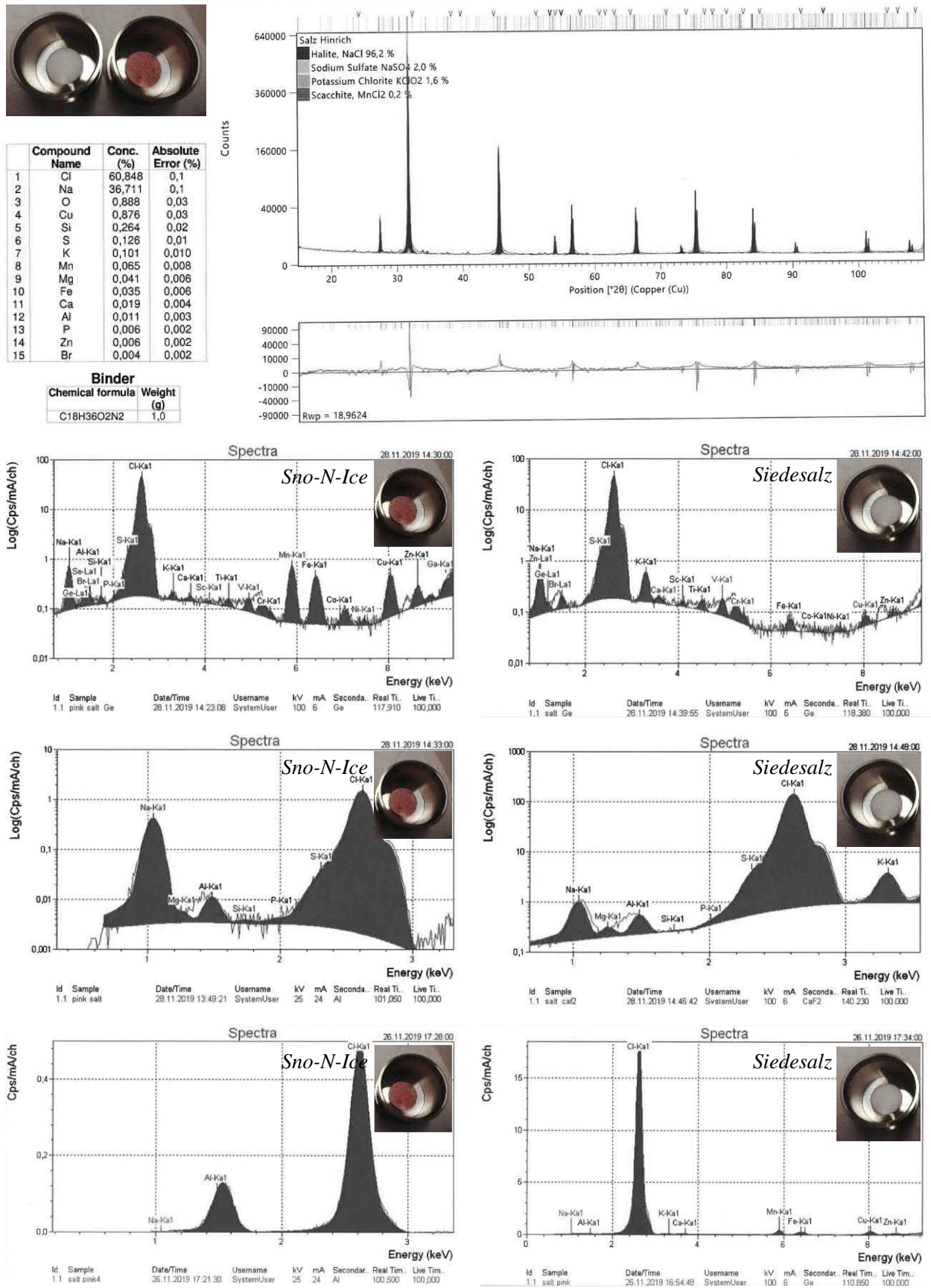


Abbildung 11: Beispiel chemische Analyse eines Produktes (Sno-N-Ice) im Vergleich zu NaCl

3.2 Lagerung und Ausbringung

3.2.1 Streumittellieferung und Lagerung

Die Lieferung von Taumitteln erfolgt für große Abnehmer vielfach direkt von der produzierenden Industrie (z.B. Siedesalz, Steinsalz, Meersalz) am Produktionsort über Schiff, Bahn oder LKW in die Lagerhallen oder Silos (Stahl, Holz). Für kleinere Mengen erfolgt meist eine Lieferung an zentrale Lager und von dort eine dezentrale Verteilung an die Abnehmer über LKW in Silos, Tanks oder Lager in loser oder flüssiger Form bzw. für Kleinmengen als Sackware (Abbildung 12). Als Zielgröße für Lagerstätten bzw. Lagerstättenanpassungen hat sich eine Bemessung auf einen Durchschnittswinter bewährt, um eine ausreichende Bevorratung sicherzustellen. Zusätzlich ist nach entsprechendem Verbrauch eine umgehende Nachbestellung einzuleiten, sodass selbst im Fall von Extremwintern immer ausreichend Taumittel vorhanden ist.¹⁵

Bei Problemen mit Salzlagern oder Solemischanlagen ist es Aufgabe der Winterdienstverantwortlichen zeitnahe für entsprechende Abhilfe zu schaffen. Weiters ist die Rechtzeitigkeit der Salzlieferungen und der Entladevorgang (richtiger Silo und Einblasedruck, verhindern von Überfüllung, Feuchtegehalt) zu überwachen und erforderlichenfalls einzugreifen. Der Füllstand der Silos und Lagerstätten ist laufend zu überwachen und stichprobenartig in Bezug auf Reinheit, Feuchte und Rieselfähigkeit zu überprüfen. Im Fall einer Feuchtsalzstreuung mit Sole kann eine direkte Belieferung in Tanks durch Anbieter oder Produktion durch eigene Anlagen erfolgen. Für größere Verbrauchsmengen empfiehlt sich eine zentrale automatisierte Produktion vor Ort, wobei insbesondere die Kontrolle des Mischverhältnisses (z.B. NaCl-Sole mit 18-21 m%) von Bedeutung, um Probleme mit Gefrieren und der Ausbringung zu vermeiden. Zur Vermeidung allfälliger Abweichungen ist weiters eine Überprüfung der Solemischanlagen zu Beginn jeder Winterperiode empfehlenswert. Werden alternative Taumittel in fester, feuchter oder flüssiger Form verwendet, sind analog den obigen Ausführungen ausreichend dimensionierte geeignete Lagerungsmöglichkeiten sowie Entnahmemöglichkeiten für die Ausbringung vorzusehen.

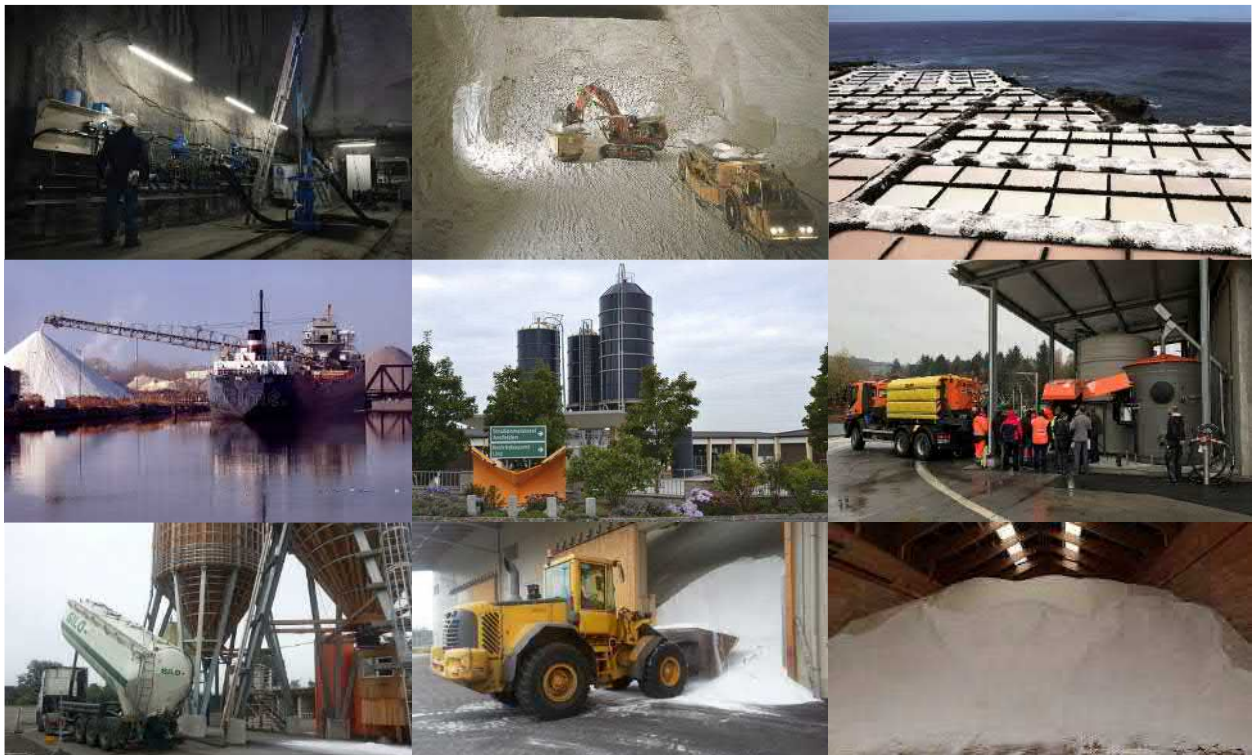


Abbildung 12: Impressionen Produktion, Lieferung und Lagerung von Taumitteln (Quellen: Diverse)

¹⁵ vgl. Hoffmann, M. (2016, 2017)

3.2.2 Eignungskriterien Lagerung

Die Anforderungen an auftauende Streumittel werden durch Normen und Vorschriften allgemein definiert. Das überwiegend verwendete Auftaumittel Natriumchlorid (NaCl) kommt in Österreich üblicherweise in Form von Siedesalz und Steinsalz zur Anwendung. Maßgebend für Natriumchlorid in Österreich sind vor allem die ÖNORM EN16811-1 Teil 1 – Natriumchlorid – Anforderungen und Prüfmethode (2016), die RVS 12.04.12 Schneeräumung und Streuung Abschnitt 4.4 Streumittel (2010) und die RVS 12.04.16 Streumittel (2017). In Bezug auf die Lagerung stellt die RVS 12.04.12 unter 4.4.2.1 beispielhaft für NaCl fest, dass Feuchtigkeit im Salz zum Einfrieren bzw. zu Verklumpungen bei der Lagerung führen kann. Zur Erhaltung der Rieselfähigkeit und zur Verbesserung der längerfristigen Lagerfähigkeit werden dem Salz geeignete Antbackmittel beigemischt. In der Praxis hat sich ein Feuchtigkeitsgehalt bis 0,5 m% bei NaCl bewährt, der auch in der ÖNORM zu finden und damit Teil der Ausschreibungsbedingungen ist. Weiters wird die Vorteilhaftigkeit einer leichten und raschen Entnahmemöglichkeit ohne zusätzliche Geräte empfohlen. In allen Fällen ist die Rieselfähigkeit durch entsprechende Maßnahmen sicherzustellen.

Die RVS definiert zusammen mit den ÖNORMEN den Stand der Technik in Österreich. Aus den darin festgelegten Anforderungen ergibt sich unmittelbar, dass eine Lieferung, die mit vertretbarem Aufwand und unter den üblichen Bedingungen nicht lagerfähig und ausbringbar ist, keine ausreichende Eignung aufweist. Dementsprechend ist die Rieselfähigkeit bzw. generell die Ausbringbarkeit des eingelagerten Taumittels sicherzustellen, um eine Beeinträchtigung des Winterdienstes zuverlässig zu vermeiden. Dies ist auch insofern wesentlich, als aus Sicht der Verantwortlichen ein störungsfreier Winterdienst und die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer nur mit einem raschen Zugriff auf Taumittel im Bedarfsfall möglich ist. Neben dem Gefrierpunktsverlauf und der Tauleistung sowie der Kosteneffizienz haben sich im Licht der jüngeren Forschung in Österreich der Feuchtegehalt und die Rieselfähigkeit als wesentliche Kriterien für die Lagerung und Ausbringung etabliert.¹⁶

Eine erste Beurteilung der Rieselfähigkeit kann mit Hilfe der Auslaufbox nach Sonntag (Abbildung 13) erfolgen. Dabei wird nach dem Einfüllen des zu prüfenden Streumittels die Auslaufbox einseitig geöffnet und die auslaufende Masse in Relation zur Gesamtmasse als Auslaufrate sowie der Winkel der verbleibenden Bruchfläche dargestellt. Wie anhand der Untersuchungen festgestellt wurde, besteht eine gute Korrelation zwischen Auslaufwinkel und Auslaufrate. Weiters lässt sich damit der Zusammenhang von Feuchtegehalt und Rieselfähigkeit sowie die Wirkung von Antbackmitteln (meist Natriumhexacyanoferrat $\text{Na}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) im relevanten Feuchtebereich untersuchen.



Entwicklung der Rieselfähigkeit bei NaCl
Mittelwerte mit 95% Konfidenz

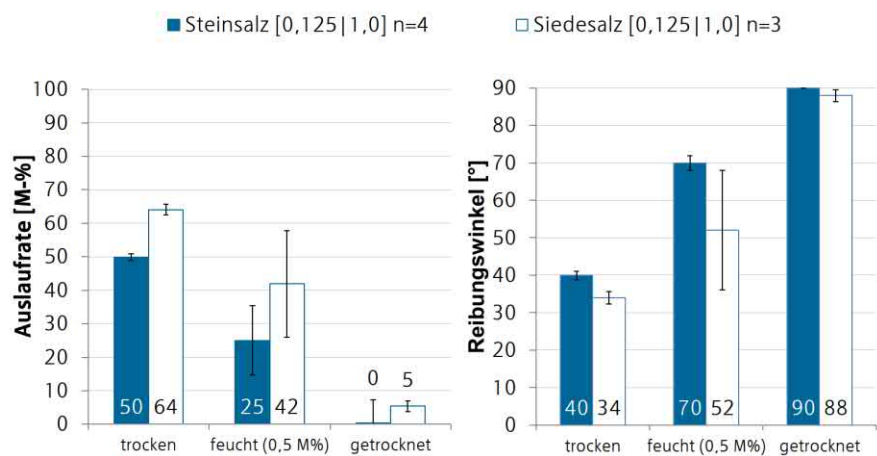


Abbildung 13: Prüfung der Rieselfähigkeit mit der Auslaufbox nach Sonntag und Einfluss des Feuchtegehaltes

¹⁶ vgl. Hoffmann, M. et al. (2011), Hofko, B. et al. (2016), Gruber, M. (2019)

Im Projekt WINTERLIFE wurde die Rieselfähigkeit von ausgewählten Taumitteln geprüft und die Auslaufraten bei Lagerung an der Luft beurteilt. Tabelle 1 gibt Aufschluss über die geprüften Stoffe. Es ist zu erkennen, dass nur NaCl mit Antibackmitteln und Sno-N-Ice bei Luftlagerung (19-21 °C, 25-35 % relative Luftfeuchte, entspricht 4-6 g H₂O/m³) rieselfähig sind. Die Einstufung von NaCl ohne Antibackmittel, Kaliumcarbonat sowie Natriumformiat als „bedingt rieselfähig“ bedeutet, dass die Lagerung dieser Stoffe bei ungünstigen Umgebungsbedingungen (insbesondere bei hoher Luftfeuchtigkeit) kaum möglich ist, ohne an Rieselfähigkeit einzubüßen, wobei vermehrt Klumpenbildung, jedoch kein komplettes Festbacken zu erwarten ist. Alle als „nicht rieselfähig“ beurteilten Taumittel sind in typischen Salzsilos oder Salzhallen nicht sinnvoll lagerbar. Bei diesen Taumitteln wird eine Lagerung in (luftdichten) Säcken oder Tanks mit anschließender Lösung und Ausbringung als flüssiges Taumittel empfohlen.

Tabelle 1: Rieselfähigkeiten ausgewählter Taumittel

Lösung	Formel	Hygroskopizität	Auslaufrate bei Luftlagerung [M%]	Beurteilung Rieselfähigkeit
Siedesalz ohne Antibackmittel	NaCl	Nein	< 20	bedingt rieselfähig
Siedesalz mit Antibackmittel	NaCl + Na ₄ [Fe(CN) ₆]	Nein	> 30-40	rieselfähig
Steinsalz ohne Antibackmittel	NaCl	Nein	< 20	bedingt rieselfähig
Steinsalz mit Antibackmittel	NaCl + Na ₄ [Fe(CN) ₆]	Nein	> 35-45	rieselfähig
Siedesalz mit Antibackmittel und mit Inhibitor (Glucose)	NaCl + Na ₄ [Fe(CN) ₆] + C ₆ H ₁₂ O ₆	Nein	> 30-40	rieselfähig
Kaliumcarbonat	K ₂ CO ₃	Ja	< 30	bedingt rieselfähig
Kaliumacetat	C ₂ H ₃ KO ₂	Ja	< 10	nicht rieselfähig
Kaliumformiat	CHKO ₂	Ja, stark	< 10	nicht rieselfähig
Calciumchlorid	CaCl ₂	Ja, stark	< 10	nicht rieselfähig
Magnesiumchlorid	MgCl ₂	Ja, stark	< 10	nicht rieselfähig
Natriumacetat	C ₂ H ₃ NaO ₂	Ja	< 10	nicht rieselfähig
Natriumformiat	CHNaO ₂	Ja	< 20	bedingt rieselfähig
Sno-N-Ice	NaCl + Zusätze	Nein	> 30-40	rieselfähig

In Ergänzung zu den Rieselversuchen mittels Auslaufbox wurden die Taumittel unter üblichen Raumtemperaturen offen gelagert. Nicht hygroskopische Taumittel werden auch unter diesen Bedingungen weitgehend ihre Rieselfähigkeit beibehalten, während hygroskopische Taumittel zum Zusammenbacken neigen und dementsprechend ungünstig in der Lagerung unter üblichen Bedingungen sind. Der optische Vergleich verschiedener Taumittel nach längerer Lagerung an der Luft in Abbildung 14 bestätigt die Ergebnisse der Recherchen. Von links oben nach rechts unten ist eine Zunahme der Klumpenbildung (schwach: Kaliumcarbonat, mittel: Natriumformiat) bis hin zum kompletten Festbacken ausgewählter Taumittel ersichtlich (sehr stark: Calciumchlorid).

Zusammenfassend ist eine gute Lagerfähigkeit ein wesentliches Merkmal der Taumittleignung und bestimmt maßgebend die Kosten und Techniken der Lagerung, Befüllung und Ausbringung. Nicht hygroskopische Taumittel können in dieser Hinsicht mittels Rieselfähigkeit zuverlässig auf die Lagerfähigkeit in Silos und Salzhallen geprüft werden. Für mittel bis stark hygroskopische Taumittel macht eine Prüfung der Rieselfähigkeit keinen Sinn, da sich diese laufend verändert und die Taumittel bei Luftzutritt zum Zusammenbacken neigen. Dementsprechend sind für hygroskopische Taumittel geeignete Lagerungsmöglichkeiten sowie Ausbringung in feuchter oder gelöster Form als Sole vorzusehen. Weiteres können sich durch ihren Einsatz Änderungen in der Winterdienstlogistik sowie den verwendeten Gerätschaften gegenüber einer herkömmlichen Salzstreuung ergeben, die zu beachten sind.

Übersicht ausgewählte Taumittel nach Luftlagerung



Abbildung 14: Optischer Vergleich verschiedener Taumittel nach längerer Lagerung an der Luft

3.2.3 Räumung und Taumittelausbringung

Für einen effizienten Winterdienst schafft erst eine möglichst gute Räumung der Verkehrsflächen die Voraussetzung für einen effizienten Einsatz von Streumitteln. Im Fall einer Splittstreuung erfolgt die Räumung mit dem Ziel eine Befahrbarkeit sicherzustellen, wobei die Splitt-Körner die Reibung der verbleibenden Schneedecke erhöhen (Weißräumung). Im Fall einer Streuung von Taumitteln ist das Ziel der Räumung ein möglichst gutes Räumbild mit minimalen Mengen an Restschnee für einen geringen Taumittelverbrauch. Die Räumung von Gehwegen, Bahnsteigen, Verkehrsflächen und Straßen kann bei großen Schneehöhen mittels Schneefräsen und bei geringen bzw. mittleren Mengen und ebenem Untergrund mit Schneepflügen erfolgen. Für besondere Einsatzfälle werden bei geringen Schneemengen auch Bürstensysteme für die Räumung verwendet. Wesentlich für die Wahl des jeweiligen Räumgerätes sind vor allem die Einsatzbreite, Leistungsfähigkeit und Handhabung in den zu räumenden Flächen (Abbildung 15).

Die Ausbringung von Streumitteln kann grundsätzlich händisch und maschinell für Taumittel und Streumittel getrennt bzw. gemeinsam erfolgen (Doppelkammer). Das Ziel einer gleichzeitigen Ausbringung von Streusplitt und Taumitteln besteht darin, unmittelbar mit Splitt die Griffigkeit der Wege und Fahrbahnen zu erhöhen, bis das Taumittel den Restschnee getaut hat. Werden Taumittel alleine ausgebracht, kann zwischen einer trockenen Streuung, einer Feuchtsalzstreuung (Salz+Sole) und einer reinen Solestreuung unterschieden werden. Im Gegensatz zu einer trockenen Streuung besteht der Vorteil einer Feuchtsalzstreuung oder Solestreuung insbesondere in einem gleichmäßigeren Streubild und geringeren Salzverlusten (Austragung, Verwehung). Feuchtsalz (FS) wird in verschiedenen Abstufungen, ausgehend von FS0 (Trockensalz) über FS30, FS50 und FS70 bis hin zur reinen Sole (FS100) unterteilt, wobei die Zahl nach „FS“ den prozentuellen Anteil der Sole am Gesamtprodukt Feuchtsalz darstellt. Zu beachten ist in allen Fällen, dass nur das Taumittel eine Tauwirkung entfaltet und die taubare Menge an Schnee und Eis entscheidend von der Umgebungstemperatur, dem gewählten Taumittel und der Dosierung abhängt.

Die händische Streuung kann für Kleinflächen direkt aus einem Kübel oder einem Sprühtank heraus erfolgen und ermöglicht dem geübten Einsatzpersonal eine gezielte Streuung schwer zugänglicher und verwinkelter Bereiche sowie von Stiegenaufgängen. Für größere ebene Flächen wird eine rein manuelle Streuung dagegen bald ineffizient im Vergleich zu Kleingeräten mit Handbetrieb oder maschinellen Streugeräten sein, da mit diesen wesentlich größeren Flächen effizient und gleichmäßig zu bedienen sind. Die Auswahl des Taumittels mit den Möglichkeiten der Ausbringung trocken, feucht oder als Sole ist daher von wesentlicher Bedeutung für die Einsatzplanung und erforderliche Ausrüstung im Winterdienst.

Die maschinelle Streuung erfolgt meist mit Hilfe von Streuautomaten (auf LKW, Unimog, Traktoren) und wird in Österreich bei gut befahrbaren Flächen (Haltestellen, Straßen, Radwege, Parkplätze) eingesetzt. Moderne Streuautomaten ermöglichen neben der Auswahl des Feuchtsalzgehaltes (FS0 bis FS100) eine genaue Einstellung der Streumenge (0 bis 40 g/m² in 5 g/m² Schritten) und der Streubreite. Die händische Ausbringung ist bei schwer befahrbaren oder kleinen Flächen (Bahnsteige, Haltestellen, Gehsteige) in Form einer Trockenstreuung üblich. Eine Feuchtsalzstreuung oder Solestreuung kann mit Umhängetanks und Handspritzlanzen erfolgen, ist aber in Österreich weniger gebräuchlich. Der Nachteil der händischen Streuung liegt in der Abschätzung der Dosierung und führt in der Regel zu einem deutlich höheren Streumittelverbrauch. Ein erhöhter Streumittelverbrauch verstärkt jedenfalls die korrosive Wirkung und ist sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht ungünstig.

Zusammenfassend kann eine Streuung von abstumpfenden und auftauenden Streumitteln gemeinsam oder getrennt händisch und manuell erfolgen. Auftauende Streumittel können je nach Eignung trocken, angefeuchtet oder als reine Sole ausgebracht werden. Ausgenommen für Kleinflächen, Stiegenaufgänge und schwer zugängliche Bereiche ist eine maschinelle Räumung und Streuung nach Möglichkeit aufgrund des sparsameren Verbrauchs und der größeren Leistung zu bevorzugen. Im Fall einer Ausschreibung der Winterdienstleistungen ist dagegen eine genaue Beschreibung der Leistungsanforderungen (Reaktionszeit, Umlaufzeit, Einsatzdauer etc.) und Rahmenbedingungen (Betreuungszeitraum, Streumittelwahl) vorzuziehen. Die Optimierung der Winterdienstlogistik und des Einsatzkonzeptes kann dann angepasst durch die Anbieter auf Basis der verfügbaren Ressourcen erfolgen.

Auswahl handgeführte Schneefräsen Geh-/Radweg



Fräsestyp	Stiga ST 4262 P	Stiga ST 5266 P	Stiga ST 7276 PH	Hecht 9334 SQ	Hecht 9542 SQ
Räumbreite/-höhe	62 cm, 50 cm	66 cm, 53 cm	76 cm, 53 cm	87 cm, 51 cm	106 cm, 51 cm
Antrieb / Tank	4,4 kW Benzin / 3,0 l	6,2 kW Benzin / 4,0 l	9,0 kW Benzin / 5,5 l	9,5 kW Benzin / 5,5 l	11,0 kW Benzin / 5,5 l
Abmessungen L/B/H	148 x 62 x 104 cm	144 x 71 x 113 cm	144 x 81 x 113 cm	140 x 86 x 110 cm	149 x 115 x 110 cm
Gewicht	90 kg	96 kg	134 kg	127 kg	144 kg
Steuerung	Manuell/Kurbel	Manuell/Kurbel	Manuell/Kurbel	Manuell/Kurbel	Manuell/Kurbel
Preis	ca. 819,- €	ca. 1.579,- €	ca. 2.899,- €	ca. 1.290,- €	ca. 1.590,- €
Eignung:	kleinflächig	kleinflächig	kleinflächig	kleinflächig	mittlere Flächen

Auswahl handgeführte Kehrmaschinen Geh-/Radweg



Kehrtyp	Hecht 8680 Se	Texas SS 800E	Hecht 8101 S Set	Texas SS 1000E	Herkules 1000 Pro
Räumbreite/Bürste	80 cm, 35 cm	80 cm, 35 cm	100 cm, 35 cm	100 cm, 35 cm	100 cm, 40 cm
Antrieb / Tank	4,7 kW Benzin / 1,0 l	3,2 kW Benzin / 1,0 l	4,8 kW Benzin / 1,0 l	3,2 kW Benzin / 1,0 l	3,0 kW Benzin / 12,0 l
Abmessungen L/B/H	153 x 81 x 105 cm	155 x 80 x 125 cm	180 x 105 x 110 cm	155 x 100 x 125 cm	155 x 100 x 125 cm
Gewicht	80 kg	76 kg	82 kg	80 kg	85 kg
Steuerung	Manuell/Kurbel	Manuell/Kurbel	Manuell/Kurbel	Manuell/Kurbel	Manuell/Kurbel
Preis	ca. 799,- €	ca. 877,- €	ca. 1.099,- €	ca. 923,- €	ca. 3.349,- €
Eignung:	kleinflächig	kleinflächig	mittlere Flächen	mittlere Flächen	mittlere Flächen

Auswahl Kleinstreuer & Aufsätze Träger Geh-/Radweg



Streutyp	Texas CS2500	Texas CS3600	Texas CS6000S	Dema Streuwagen	Park Ranger 2150
Streuenge	bis 25 l (Splitt/Salz)	bis 36 l (Splitt/Salz)	bis 58 l (Splitt/Salz)	bis 200 l (Salz/Splitt)	bis 240 l (Splitt/Salz)
Antrieb	Händisch	Händisch	Händisch	Zuggerät	21 kW Benzin / 12,0 l
Abmessungen L/B/H	100 x 52 x 100 cm	100 x 55 x 100 cm	100 x 65 x 100 cm	165 x 98 x 110 cm	274 x 102 x 140 cm
Gewicht	7 kg + Streugut	10 kg + Streugut	13 kg + Streugut	50 kg + Streugut	600 kg + Streugut
Steuerung	Manuell	Manuell	Manuell	Manuell	Automatisch
Preis (min.)	ca. 95,- €	ca. 199,- €	ca. 199,- €	ca. 549,- €	ca. 19.900,- €
Eignung:	kleinflächig	kleinflächig	kleinflächig	kleinflächig	mittlere Flächen

Auswahl Anbau und Aufsatzstreuer für mittel/große Verkehrsflächen



Streutyp	AGRY 100	AGRY 150	ASI150 - 280	AS400	ASE Symmetrie+
Streuenge	bis 1 m ³ (Splitt/Salz)	bis 1,5 m ³ (Splitt/Salz)	2,2 – 4,1 m ³	4,0 – 7,0 m ³	4,0 – 7,0 m ³
Antrieb / Bauart	Anbau, Traktor	Anbau, Traktor	Aufsatzstreuer	Aufsatzstreuer	Aufsatzstreuer
Streubreite	174 cm	234 cm	2 – 8 m	2 – 8 m	2 – 8 m
Gewicht	490 kg + Streugut	560 kg + Streugut	bis 1200 kg + Streugut	bis 2400 kg + Streugut	bis 2400 kg + Streugut
Steuerung	Streupult	Streupult	Automatisch	Automatisch	Automatisch
Preis (min.)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Eignung:	klein-mittel	klein-mittel	mittlere Flächen	großflächig	großflächig

Abbildung 15: Auswahl von (Klein-)Geräten zur Räumung und Streuung im Winterdienst

3.3 Gefrierkurven und Tauwirkung

3.3.1 Gefrierkurven und Eutektik

Der grundlegende Mechanismus, durch den Taumittel im Winterdienst auf Verkehrsflächen wirken, ist die Senkung des Gefrierpunkts von Wasser. Die Ursache für diese Senkung des Gefrierpunkts liegen in der Stabilisierung des Wassers in seiner flüssigen Phase durch Lösung von Substanzen. Die resultierende Gefrierpunktserniedrigung wird oft als eine kolligative Eigenschaft betrachtet, was bedeutet, dass die Art der gelösten Chemikalie irrelevant ist, sondern nur die Anzahl der gelösten Teilchen eine Rolle spielt. Dementsprechend kann die Gefrierpunktserniedrigung von Wasser über $\Delta T = K_f m$ berechnet werden. In der Gleichung ist ΔT die Reduktion des Gefrierpunktes, K_f ($=1,86 \text{ K kg/mol}$) die kryoskopische Konstante und m die Anzahl der gelösten Teilchen (Ionen oder Moleküle) pro kg Lösungsmittel (H_2O). Das Konzept der kolligativen Eigenschaften basiert jedoch auf der Annahme einer idealen Lösung, in der es keine Wechselwirkung zwischen dem Wasser und der gelösten Chemikalie gibt.

In Wirklichkeit trifft dies nur für sehr verdünnte Lösungen zu. Bei Winterdienst werden jedoch in der Regel feste Salze oder konzentrierte Lösungen auf Verkehrsflächen ausgebracht. Abbildung 16 zeigt den Gefrierpunkt von realen Grundtaumitteln im Vergleich zum idealen Verhalten (schwarze Linie). Daraus geht hervor, dass das Konzept der idealen Lösung nur für Lösungen mit Gefrierpunkten bis ca. -5°C eine gute Näherung darstellt und die Abweichungen bei Anstieg der gelösten Anteile bzw. tieferen Gefrierpunkten zunehmen. In realen Lösungen können die gelösten Chemikalien Wassermoleküle an sich binden, ein Phänomen, das als Hydratation bekannt ist. Diese gebundenen Wassermoleküle sind nicht frei, um als Lösungsmittel zu fungieren, so dass die Hydratation die freie Wasserkonzentration stärker verringert, als es die Anzahl der gelösten Teilchen impliziert. Taumittel, die freie Wassermoleküle wirksam binden können wie MgCl_2 und CaCl_2 senken den Gefrierpunkt von Wasser stärker als Taumittel, die keine Wassermoleküle binden (wie Harnstoff) bei gleicher Anzahl gelöster Moleküle. Dementsprechend liegen die Gefrierkurven dieser Taumittel deutlich unter der idealen Lösung, wogegen z.B. Harnstoff ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) darüber liegt.¹⁷

Aufbauend auf die Wasseraktivität (effektive Konzentration) als zentrales Konzept der Thermodynamik realer wässriger Lösungen kann jedoch eine bessere Annäherung bis zum Eutektikum (Phasengleichgewicht mit tiefstem möglichem Gefrierpunkt) erfolgen. Die Wasseraktivität einer Lösung als Menge an freiem Wasser, das nicht an gelöste Chemikalien gebunden ist, wird definiert als $a_w = p^{\text{sol}}/p^{\text{water}}$. Dabei ist a_w die Wasseraktivität, p^{sol} der Wasserdampfdruck der Lösung und p^{water} der Wasserdampfdruck. Dementsprechend reicht die Wasseraktivität von 0 (kein freies Wasser, gesättigte Sole) bis zu 1 (reines Wasser). Darauf aufbauend kann die Gleichung der idealen Lösung zu $\Delta T = K_f/M_w \cdot \ln a_w$ angepasst werden, wobei M_w das molare Gewicht von Wasser ist. Weitere Verbesserungen können über moderne thermodynamische Modelle elektrolytischer Lösungen (z.B. extended universal quasichemical model UNIQUAC) erfolgen, wobei die Parameter wieder empirisch zu bestimmen sind. Sofern keine umfassende thermodynamische Analyse oder Simulation erfolgt, kann es daher für den praktischen Einsatz bzw. Mischungen von Chemikalien sinnvoll sein, die Gefrierkurven direkt durch Versuche empirisch zu bestimmen.

Gefrierpunktserniedrigung ideale Lösung vs reale Gefrierkurven ausgewählter Taumittel

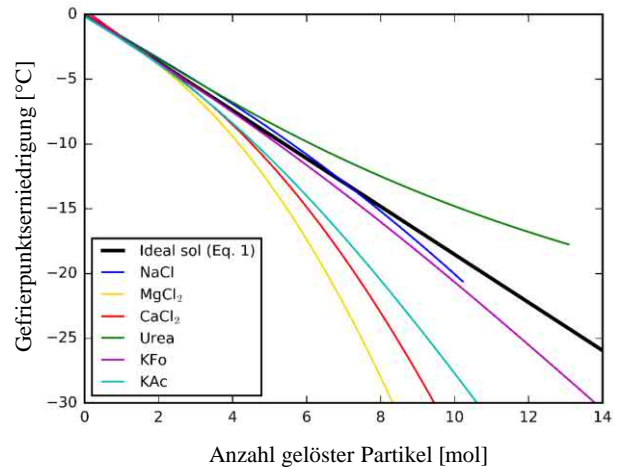


Abbildung 16: Gefrierkurve einer idealen Lösung im Vergleich zu den Gefrierkurven realer Taumittel in Wasser (NaCl , MgCl_2 , CaCl_2 , $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, KFO , KAc)

¹⁷ vgl. Wählin, J. et al. (2017), Thomsen, K. (2005)

3.3.2 Empirische Gefrierkurven und Taumittelbedarf

Für das Forschungsprojekt WINTERLIFE war es notwendig, die Gefrierkurven aller ausgewählten (Grund-)Taumittel konsolidiert zu ermitteln. Als Gefrierpunkttemperatur y [°C] wird generell in der Literatur die Temperatur bezeichnet, bei der sich im Gleichgewicht Eiskristalle zu bilden beginnen, wenn keine Unterkühlung (Supercooling) vorliegt. Die Gefrierkurve ist dann die Löslichkeitskurve von Eis in der Lösung. Sie stellt die Temperaturen dar, bei denen Eis und Lösung bei verschiedenen Konzentrationen von Zusatzstoffen im Gleichgewicht sind. Der eutektische Punkt ist der Ort, wo sich Solidus- und Liquiduslinie im Phasendiagramm berühren und bezeichnet die niedrigste Konzentration eines Taumittels bei Erreichung des tiefsten Gefrierpunktes in einer wässrigen Lösung. Bei einer Streuung mit einem festen Taumittel wird die Temperatur mit der Lösung des angrenzenden Schnees/Eises unmittelbar herabgesetzt und es erfolgt ein kontinuierlicher Tauvorgang mit fortlaufender Verdünnung entlang der Soliduslinie bis zum eutektischen Punkt. Mit weiterem Fortschritt des Tauvorganges darüber hinaus kommt es zu einer Verdünnung bis zur Erreichung einer Konzentration, die der Umgebungstemperatur entspricht.

Die Gefrierkurven und Dichtefunktionen von Grundtaumitteln nach Taumittelkonzentration in wässrigen Lösungen haben eine zentrale Bedeutung im Forschungsprojekt WINTERLIFE, da diese maßgebend für die Bestimmung des Einsatzbereiches, der benötigten Menge an Taumittel je nach Umgebungstemperatur bzw. im Vergleich zu Natriumchlorid als Referenztaumittel dienen (Kap. 2.3). Aus vorhergehenden Untersuchungen lagen dazu bereits Erfahrungen in der Bestimmung des Gefrierpunktes durch Abkühlung von Lösungen unterschiedlicher Konzentration in einem Gefrierschrank an der TU Wien vor. Dabei wurden verschiedene Taumittel mit unterschiedlicher Konzentration kontinuierlich abgekühlt und der zeitliche Verlauf der Temperaturen aufgezeichnet. Bei Einsetzen des Gefrierens entsteht ein Haltepunkt, wobei sich der Gefrierpunkt aus dem Wert mit der größten Häufung ergibt (ASTM 2005). Zu beachten ist dabei, dass kurz vor dem Gefrieren eine Absenkung der Temperaturen erfolgen kann (Supercooling), die unter diesem Wert liegen und nicht repräsentativ für den eigentlichen Gefrierpunkt sind. Die Werte aus diesen Versuchen liegen zudem etwas tiefer im Vergleich zur Literatur (Abbildung 17)¹⁸.

Für die Ermittlung konsolidierter Gefrierkurven der ausgewählten Taumittel (Kap. 3.1.1) wurden die Ergebnisse empirischer Versuche aus der Literatur mit den Ergebnissen der Gefrierversuche aus WINTERLIFE konsolidiert. Ausgehend von diesen Werten wurden die in Abbildung 18 dargestellten Gefrierkurven von 0°C und 0% Taumittelkonzentration bis zum jeweiligen Eutektikum mittels Regression angepasst. Die sich ergebenden Gleichungen erlauben dann eine kontinuierliche Ermittlung des jeweiligen Gefrierpunktes für alle Taumittelkonzentrationen und umgekehrt. Daraus können dann für Referenztemperaturen die Konzentration und in weiterer Folge der Mindestbedarf an Taumittel für das Tauen derselben Menge an Schnee und Eis ermittelt werden. Im Gegensatz zu den Tauleistungsversuchen (Kap. 3.3.3, Kap. 3.3.4) wird dabei die Einwirkdauer nicht berücksichtigt und stattdessen eine hinreichend lange Einwirkdauer vorausgesetzt.

Gefrierkurven und Dichte nach Konzentration aus empirischen Versuchen (TU Wien)

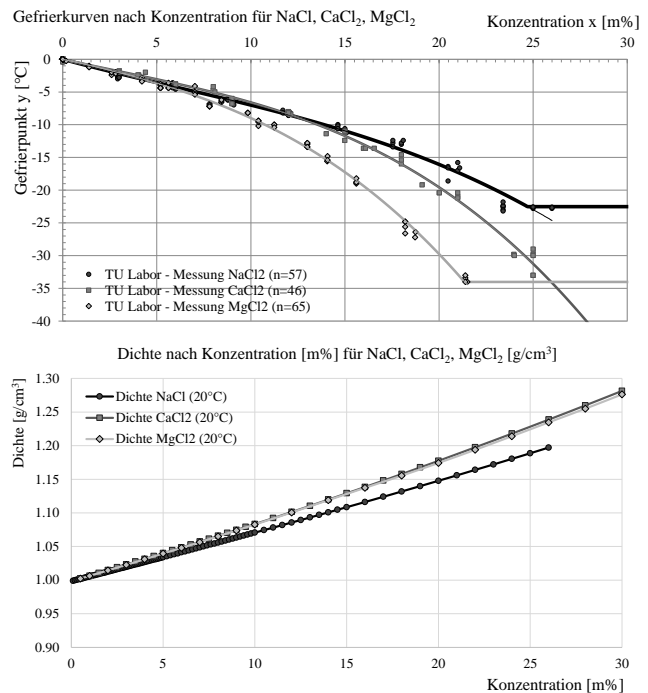


Abbildung 17: Empirische Gefrierkurven von Taumitteln nach Konzentration aus vorhergehenden Untersuchungen der TU Wien (NaCl, MgCl₂, CaCl₂)

¹⁸ vgl. Hoffmann, M. et al. (2011); Hofko, B. et al. (2016)

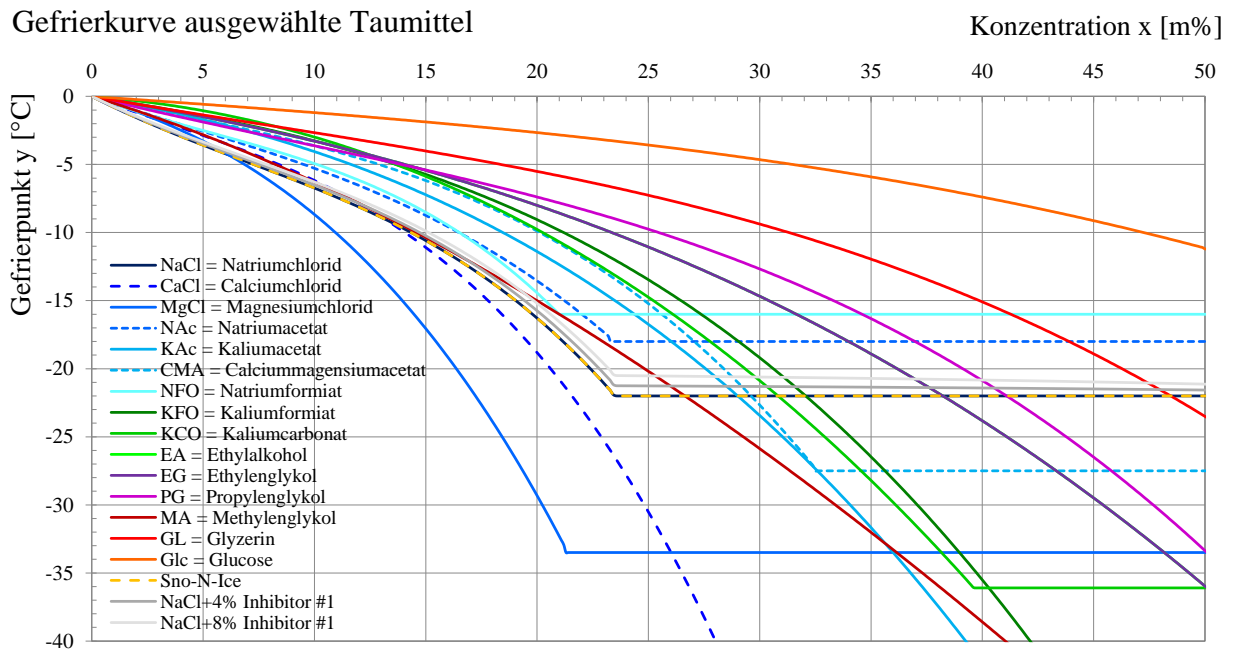


Abbildung 18: Konsolidierte Gefrierkurven ausgewählter Taumittel nach Konzentration in WINTERLIFE auf Basis umfangreicher Recherchen und empirischer Gefrierversuche (Sno-N-Ice ~ NaCl, Inhibitor #1 = Glucose)

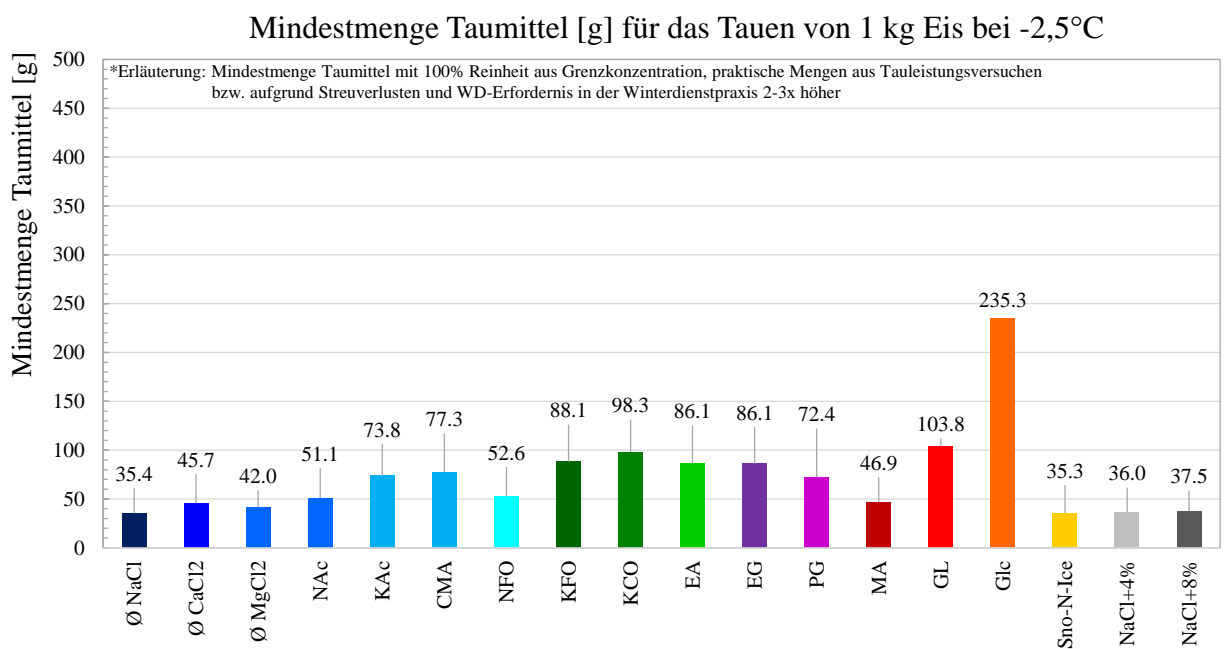


Abbildung 19: Mindestmenge Taumittel [g] für das Tauen von 1 kg Schnee/Eis bei -2,5°C auf Basis der Gefrierkurven (Taufvorgang bis zur Gleichgewichtskonzentration mit Umgebungstemperatur)

Wie bereits angeführt ergibt sich die Mindestmenge an Taumittel aus der Gleichgewichtskonzentration der Gefrierkurve bei der Referenztemperatur. Je steiler die Gefrierkurve verläuft, umso geringer ist diese Konzentration bei gleicher Temperatur und umso weniger Taumittel wird im Vergleich benötigt. Wie die Abbildung 19 bis Abbildung 22 zeigen, nimmt der Taumittelbedarf mit tieferen Temperaturen überproportional zu. So ergibt sich für das Tauen von 1 kg Schnee/Eis (~ 1cm Neuschnee/m²) mit NaCl ein Bedarf von 35.4 g (-2.5°C), 77.7 g (-5.0°C), 125,0 g (-7.5°C) und 167,8 g (-10°C). Bei den übrigen Taumitteln verschiebt sich das Verhältnis bei tieferen Temperaturen relativ zu den Taumitteln mit einem tieferen Gefrierpunkt bei der Eutektik (z.B. MgCl₂).

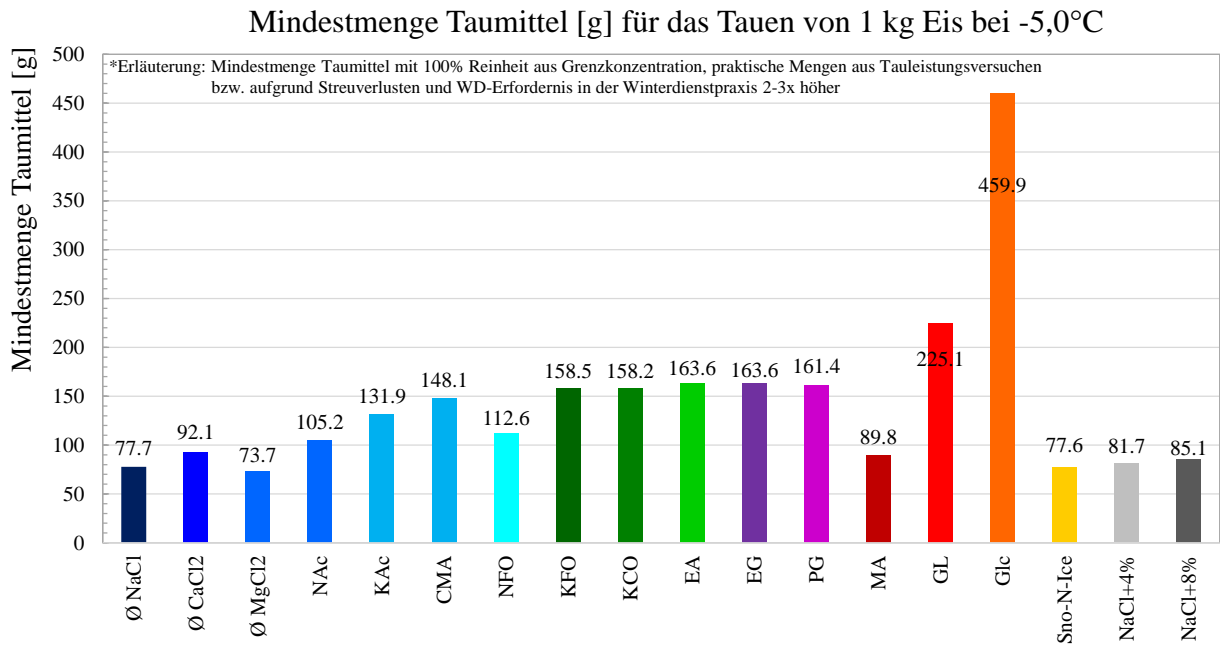


Abbildung 20: Mindestmenge Taumittel [g] für das Tauen von 1 kg Schnee/Eis bei -5,0°C auf Basis der Gefrierkurven (Taufvorgang bis zur Gleichgewichtskonzentration mit Umgebungstemperatur)

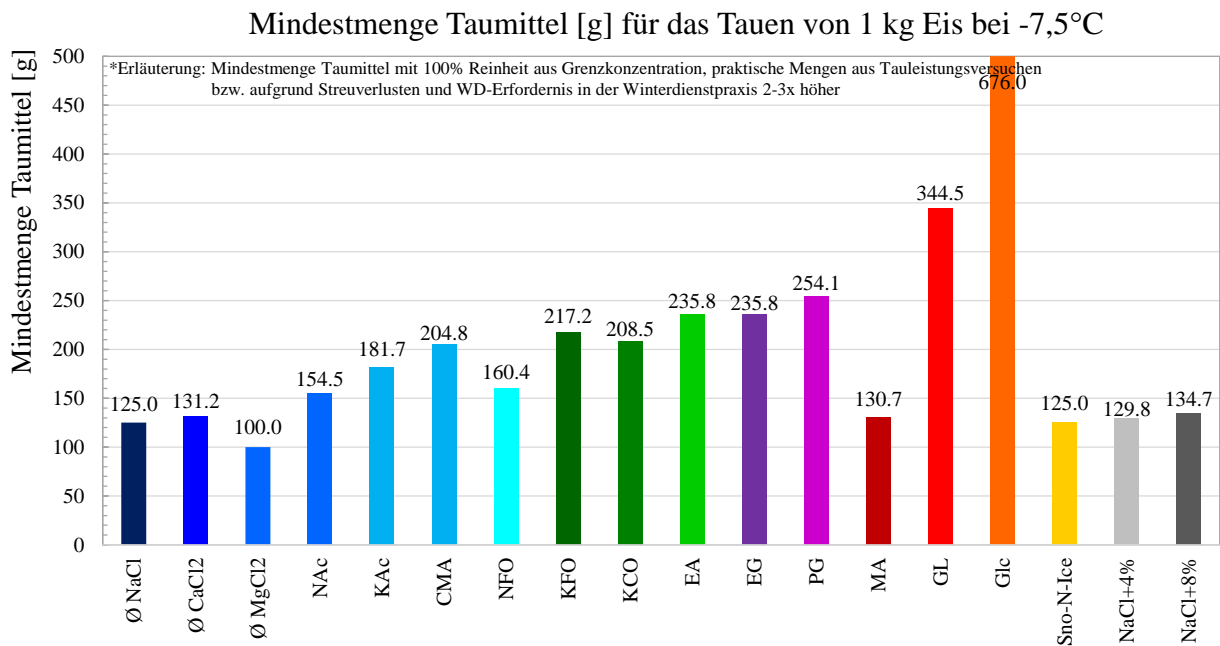


Abbildung 21: Mindestmenge Taumittel [g] für das Tauen von 1 kg Schnee/Eis bei -7,5°C auf Basis der Gefrierkurven (Taufvorgang bis zur Gleichgewichtskonzentration mit Umgebungstemperatur)

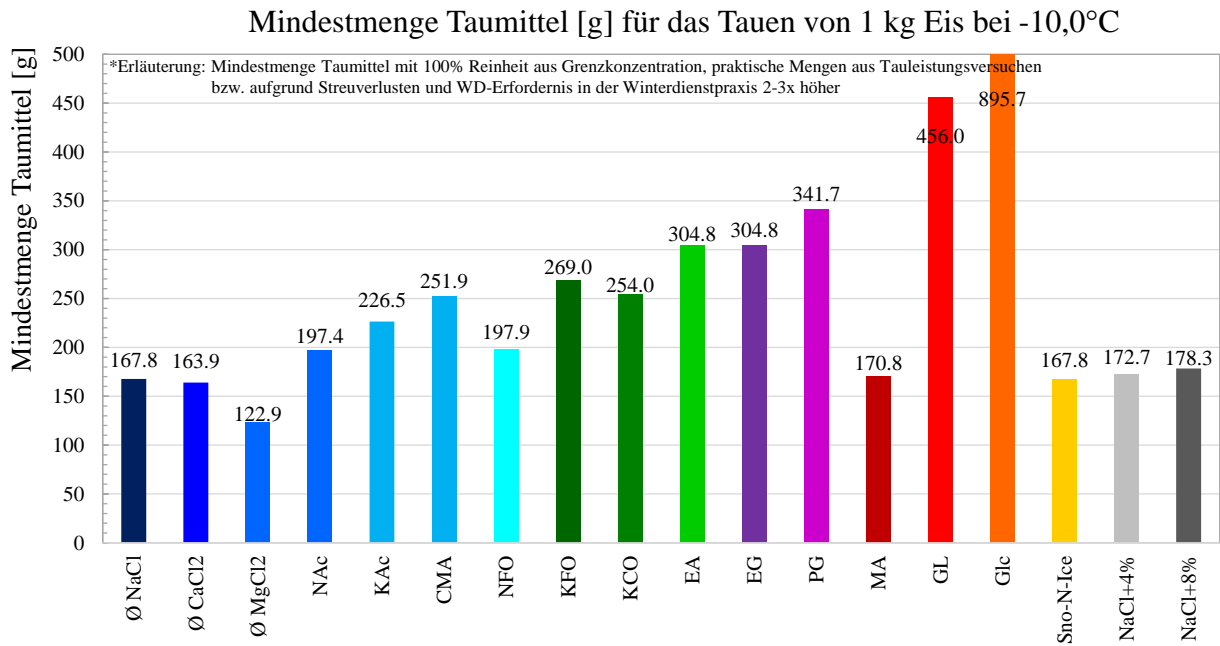


Abbildung 22: Mindestmenge Taumittel [g] für das Tauen von 1 kg Schnee/Eis bei -10,0°C auf Basis der Gefrierkurven (Taufvorgang bis zur Gleichgewichtskonzentration mit Umgebungstemperatur)

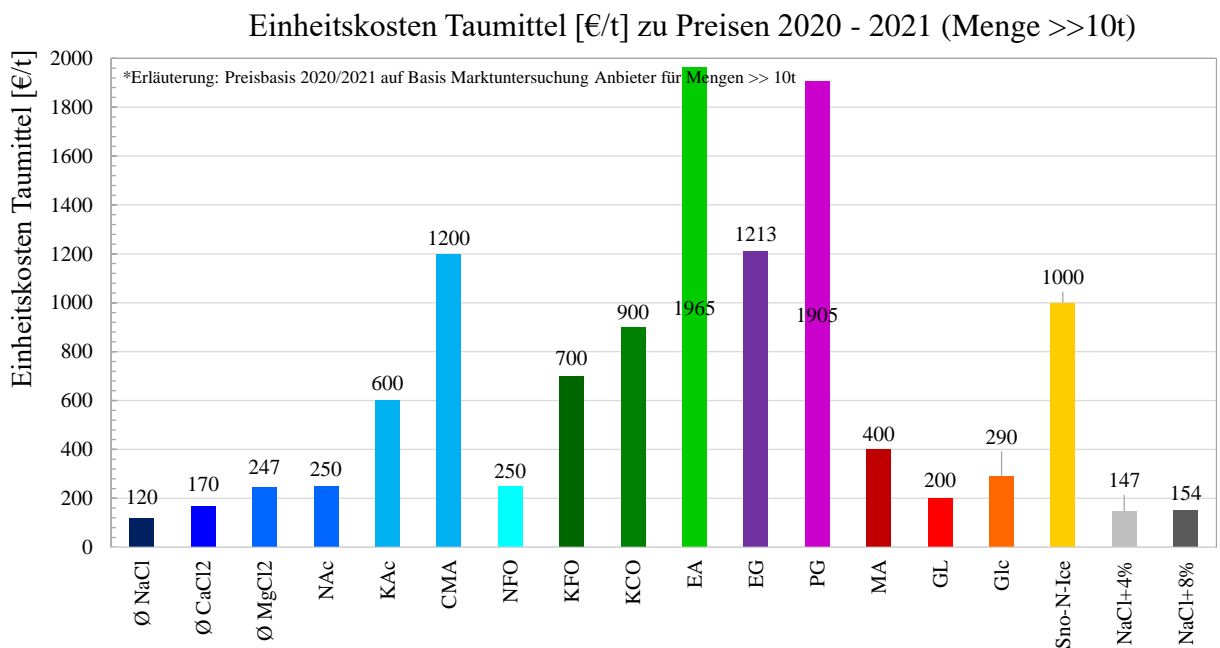


Abbildung 23: Einheitskosten der Taumittel [€/t] auf Basis der Marktuntersuchung zu Preisen 2020 – 2021 für hinreichend große Beschaffungsmengen auf dem internationalen Markt (nationale Preise können abweichen)

Die in Abbildung 23 dargestellten Einheitskosten der Taumittel basieren auf der Marktuntersuchung (Kap. 3.1.1) und belegen die vergleichsweise niedrigen Einheitskosten von NaCl, gefolgt von NaCl mit günstigen Zusätzen. Weiters vergleichsweise günstig sind CaCl₂, MgCl₂, NAc, NFO, GL und Glc. Bereits deutlich teurer sind KAc, KFO und KCO. Das Produkt Sno-N-Ice und das Grundtaumittel CMA sind nochmals erheblich teurer. Die Alkohole sind insgesamt sehr teuer, wobei MA relativ deutlich am günstigsten ist. Die Einheitskosten allein ohne Berücksichtigung des Taumittelbedarfes sowie der sonstigen Wirkungen sind jedoch ausdrücklich nicht für eine Beurteilung alleine ausreichend.

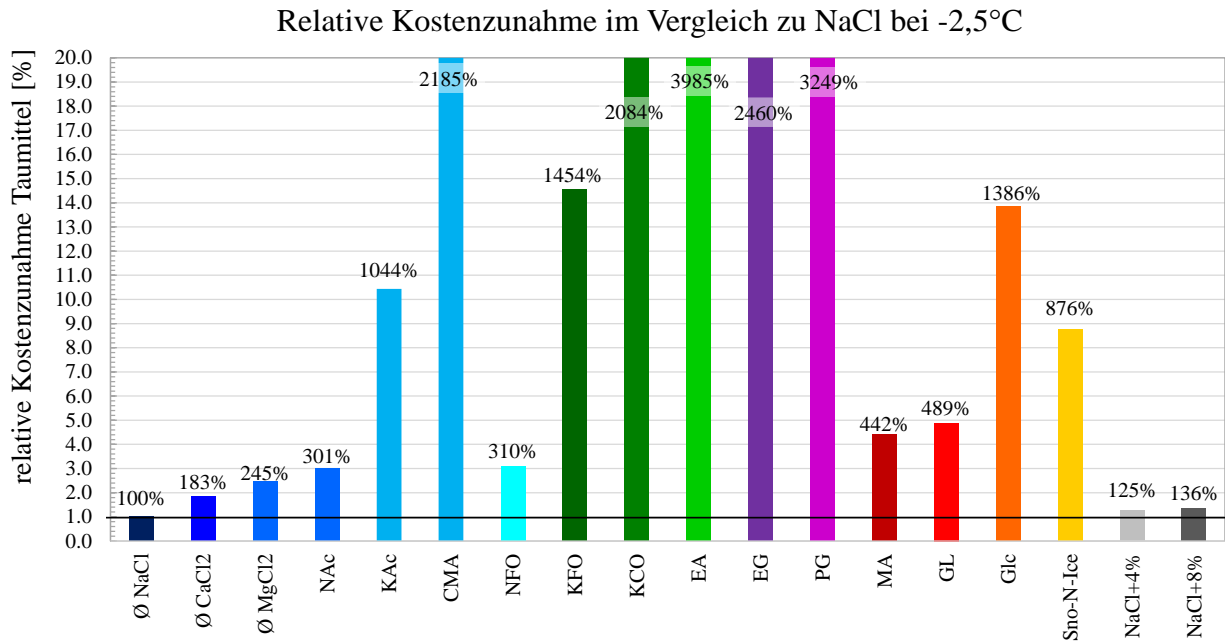


Abbildung 24: Relative Kostenzunahme für Taumittel im Vergleich zu NaCl unter Berücksichtigung der Mindestmenge Taumittel und der Einheitskosten bei einer Referenztemperatur von -2,5°C

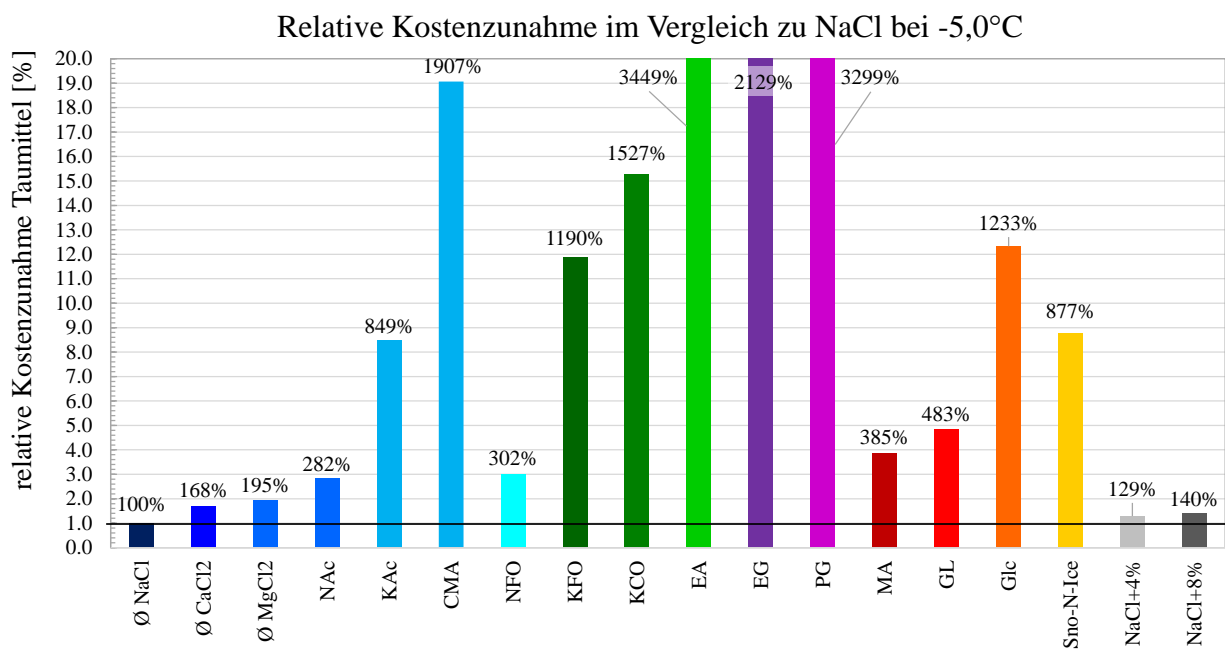


Abbildung 25: Relative Kostenzunahme für Taumittel im Vergleich zu NaCl unter Berücksichtigung der Mindestmenge Taumittel und der Einheitskosten bei einer Referenztemperatur von -5,0°C

Wesentlich spannender ist daher der Vergleich der relativen Kostenzunahme unter Berücksichtigung der Mindestmenge Taumittel für die Erzielung vergleichbarer Ergebnisse bei einer Referenztemperatur. Die Abbildung 24 bis Abbildung 27 zeigt diesen Vergleich im Verhältnis zu NaCl (100%) für die Referenztemperaturen -2,5°C, -5,0°C, -7,5°C und -10,0°C. Das Ergebnis des Vergleichs belegt eindeutig, dass NaCl aus Sicht des Winterdienstes allein das Taumittel mit der höchsten Kosteneffizienz ist. Vergleichsweise leistbare Alternativen sind wiederum NaCl + Inhibitor, CaCl₂, MgCl₂, NAc und NFO. KAc, KFO und KCO sind bereits ein Vielfaches teurer. Dies gilt umso mehr für die übrigen Taumittel, weshalb deren Anwendung nur bei erheblichen Vorteilen in anderen Bereichen eine Alternative mehr darstellen kann.

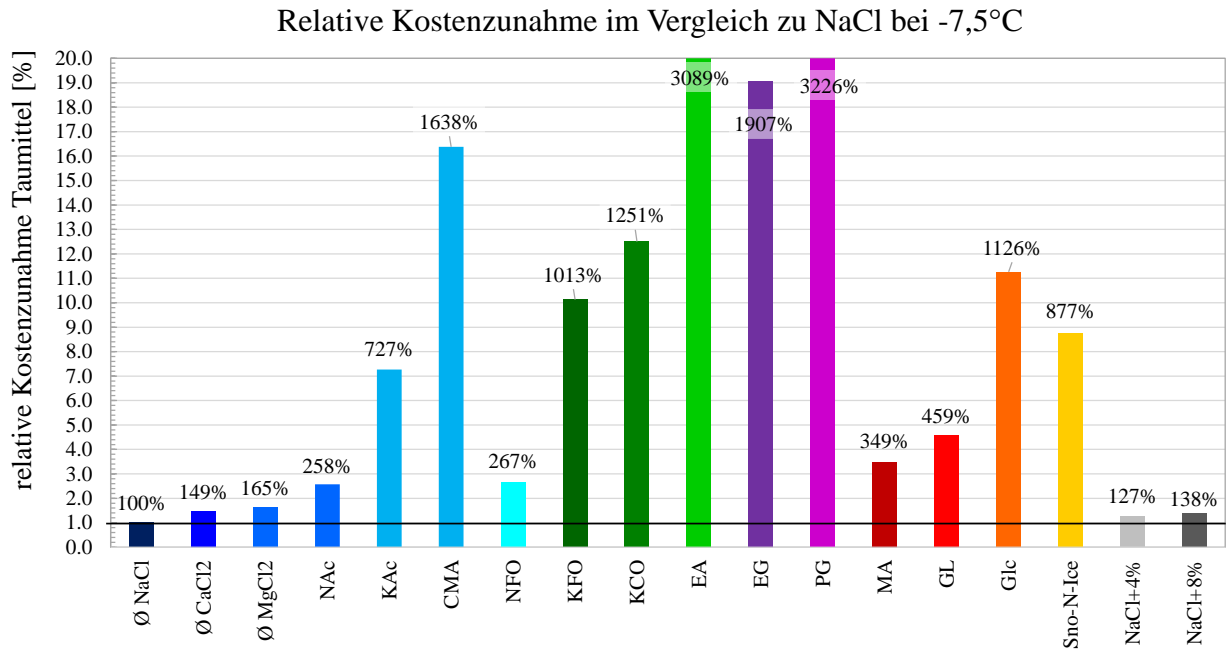


Abbildung 26: Relative Kostenzunahme für Taumittel im Vergleich zu NaCl unter Berücksichtigung der Mindestmenge Taumittel und der Einheitskosten bei einer Referenztemperatur von -7,5°C

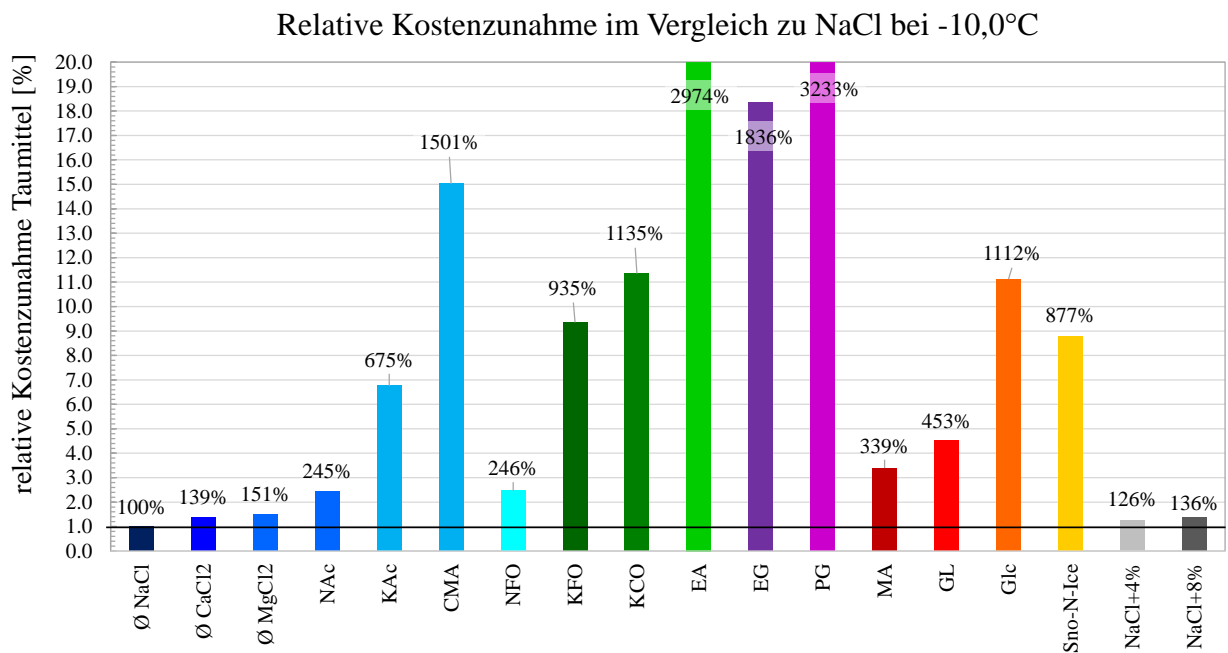


Abbildung 27: Relative Kostenzunahme für Taumittel im Vergleich zu NaCl unter Berücksichtigung der Mindestmenge Taumittel und der Einheitskosten bei einer Referenztemperatur von -10,0°C

3.3.3 Tauleistung Eisplatte

Eine häufig verwendete Methode zur Bewertung der Tauleistung ist die Prüfung nach SHRP H-205.1 für feste und H-205.2¹⁹ für flüssige Taumittel. In einer temperaturgeregelten Kammer bzw. einem temperaturgeregelten Raum werden dazu 130 ml Wasser in einer 223 mm x 3,2 mm großen runden Kunststoffschale gefroren, 4,17 g festes oder 3,8 ml flüssiges Taumittel aufgetragen und jeweils nach 10, 20, 30, 45 und 60 Minuten das geschmolzene Volumen gemessen und mit einer Spritze erneut aufgetragen (zwei Proben pro Temperatur). Es wurde jedoch festgestellt, dass diese Verfahren für wiederholbare Tests nicht ausreichend standardisiert sind.²⁰ Daher wurde ein modifizierter Tauleistungsversuch entwickelt, bei dem kleinere runde Petrischalen (100 mm x 15 mm), voreingestellte Temperaturen von -1 °C, -9 °C, -18 °C und nur die Anwendung von 1 g festem oder 0,9 ml flüssigem Taumittel auf vier Proben pro Temperatur angewendet werden, wobei eine Probe eine Kontrollprobe mit 23 %-NaCl-Sole ist.²¹

Basierend auf diesem Verfahren hat die TU Wien eine ähnliche Methode entwickelt, die auch typische Umlaufzeiten von Winterdienstfahrzeugen auf Autobahnen (maximal 3 Stunden) und städtischen Straßen (DTV > 1.000: maximal 5 Stunden) berücksichtigt²². Darauf aufbauend wurden Messintervalle von 10, 30, 60, 120 und 240 Minuten festgelegt, um die zeitabhängige Tauleistung für eine Referenztemperatur von -5°C (90% Niederschlagsereignisse bei diesen oder höheren Temperaturen) zu ermitteln. Der komplette Aufbau umfasst sieben Proben, sieben mit Taumitteln gefüllte Behälter, eine Waage und einen Eimer für geschmolzenes Eis und verbrauchtes Taumittel. Zum Einfrieren wurde eine Klimakammer (Binder MKF-720) mit Armeinlässen verwendet, die eine Handhabung der Proben von außen ermöglichen, ohne den Tauprozess durch das Öffnen der Türe zu stören. Da die Temperaturverteilung eine Streuung innerhalb der Kammer zeigt (bei -5,0 C ca. $\pm 1,0$ C), sind die Ergebnisse insbesondere für einen Vergleich verschiedener Taumittel unter gleichen Bedingungen geeignet. Bei den Ergebnissen ist weiters zu beachten, dass der Tautvorgang in der Praxis von mehreren Faktoren beeinflusst wird (insbesondere Temperatur, Wind, Luftfeuchtigkeit, Strahlung, Verkehr), die im Labor schwer nachzubilden sind. Dementsprechend kann es in der Anwendungspraxis und Feldversuchen zu einer starken Streuung der Beobachtungen kommen, die einen großen Aufwand für die Bereinigung um diese Faktoren erfordern.

Die Vorgehensweise der angewendeten Methode zur Prüfung der Tauleistung im Labor der TU Wien ist nachfolgend genauer beschrieben. In einem ersten Schritt werden Edelstahlbehälter (Durchmesser: 205 mm, Höhe: 37 mm) mit Wasser (ca. 500 g Leitungswasser) und Behälter mit 10 g Taumittel gefüllt, in die Klimakammer gestellt und die Gefrieretemperatur eingestellt. Bis zum Ende des Tests bleibt der Klimaschrank geschlossen und die Proben werden nur durch die Armeinlässe untersucht. Nach mindestens 12 Stunden Gefrierzeit werden die Eisplatten durch das Sichtfenster der Klimakammer visuell auf vollständige Eisbildung und mögliche Unregelmäßigkeiten überprüft. Anschließend wird die Masse der Probe und des Behälters gewogen, etwa 10 ± 1 g Taumittel aufgebracht, erneut gewogen und der Zeitpunkt notiert. Nach 10, 30, 60, 120 und 240 Minuten wird die Probe erneut gewogen (um eine mögliche Sublimation oder einen Handhabungsfehler festzustellen). Dann wird das geschmolzene Wasser inkl. Taumittel abgegossen und die verbleibende Probe wird gewogen. Die Menge des abgeleerten geschmolzenem Eises (abzüglich der Menge des Taumittels) geteilt durch das aufgebrachte Taumittel ergibt die Tauleistung in Abhängigkeit von der Zeit pro Gramm Taumittel. Nach Abschluss der Tests werden alle Edelstahlbehälter und Hilfsmaterialien gründlich gereinigt. In der Regel werden drei Proben für ein Taumittel pro Zeit und Temperatur getestet, so dass sich eine Gesamtzahl von 15 durchgeführten Tests pro Temperatur ergibt. Wie auch aus der Tabelle 2 ersichtlich wurden in WINTERLIFE vier verschiedene Taumittel bei einer Referenztemperatur von -5,0°C und den Einwirkungsauern von 10, 30, 60, 120 und 240 Minuten geprüft.

¹⁹ vgl. CHAPPELOW C. et al. (1992)

²⁰ vgl. KOEFOD S. et al. (2012)

²¹ vgl. AKIN M. et al. (2012).

²² vgl. RVS 12.04.12

Tabelle 2: Prüfprogramm der Tauleistung für eine Referenztemperatur von -5°C

	Einwirkzeit					Gesamt
	10 min	30 min	60 min	120 min	240 min	
NaCl	3	3	3	3	6	18
NAc	3	3	2	3	5	16
Sno-N-Ice	3	3	3	3	4	16
MgCl ₂	3	3	2	3	3	14
Summe	12	12	10	12	18	64

Die Ergebnisse der 64 Einzelprüfungen sind nachstehend dargestellt. Auffallend ist die hohe anfängliche Tauleistung von MgCl₂ innerhalb der ersten Stunde, nach zwei Stunden bleibt diese jedoch hinter der Tauleistung von NaCl zurück. Sno-N-Ice schneidet erwartungsgemäß etwas schlechter als NaCl ab, da es eine Mischung aus NaCl und Zusätzen ist, und daher die wirksame Tausubstanz je aufgebrachtener Menge geringer ausfällt. Die Tauleistung von Natriumacetat (NAc) ist bis zur Einwirkzeit von einer Stunde besser oder gleich gut wie die von NaCl, danach fällt sie jedoch deutlich zurück. Generell neigen diese Versuche zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Tauleistung aufgrund des an der Oberfläche verbleibenden Soleanteils, sind jedoch aufgrund der Wiederholbarkeit gut für einen Vergleich geeignet.

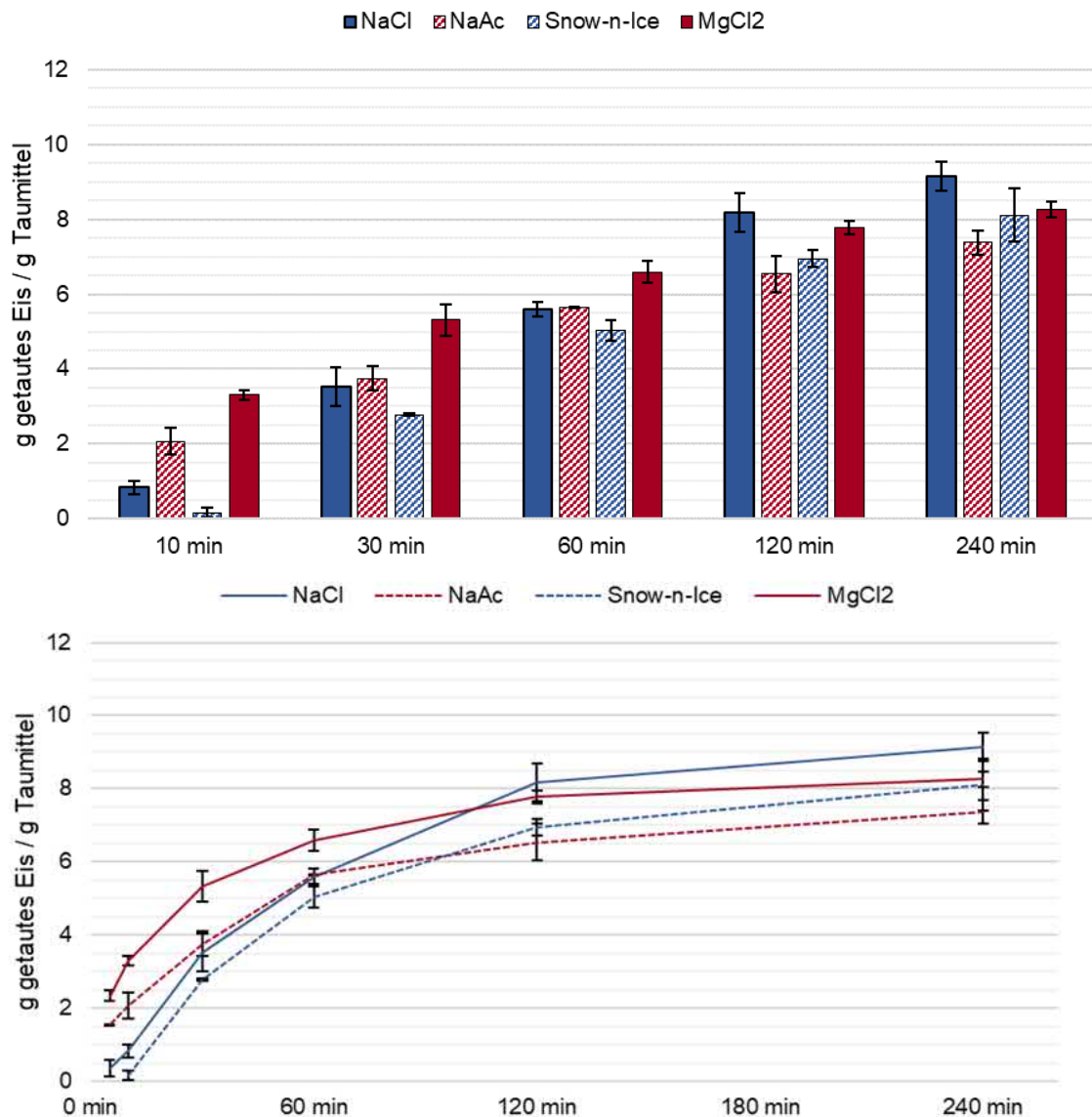


Abbildung 28: Vergleich der Tauleistung ausgewählter Taumittel nach Einwirkdauer bei -5,0°C

Werden die Ergebnisse der Tauleistungsversuche für die untersuchten Taubereiche in einem generalisierten Tauleistungsmodell zusammengefasst, lässt sich die Tauleistung für den in Abbildung 29 dargestellten Temperaturbereich und die Einwirkdauer vollständig abbilden. Wie in Kap. 2.3 angedeutet, nimmt die Tauleistung progressiv mit zunehmender Temperatur zu und weist ein degressives Wachstum mit zunehmender Einwirkdauer zur theoretischen Obergrenze aus der Gefrierkurve auf. Zusammengefasst für die Praxis bedeutet dies, dass eine ausreichende Tauwirkung erst nach einer hinreichend langen Einwirkdauer erreichbar ist und bei tieferen Temperaturen stark abnimmt. Für die Mehrzahl der Schneefallereignisse zwischen +2°C bis -2°C wird daher in der Regel mit NaCl und vergleichbaren Taumitteln eine gute Wirkung erzielt sein. Bis zu einer Temperatur von -5°C wird die Wirkung noch ausreichend sein und darunter benötigt es erhebliche Mengen Taumittel, um noch eine erkennbare Tauleistung in vertretbarer Zeit zu erzielen. Wie bereits an anderer Stelle angeführt ist die Referenztemperatur von -5°C insofern für einen Vergleich gut geeignet, als über 90% der Schneefallereignisse bei diesen oder höheren Temperaturen zu erwarten sind.

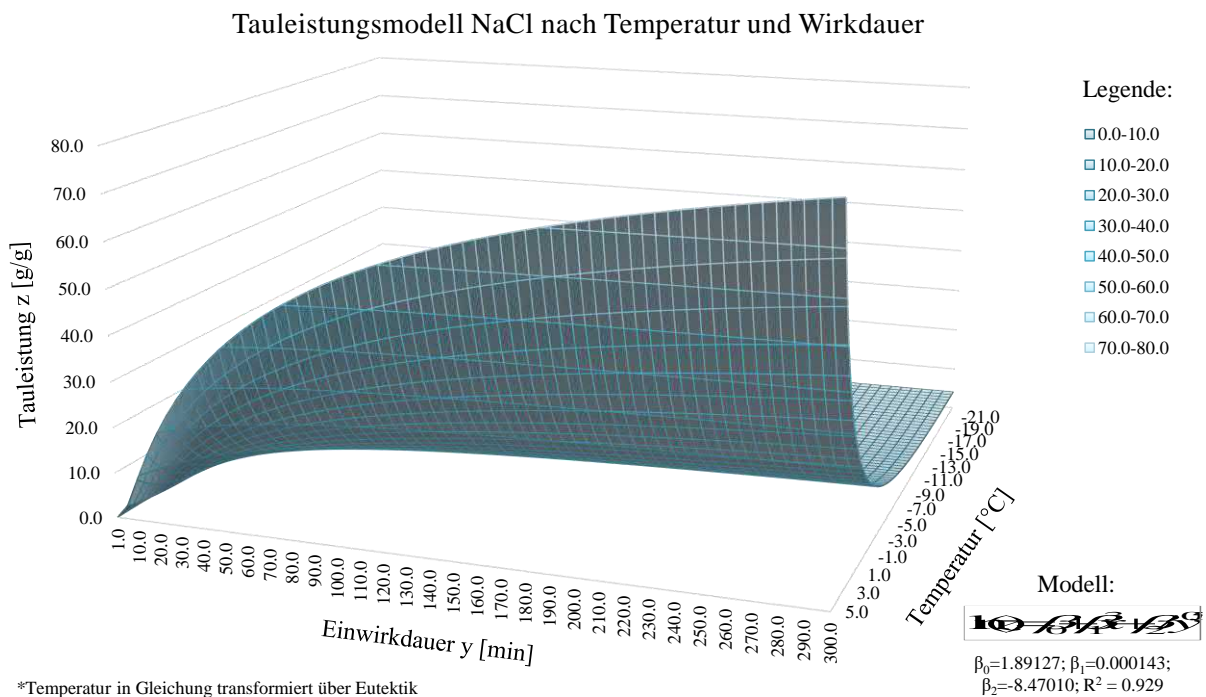


Abbildung 29: Generalisiertes Tauleistungsmodell für Natriumchlorid über einen Temperaturbereich von -21°C bis +5°C und einer Einwirkdauer von 0 bis 300 Minuten

3.3.4 Tauleistung Poxic

Tauraten bzw. Taukapazitäten werden für die Einsatzpraxis herangezogen um die quantitative Effizienz enteisender Substanzen (Tausalze) zu evaluieren²³. Die Taurate bzw. Taugeschwindigkeit ist definiert als die abgeleitete Tauwirksamkeit und gibt die Menge an Tausalz, die bei einer bestimmten Temperatur und Einwirkdauer notwendig ist, um eine definierte Menge an Eis zu schmelzen. Die Taukapazität gibt das Maximum an Eismenge, das ein bestimmtes Tausalz schmelzen kann, wenn sich das System im Gleichgewicht befindet. Abbildung 30 visualisiert den Vergleich von Eisplattenversuch und POXIC. Anhand dieser Kurve lässt sich ableiten, wie viel Eis mit 1,0 g Taumittel z. B. in 30 Minuten geschmolzen werden können. Dieser Wert kann dann auf die nach der Räumung verbleibende Schnee- oder Eismenge umgerechnet werden und daraus ein Taumittelbedarf für einen angemessenen Winterdienst berechnet werden.

Sowohl bei dem später beschriebenen Poxic, als auch dem Eisplattenversuch nimmt die Tauleistung degressiv zu einer theoretischen Obergrenze zu. Der Schmelzpunkt ist eine kolligative Eigenschaft, das bedeutet, er ändert sich mit der Anzahl der gelösten Teilchen. Wenn ein lösliches Salz auf eine Eisoberfläche gebracht wird, sinkt der Schmelzpunkt und das Eis beginnt zu schmelzen. Wenn sich mehr flüssiges Wasser bildet und die Konzentration der gelösten Teilchen sinkt, steigt der Schmelzpunkt wieder langsam an. Mit abnehmender Differenz zwischen Schmelzpunkt und Umgebungstemperatur läuft der Schmelzprozess immer langsamer ab, bis Schmelzpunkt und Raumtemperatur gleich sind und der Schmelzprozess stoppt. Zu diesem Zeitpunkt ist die maximale Menge an geschmolzenem Eis, die Taukapazität, erreicht. Aus diesem Grund wird die Kurve flacher und konvergiert zu einer Asymptote.

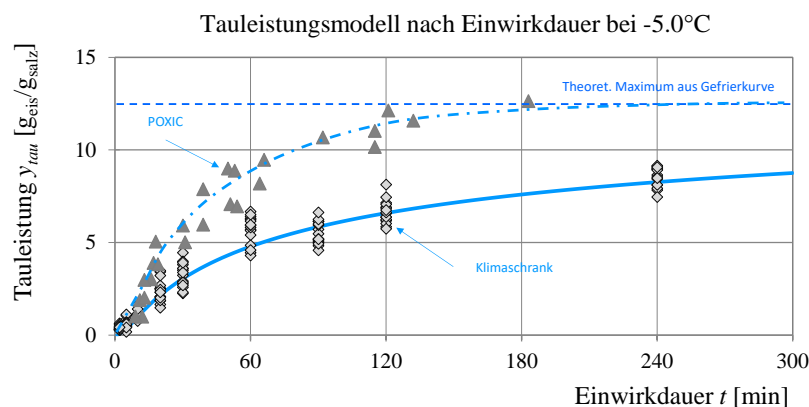


Abbildung 30: Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Tauleistung auf Eisplatte und mit Poxic für NaCl bei -5°C

Zur Evaluierung der Taurate diverser Taumittel wurde an der TU Wien am Institut für Materialchemie eine neue Versuchsanordnung entwickelt (Poxic). Im Gegensatz zu den im Klimaschrank-Versuch verwendeten großen Eisplatten, werden in dieser Anordnung kleine Mengen an Eis in eine Reaktionsplatte gegeben (Abbildung 31) und in einem Kryostaten auf konstanter Temperatur gehalten. Danach wird eine Konzentrationsreihe des gewünschte Taumittel hinzugefügt und die Zeit gemessen, bis die Eisprobe vollständig geschmolzen ist (siehe detaillierte Versuchsbeschreibung im folgenden Absatz). Im Zuge dieser neuen Versuchsanordnung entfällt das Problem der zurückgehaltenen Flüssigkeit (Kap. 3.3.3), da die gesamte Eisprobe aufschmilzt. Desweiteren ist der neue Versuch mit weniger Zeitaufwand verbunden, da mehrere Punkte gleichzeitig gemessen werden können. Die Evaluierungsversuche mit NaCl ergaben eine Schmelzkapazität von $13,0 \pm 0,5$ (Abbildung 32), die mit dem theoretischen Wert gut übereinstimmt.²⁴ Zusammenfassend erwies sich die Poxic-Kryostaten-Methode als zeitsparender, speziell in Bezug auf die Temperaturstabilität. Weiters liegen die erhaltenen Ergebnisse der Taukapazitäten näher am Theoriewert, so dass diese Methode für die Bestimmung der Taurate herangezogen wurde.

²³ Robert et al., (1992)

²⁴ Nilssen et al., (2016)

Die Evaluierung der Taurate erfolgt in einem Kryostaten des Typs *ministat 240* von der Firma Huber (Abbildung 31, A). Das Gerät kann auf eine beliebige Temperatur zwischen 25°C und -40°C eingestellt werden. Im ersten Schritt werden je 400 µl destilliertes Wasser in die 35 Löcher der Reaktionsplatte (grüne Platte) pipettiert (siehe Abbildung 31, B). Anschließend wird die Platte mit einem Parafilm® abgedeckt und zum Gefrieren über Nacht in den Tiefkühlschrank (-20°C) gestellt. Am nächsten Tag wird die Platte in die Kühlflüssigkeit des vortemperierten Kryostaten gestellt. Dabei ist zu beachten, dass der Kryostat auf -6 °C programmiert wird um die tatsächliche Probentemperatur von -5 °C zu erreichen. Nachdem die Reaktionsplatte temperiert ist, werden definierte Mengen an Salz zeitgleich in die Löcher gegeben (die Salzmenge innerhalb einer Reihe, i.e. von links nach rechts, nimmt zu). Der darauffolgende Schmelzprozess wird nun über eine Kamera (*CANON EOS 2000d*) aufgezeichnet. Jede Minute wird ein Bild aufgenommen, anhand dieser die genaue Schmelzzeit gemessen werden kann.

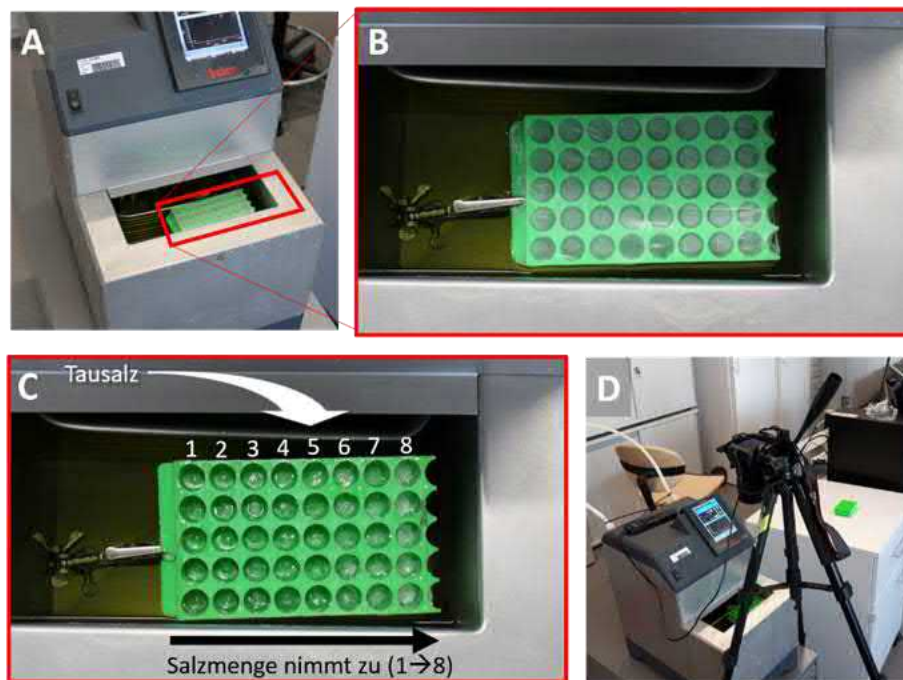


Abbildung 31: Darstellung des Poixic-Kryostat-Versuchs. A: Die Reaktionsplatte (in grün) wird in einem Kryostat ministat 240 der Firma Huber fixiert. Alle 35 Löcher der Platte sind mit einem definierten Volumen an Eis gefüllt und mit Parafilm® abgedeckt. B: Vergrößerte Darstellung der Reaktionsplatte im Kryostaten von der Vogelperspektive. C: Schmelzvorgang nach Zugaben von Taumittel. D: Der Schmelzvorgang wird mit einer Kamera (*CANON EOS 2000d*) im Minutentakt verfolgt.

Die Menge des Eises ist in jedem Loch gleich; die Menge des Salzes variiert jedoch, so dass nach dem Schmelzvorgang jede Probe eine andere Salzkonzentration enthält. Mit diesen Konzentrationen kann die Taurate in jeder Halterung berechnet und gegen die Zeit, die benötigt wurde um den gesamten Eiskwürfel zu schmelzen, aufgetragen werden. Auf diese Weise können in einem Versuch bis zu 35 Punkte auf einer Schmelzkurve ermittelt werden, was dieses Verfahren wesentlich zeitsparender macht als das Klimaschrankexperiment. Im Rahmen von WINTERLIFE wurden neun potentielle Taumittel (NaCl, CaCl₂, MgCl₂, NAc, KAc, NFO, KFO, KCO und Snow-N-Ice) auf ihre Tauleistung untersucht. Abbildung 32 stellt die Ergebnisse der Versuche bei -5°C für die verwendeten Trockensalze wieder. Durch Anpassung der Daten mit einer Fitfunktion ($y(t)=a \cdot (1-b^x)$) wird es möglich, die Tauraten unterschiedlicher Tausalze zu jedem beliebigen Zeitpunkt zu eruieren und zu vergleichen.

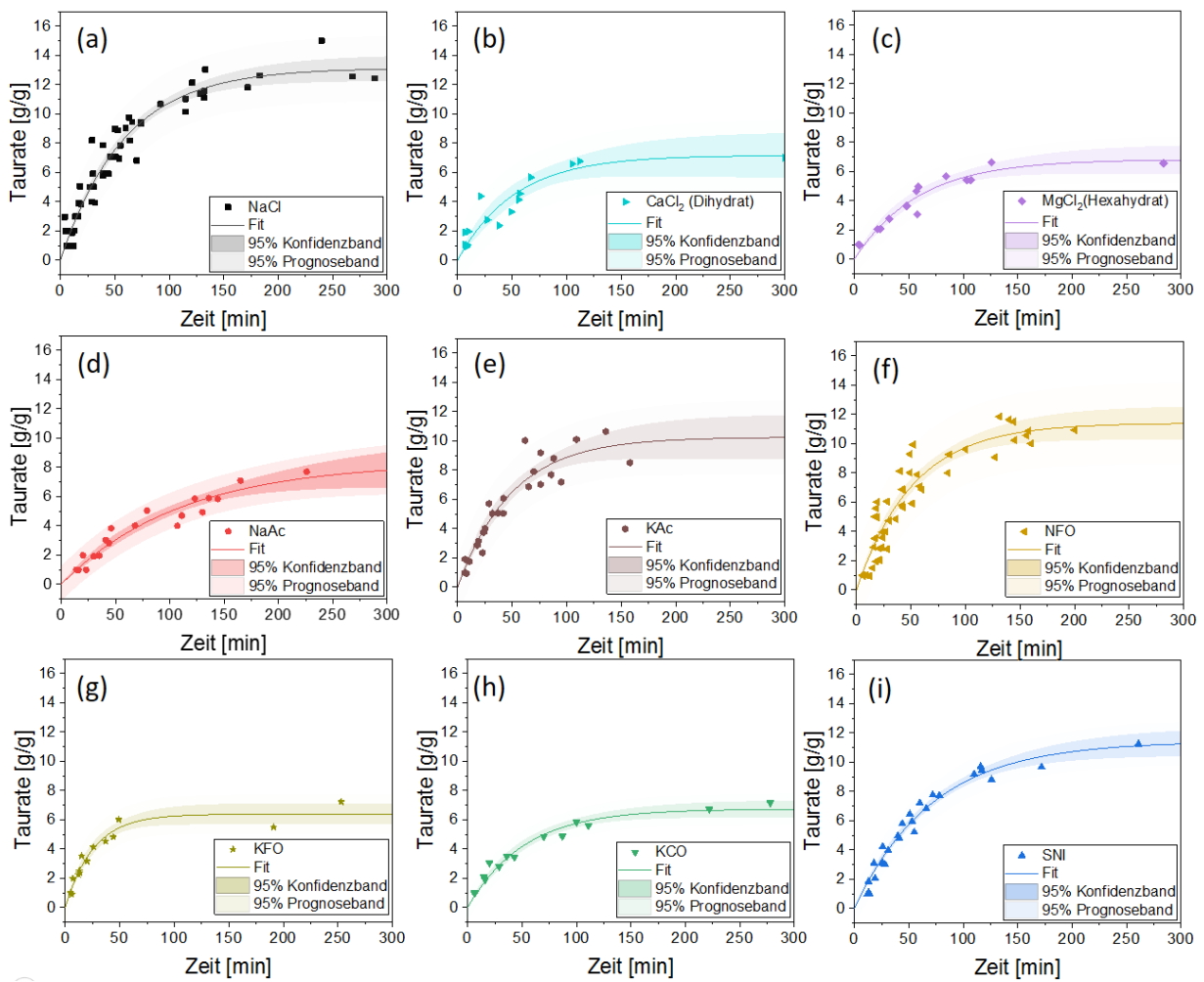


Abbildung 32: Darstellung Tauraten auf Basis der Poxic-Kryostat-Versuche von festem (a) NaCl, (b) CaCl₂·2 H₂O, (c) MgCl₂·6 H₂O, (d) NaAc, (e) KAc, (f) NFO, (g) KFO, (h) KCO und (i) Sno-N-Ice bei einer Temperatur von -5°C. Die Tauleistungsdaten wurden mit einer Fitfunktion des Typs $y(t) = a \cdot (1 - b^x)$ angepasst.

Tabelle 3: Prüfprogramm Tauleistung POXIC mit Vergleich der Tauraten der untersuchten Taumittel bei -5°C nach 30, 60 bzw. 100 min.

Tausalz	Taurate (-5°C) [g/g] nach		
	30 min	60 min	100 min
NaCl	5.27	8.43	10.76
CaCl ₂ (Dihydrat)	3.12	4.88	6.10
MgCl ₂ (Hexahydrat)	2.74	4.38	5.59
NAc	1.99	3.50	4.98
KAc	4.64	7.18	8.87
NFO	5.00	7.81	9.74
KFO	4.39	5.76	6.25
KCO	2.96	4.62	5.76
Sno-N-Ice	3.91	6.48	8.60

Die Ergebnisse zeigen, dass NaCl als effektivstes Taumittel aus dem Datensatz heraussticht. Sowohl nach 30 min als auch nach 60 bzw. 100 min ist die Taurate bei NaCl im Vergleich zu den übrigen Taumitteln am größten. Neben NaCl zeigten vor allem Natriumformiat (NFO) und Kaliumacetat (KAc) hohe Tauraten. Erwartungsgemäß zeigte Sno-N-Ice, welches zum größten Teil aus NaCl besteht, zu jedem gewählten Zeitpunkt geringere Werte als reines NaCl. Da Sno-N-Ice maßgeblich mit Zusatzstoffen versehen ist, wird eine etwas größere Menge des Taumittels benötigt um die gleiche Tauereffizienz von reinem NaCl zu erreichen. Zu den ineffizientesten Taumitteln in der untersuchten Serie zählten CaCl_2 und MgCl_2 . Jedoch muss hier berücksichtigt werden, dass für die Versuche die Hydrate der Salze verwendet wurden. Durch das beim Schmelzen freiwerdende Kristallwasser kommt es zu einem Verdünnungseffekt und die Taurate sinkt. Da die Reinsubstanzen sehr teuer bzw. die Chemikalien sehr hygroskopisch sind und bei Raumtemperatur Wasser stark anziehen, ist die Handhabung dieser Reinsalze unpraktisch und kommt in der Praxis kaum vor. Zusammenfassend zeigen die Versuche, dass von allen untersuchten Taumitteln unter üblichen Bedingungen NaCl die beste Tauleistung aufweist.

Um den korrosiven Eigenschaften von NaCl entgegenzuwirken, wurden innerhalb des WINTERLIFE Projektes diverse Inhibitoren untersucht (siehe Kapitel 3.4). Die vielversprechendsten Stoffe sind hierbei zuckerbasierte Substanzen (Glucose, Arabinose, Mannose, Maltose). Um den Einfluss dieser Zucker auf die Taurate von NaCl zu erheben, wurde das Salz mit den jeweiligen Zuckern vermengt (NaCl + 8 m% Zucker) und die Tauraten mit Hilfe der Poixic-Kryostat Methode evaluiert. Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung. Zusammenfassend belegen die Resultate, dass sich der Verlauf der Taurate von NaCl mit Zusatz von Zuckern, i.e. Glucose, Arabinose, Mannose oder Maltose in der gezeigten Dosierung von 8,0 m% nicht signifikant ändert.

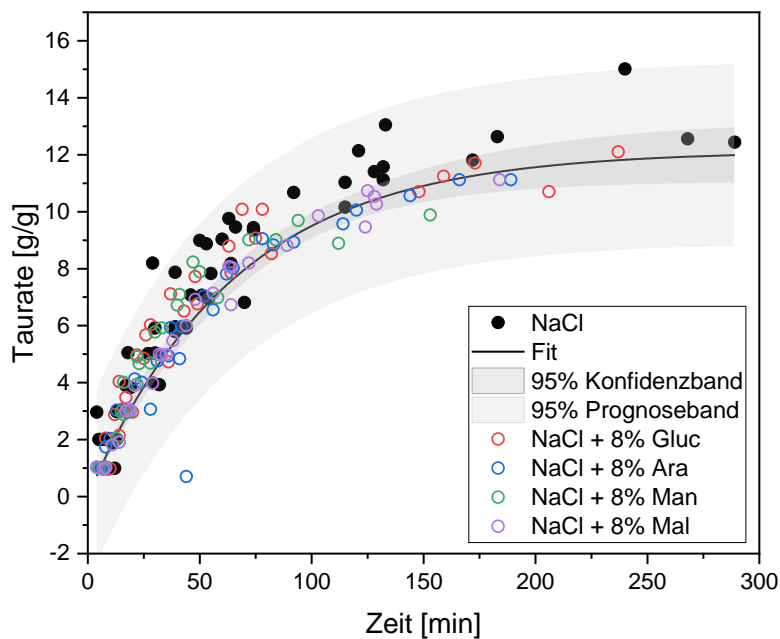
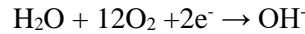


Abbildung 33: Einfluss umweltverträglicher Inhibitoren auf die Taurate von NaCl bei $-5,0^{\circ}\text{C}$. Reines NaCl (schwarz); NaCl+8 m% Glucose (rot), NaCl+8 m% Arabinose (blau), NaCl+8 m% Mannose (grün) und NaCl+8 m% Maltose (violett).

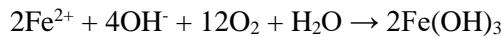
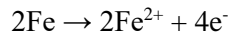
3.4 Korrosion und Inhibitoren

3.4.1 Korrosionsmechanismen und Einflussfaktoren

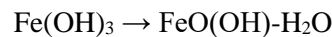
Stahl korrodiert unter der Einwirkung von Wasser, Luftsauerstoff und Wärme. Der Sauerstoff übernimmt den Transport der Elektronen, er diffundiert von außen in den Wassertropfen (siehe Schemazeichnung). Der Konzentrationsunterschied im Wassertropfen erzeugt eine Potentialdifferenz und der anodische und der kathodische Bereich bilden mit Wasser als Elektrolyten eine galvanische Zelle. Die entsprechende Redoxgleichung lautet:



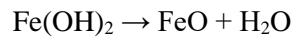
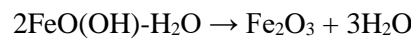
Die Elektronen reagieren mit Wasser und Sauerstoff zu Hydroxid-Ionen. Die Hydroxid-Ionen bilden mit den Eisen(II)ionen das Eisen(II)hydroxid. Dieses wird in der Gegenwart von Wasser und Luft zu Eisen(III)ionen umgesetzt. Zusammen mit den Hydroxidionen bildet sich bei dieser zweiten Redoxreaktion Eisen(III)hydroxid:



Durch Wasserabgabe bildet sich schwerlösliches Eisen(III)oxid-hydroxid, das sich auf der Eisenoberfläche ablagert:



Außerdem finden folgende Prozesse statt:



Das anfangs gebildete Gemisch aus Eisen(II)hydroxid und Eisen(III)hydroxid wird somit durch teilweise Wasserabgabe zu einer beständigen Mischung aus Eisen(II)oxid, Eisen(III)oxid und Kristallwasser, die umgangssprachlich als Rost bezeichnet wird: $x\text{Fe}^{\text{II}}\text{O} \cdot y\text{Fe}_2^{\text{III}}\text{O}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O}$

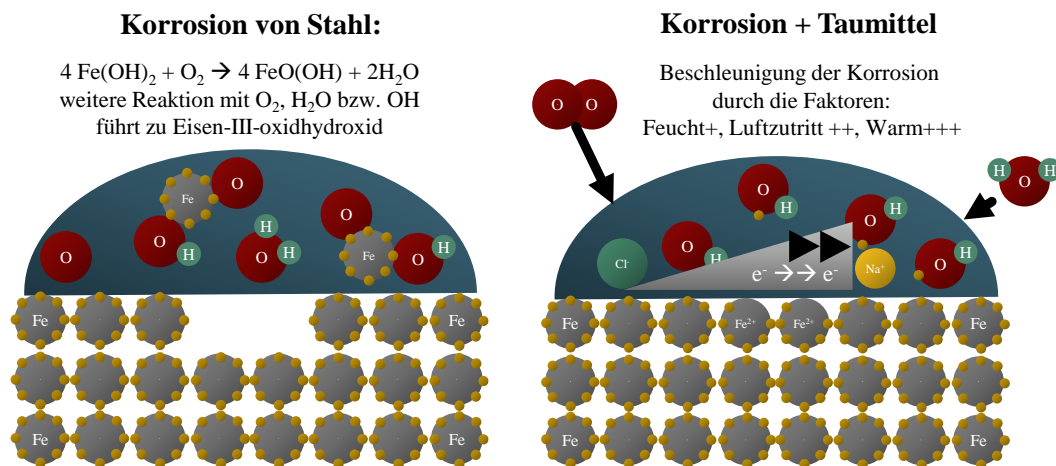


Abbildung 34: Chemischer Korrosionsprozess von Stahl ohne/mit Taumittelangriff

Beim Eisen(III)hydroxid sind die drei kristalline Modifikationen bekannt: Akaganeite $\beta\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH},\text{Cl})$, Lepidocrocite $\gamma\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$, Goethite $\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$, die gemäß der untenstehenden Bildungsenthalpien in der Reihenfolge 1. beta, 2. gamma, 3. alpha entstehen. Bei den gemischten Eisenoxiden ist das Magnetite $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$ relativ stabil, auch wenn sich keine Passivierung einstellt aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des feuchten Rosts und aufgrund der Sauerstoffpermeabilität.

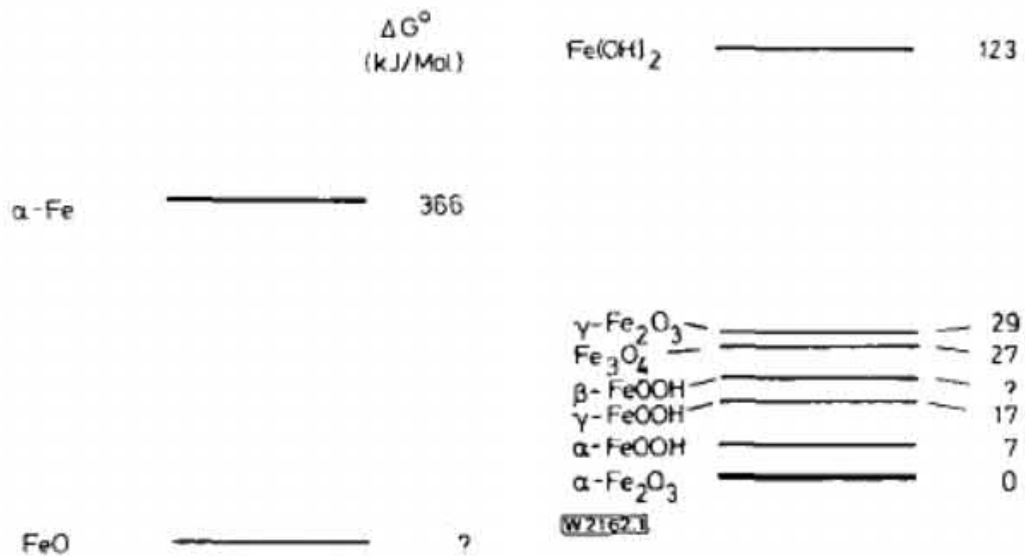


Abbildung 35: Freie Bildungsenthalpien von Eisen-Korrosionsprodukten, bezogen auf $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ²⁵

²⁵ Meisel, W. et al. (1981)

3.4.2 Korrosionsinhibitoren und Wirkmechanismen

Korrosionsinhibitoren können auf unterschiedlichste Weise wirken. Die wichtigsten Mechanismen sind a) Verhinderung von Wasser- und Sauerstoff-Zutritt durch eine entsprechende Lackierung oder Galvanisierung der Metalloberfläche. b) Verhinderung des Sauerstoff-Zutritts an die Metalloberfläche z.B. durch ein Blockieren der Reaktionsstellen am Eisen mit einem geeigneten Inhibitor, der sich an die Oberfläche anlagert. c) Zusatz eines Reduktionsmittels, das den Oxidationsvorgang bremst oder behindert und so der Rostbildung entgegenwirkt. Im Fall von Inhibitoren für den Zusatz zu den Taumitteln scheidet Variant a) aus. Bei b) und c) ist die Blockierung des Sauerstoff-Zutritts zum Reaktionszentrum der effizienteste Weg, aber auch die Reduktionswirkung kann einen Einfluss haben, wenn der Inhibitor bevorzugt mit Sauerstoff reagiert und damit Korrosion verhindert. Ein wichtiger Einflussfaktor ist auch die Wahl des Taumittels selbst. Natriumchlorid zeigt einen starken Korrosionseffekt, da die Chlorid-Ionen die Leitfähigkeit des Wassers erhöhen und dadurch die Korrosion beschleunigen. Anionen mit einer geringeren Ionenbeweglichkeit wie z.B. Acetate und Formiate wirken dagegen eher hemmend auf die Korrosion.

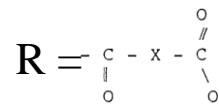
Zahlreiche zum Schutz metallischer Werkstoffe brauchbare, organische und anorganische Inhibitoren sind bereits bekannt und können je nach chemischer Zusammensetzung und Wirkung in Klassen eingeteilt werden (Abbildung 36). Beispiele für Inhibitoren sind demnach sind Chromate, Phosphate, Silikate, Amine, Amino- und Nitrophenole, Aminotriazole, Aldehyde, Benzothiazol, Guanidinderivate, Phosphoniumsalze, Aminoalkohole, Chinolinderivate, etc. Die organischen Verbindungen lassen sich in folgende Inhibitorklassen einteilen: Polyamide (z.B. Melamin-Polycarbonsäureamide), Hydrazide (z.B. Laurhydrazide), Zucker & Biofilme (z.B. Stärke, Zucker), Naturstoffe (z.B. Flavonoide, Acetate). Die Kriterien nach denen diese beurteilt werden sind a) das signifikante Herabsetzung der Korrosion, b) die Mischbarkeit mit Wasser, damit sie ihre Wirkung schnellst möglich entfalten können, c) Verfügbarkeit zu vertretbaren Kosten, d) es muss eine relative Ungiftigkeit oder Umweltverträglichkeit unter Berücksichtigung der Verwendung, Handhabung und Verdünnung bei Tauvorgang und Ausbringung garantiert sein. Aufgrund der Literaturrecherche in WINTERLIFE wurden für die Experimente Natriummetasilikat, Calciumnitrit und verschiedene Zucker ausgewählt.

Natriummetasilikat ist leicht löslich in heißem und kaltem Wasser. Die Auflösungs geschwindigkeit bzw. Löslichkeit ist abhängig von der Temperatur, der Partikelgröße (je kleiner, desto besser die Auflösung), den Partikeleigenschaften (je geringer die mechanische Stabilität und je poröser, desto besser die Auflösung) und dem Grad der Hydratation. Silikate in wässrigen Systemen neigen häufig zum Gelieren. Herkömmliche wässrige Korrosionsschutzmittel auf Silikatbasis sind somit nicht lagerstabil. Meist wird dem Natriummetasilikat ein Copolymerisat auf Basis von (Meth)acrylsäure und (Meth)acrolein zugesetzt. Natriummetasilikat bildet auf der Metalloberfläche eine dünne Schutzschicht und schützt so vor der Korrosion.

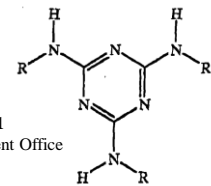
Calciumnitrit ist ein hygroskopischer weißer bis gelber Feststoff, der löslich in Wasser ist. Wasserfreies Calciumnitrit ist instabil und oxidiert langsam an Luft zum Nitrat. Wässrige Nitritlösung reagiert leicht mit

Übersicht ausgewählte Klassen von Inhibitoren

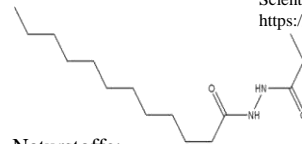
Melamin-Polycarbonsäureamide:



EP0846690A1
European Patent Office



Hydrazide:



Scientific Reports (2019) 9:3695,
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-40149-w>

Laurhydrazide N'-propan-3-one

Naturstoffe:

flavonoids such as vitexina (1), quercetina (2) y rutina (3); oligomeric proanthocyanins, triterpene acids, organic acids, sterols and amines such as phenylethylamine (4), tyramine (5), isobutylamine (6) and acetylcholine (7)

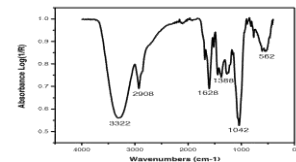


Figure 9. FT-IR spectrum of methanol extract of *Cratogeomys merriami*

J. Mater. Environ. Sci., 2019, 10 (2), pp. 101-112

Zucker & biofilms:

Cyclodextrine, ringförmige Kohlenhydrate wie Dextrane oder Saccharide, die Bakterien beim Abbau von Mais- oder Kartoffelstärke bilden, sind in den Focus der Forschungen gerückt.

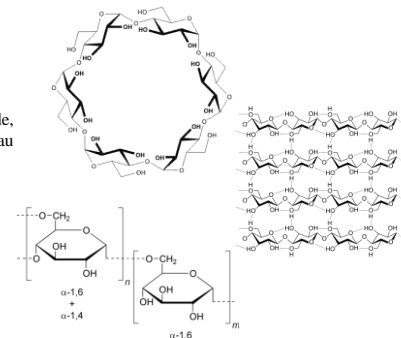


Abbildung 36: Übersicht ausgewählte Klassen von Inhibitoren und Stoffen zur Reduktion der Korrosivität

Oxidationsmitteln und wird dabei zu Nitrat oxidiert und ist somit ein starkes Reduktionsmittel und ein Korrosionshemmer. Calciumnitrit bildet eine ausgeprägte Passivschicht auf den meisten Metalloberflächen und liefert damit einen guten Korrosionsschutz. (Poly)Zucker zeigen sehr unterschiedliche Wasserlöslichkeit bei Raumtemperatur. Sie sind zwar sehr gute Reduktionsmittel und eignen sich auch um Reaktionszentren an der Metalloberfläche für den Sauerstoff-Angriff zu blockieren, aber Ihre Verfügbarkeit ist gerade bei größeren Zuckermolekülen durch die niedrige Löslichkeit begrenzt.

Tabelle 4: Löslichkeit von ausgewählten Inhibitoren bei Raumtemperatur [g/100g]

Substanz	Löslichkeit [g/100g]
Saccharose	200
Glucose	> 9,5
Maltose	4,8
Mannose	schwer löslich
Arabinose	7,2
Kalium Natri-	> 11,4
Cellulose	unlöslich
Weinstein	unlöslich

3.4.3 Korrosionsversuche WINTERLIFE

Ausgehend von der Literaturrecherche zeigen die eingesetzten Korrosionsprüfverfahren eine große Bandbreite sowohl in der Versuchsdurchführung, als auch den Ergebnissen. Weiters wurde in der Literatur überwiegend die gebräuchlichsten Taumittel (NaCl, CaCl₂, MgCl₂) und ein bis zwei andere Alternativen mit NaCl als Referenz für die Vergleiche untersucht. Aufgrund einer Reihe von Einflussfaktoren auf die Korrosionsraten im Allgemeinen (z. B. Temperatur, Exposition, Metallart) sowie der angewandten Prüfmethoden kann die Literatur zwar eine gewisse Orientierung bieten, die Ergebnisse sind jedoch nicht direkt vergleichbar. Eine vergleichbar breite Untersuchung von Grundtaumitteln und Inhibitoren wie in WINTERLIFE ist jedoch nicht bekannt. Daher wurde beschlossen, die wichtigsten Korrosionstestmethoden hinsichtlich ihrer Robustheit, Anwendbarkeit und Wiederholbarkeit zu testen und zu analysieren. Darüber hinaus wurden Korrosionstests mit allen wichtigen Taumitteln, sowohl ohne jegliche Zusätze als auch in Kombination mit verschiedenen Mengen vielversprechender Korrosionsinhibitoren, durchgeführt. Bestimmte Inhibitoren, vor allem Stärke und Zellulose, mussten aufgrund von Löslichkeitsproblemen aus dem Prüfprogramm ausgeschlossen werden.

Prüfprogramm Taumittel und Inhibitoren:

Eine Reihe bekannter Taumittel wurde mit Hilfe der Wechseltauchprüfung bei erhöhter Temperatur (Versuchsbeschreibung im nächsten Kapitel) getestet, um ihre Auswirkungen auf die Korrosion von unlegiertem Stahl (EN 10025 S235JR – in weiterer Folge als „Fe“ bezeichnet), Kupfer „Cu“ und verzinktem Stahl „Fe(Zn)“ zu klassifizieren. Tabelle 5 zeigt den Prüfplan und die Anzahl getesteter Proben für Taumittel als 5 % Lösung auf Fe, Fe(Zn) und Cu. Zudem wurden ausgewählte Taumittel (z.B. Kaliumcarbonat, Natriumacetat, Natriumformiat) als inhibierende Stoffe einer 5 % NaCl-Lösung zugemischt. Diese Versuchsreihe ist in der letzten Spalte der Tabelle 5 zu sehen (z.B. Kaliumcarbonat 8 % Fe = 5 % NaCl-Lösung auf Fe zuzüglich 8 % Kaliumcarbonat – 8 % bezogen auf die in der Lösung befindliche Trockenmasse von NaCl).

Tabelle 5: In WINTERLIFE mit Korrosionsversuchen getestete Grundtaumittel

Lösung	Formel	Fe	Fe(Zn)	Cu	8% Fe
NaCl	NaCl	39	6	6	-
Kaliumcarbonat	K ₂ CO ₃	6	3	3	3
Calciumchlorid	CaCl ₂	6	3	3	-
Magnesiumchlorid	MgCl ₂	6	3	3	-
Natriumacetat	C ₂ H ₃ NaO ₂	6	3	3	6
Natriumformiat	CHNaO ₂	6	3	3	3
Kaliumacetat	C ₂ H ₃ KO ₂	6	-	-	3
Kaliumformiat	CHKO ₂	6	-	-	3
Calciummagnesiumacetat	CMA	6	3	3	-
Wasser	H ₂ O	6	3	3	-
Sno-N-Ice	NaCl + Zusätze	6			

Tabelle 6 zeigt das Prüfprogramm und die Anzahl getesteter Proben verschiedener Inhibitoren, die einer 5 % NaCl-Lösung zugesetzt wurden. Die Konzentration des Inhibitors liegt zwischen 2 % und 8 % bezogen auf die Trockenmasse von NaCl. Das bedeutet, dass einer 1.000 g 5 % NaCl-Lösung, bestehend aus 50 g NaCl und 950 g H₂O, 2 % Inhibitor (2 % von 50 g = 1 g Inhibitor) zugesetzt wurde. Für jedes Taumittel wurden mindestens drei Proben getestet, mit Ausnahme von NaCl, das in jede Versuchsreihe aufgenommen wurde, um mögliche Probleme bei der Versuchsdurchführung zu erkennen und die Wiederholbarkeit zu gewährleisten. Zur Ermittlung des Verlaufs der Korrosionsreduktion in Abhängigkeit der Dosierung des Inhibitors wurde NaCl mit 2 %, 4 %, 6 % und 8 % Glucose getestet. Um den Prüfvorgang zu beschleunigen, wurden die weiteren Inhibitoren mit einer Dosierung von 4 % und 8 % geprüft.

Tabelle 6: In WINTERLIFE mit Korrosionsversuchen getestete Grundtaumittel + Inhibitoren

Lösung	Formel	2% Fe	4% Fe	6% Fe	8% Fe	8% Fe(Zn)	8% Cu
NaCl + Glucose	NaCl + C ₆ H ₁₂ O ₆	3	3	3	6	3	3
NaCl + Maltose	NaCl + C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	-	3	-	6	3	3
NaCl + Arabinose	NaCl + C ₅ H ₁₀ O ₅	-	3	-	3	3	3
NaCl + Mannose	NaCl + C ₆ H ₁₂ O ₆	-	3	-	3	3	3
NaCl + Glycerin	NaCl + C ₃ H ₈ O ₃	-	3	-	3	3	3
NaCl + Natriummetasilikat	NaCl + Na ₂ SiO ₃	-	3	-	3	3	3
NaCl + Calciumnitrit	NaCl + Ca(NO ₂) ₂	-	3	-	3	3	3
NaCl + Natriumphosphat	NaCl + Na ₂ HPO ₄	-	-	-	3	3	3

Standardisierter neutraler Salzsprühnebeltest (NSS):

Die Norm ISO 9227 (Korrosionsprüfung in künstlichen Atmosphären - Salzsprühnebeltests) legt drei Verfahren zur Bewertung der Korrosionsbeständigkeit fest: neutrales Salzsprühnebelverfahren (NSS), Essigsäuresalzsprühnebelverfahren (AASS) und kupferbeschleunigtes Essigsäuresalzsprühnebelverfahren (CASS). Im Folgenden wird die NSS-Prüfmethode beschrieben, bei der eine neutrale 5 % NaCl-Lösung (mit einem pH-Wert von 6,5 bis 7,2, gelöst in destilliertem oder deionisiertem Wasser mit einer Leitfähigkeit von höchstens 20 µs/cm) unter kontrollierten Bedingungen bei 25 °C zerstäubt wird. Die gereinigten Proben (150 x 70 x 1 mm) werden in der Sprühkabine in einem Winkel von 20° ± 5° zur Senkrechten platziert und nicht direkt besprüht, sondern nur mit dem Nebel der Sprühlösung benetzt.

Der Test wird bei 35 ± 2 °C durchgeführt, und die Proben werden zwischen 2 h und 1008 h besprüht. Zur Kalibrierung werden nach 48 h mindestens vier Referenzproben (150 x 70 x 1 mm) aus der Kammer entnommen und 10 Minuten lang bei 23 °C mit 20 % Diammoniumcitratlösung gereinigt. Eine zufriedenstellende Leistung wird erst bei einem Massenverlust von 70 ± 20 g/m² (entspricht 1-2 g Masseverlust einer Probe) erreicht. Um die Homogenität der Sprühdüsen in der Kammer zu überprüfen, sollten mindestens zwei Behälter mit einer Fläche von ca. 80 cm² eine Menge von 1,5 ± 0,5 ml/h auffangen.

Zertifizierte neutrale Salzsprühnebeltests sind teuer und erlauben nur 5 % NaCl-Lösung, für AASS und CASS teilweise auch Essigsäure und Kupferchlorid, nicht aber alternative Enteisungsmittel (MgCl₂, Kaliumformiat etc.) oder zusätzliche inhibierende Substanzen als Prüfmittel. Daher war es notwendig, die NSS-Testmethode zu replizieren, um andere Substanzen als 5 % NaCl-Lösung zu ermöglichen. Ein Schema des nachgebauten Geräts ist in Abbildung 37 zu sehen. Die folgende Aufzählung zeigt die Unterschiede zur ISO 9227:

- Geringerer Druck zur Zerstäubung der Prüflösung.
- Die Proben werden direkt besprüht.
- Variable Sprühdauer von 3 bis 5 Minuten je 2 Stunden, um ein durchschnittliches Durchsatzvolumen von 30 l pro Tag aufrechtzuerhalten. Dies entspricht 20 ml/h auf 80 cm² und bedeutet ein 10- bis 20-fach höheres Sprühvolumen. Anpassungen der Sprühdauer werden jeden zweiten Tag manuell vorgenommen.
- Die Kammer wird mit einem Ventilator belüftet, um eine Trocknungszeit von 120 Minuten, abzüglich einer Sprühzeit von 3 bis 5 Minuten, zu simulieren. Um sicherzustellen, dass die Belüftung keinen Einfluss auf die Sprühkegel hat, bleiben die Ventilatoren in der Sprühphase ausgeschaltet.
- Gesamtexpositionszeit von 21 Tagen (504 h).
- Durchschnittliche Temperatur in der Kammer von 19 °C.
- Probenabmessungen von 150 x 100 x 1 mm
- Probenwinkel von etwa 25° gegenüber der Senkrechten

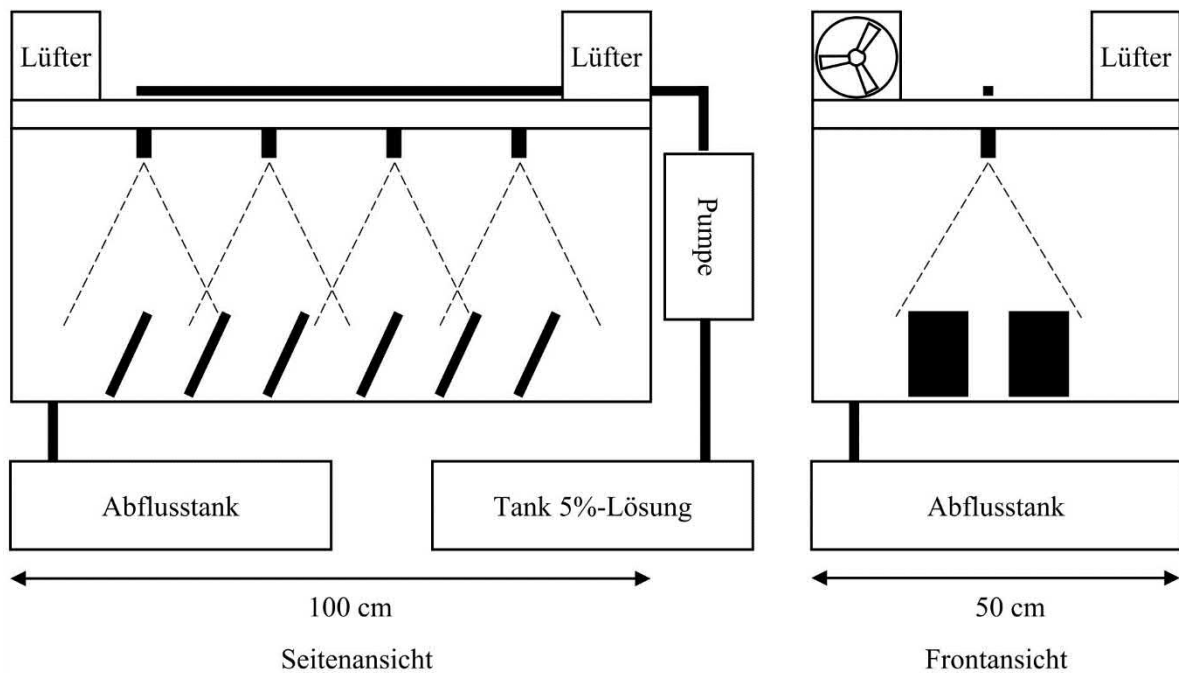


Abbildung 37: Entwickeltes Prüfgerät für Salzsprühnebeltest in WINTERLIFE

Salzlösungstauchversuche (Immersionsversuch IM):

Die Norm ASTM G31-72 (Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals) beschreibt eine weitere Prüfmethode zur Bestimmung des Einflusses von Korrosion auf Metalle in Form von Massenverlust. Ein Kessel, in den die Proben gehängt werden, wird mit einer Prüflösung gefüllt. Die Größe der Proben sollte so gewählt werden, dass ein großes Verhältnis von Oberfläche zu Masse und ein kleines Verhältnis von Randfläche zu Gesamtfläche erreicht wird. Vorgeschlagen wird ein kreisförmiger Probekörper mit einem Durchmesser von 38 mm und einer Dicke von 3 mm.

Eine genaue Temperatur der Lösung ist nicht vorgeschrieben, ihre Schwankungsbreite sollte jedoch innerhalb von ± 1 °C liegen, und es sollten Vorkehrungen getroffen werden, um den Verdunstungsverlust auf 1 Vol-% zu begrenzen. Die Lösung kann auch belüftet werden, wovon jedoch abgeraten wird, da die natürliche Atmosphäre des Korrosionsprozesses bevorzugt werden sollte. Übliche Prüfzeiten sind 48 bis 168 Stunden, bei geringen Korrosionsraten kann die Prüfdauer auch deutlich erhöht werden. Für die Reinigung der Probe werden drei verschiedene Vorgehensweisen vorgeschlagen: mechanische (Bürsten, Ultraschallverfahren...), chemische (Aceton, Alkohol...) und elektrolytische Reinigung. Nach der Reinigung wird die Korrosionsrate mit Hilfe des gemessenen Massenverlustes berechnet.

Aufgrund der Einfachheit der Prüfmethode nach der Norm ASTM G31-72 waren kaum Abänderungen erforderlich. Die folgende Aufzählung zeigt die verwendete Einstellung (siehe auch Abbildung 38):

- 11-Liter-Eimer, gefüllt mit 3-Liter-Lösung
- 5 % Lösung
- Gesamtexpositionszeit von 21 Tagen (504 h).
- Raumtemperatur von 19 °C.
- Probenabmessungen von 150 x 100 x 1 mm
- Probenwinkel von etwa 80° gegenüber der Senkrechten.

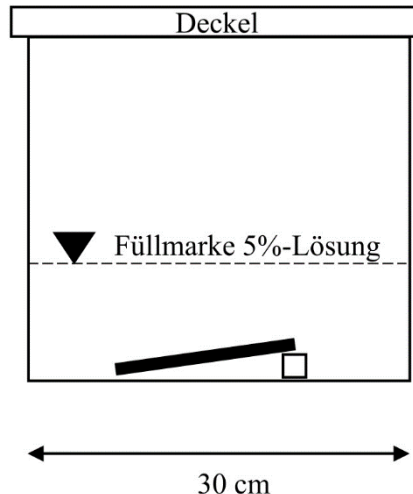


Abbildung 38: Entwickeltes Prüfschema Immersionstests in WINTERLIFE

Alternativer Salzlösungstauchversuch (Wechseltauchprüfung WT):

Die Norm ISO 11130 (Korrosion von Metallen und Legierungen - Wechseltauchprüfung in Salzlösung) legt ein weiteres Verfahren zur Beurteilung der Korrosionsbeständigkeit fest, bei dem die Proben wiederholt für bestimmte Zeiträume in eine Prüflösung eingetaucht und anschließend getrocknet werden. Für die Standardprüfung wird eine 3,38 % NaCl-Lösung (gelöst in destilliertem oder deionisiertem Wasser mit einer Leitfähigkeit von nicht mehr als $20 \mu\text{s}/\text{cm}$ bei $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) in einen Behälter gefüllt. In diesen Behälter werden drei gereinigte Proben desselben Typs ($90 \times 120 \times 1 \text{ mm}$) gelegt, die mindestens 10 mm unter der Oberfläche der Lösung vollständig eingetaucht sein sollten. Die Konzentration wird durch Zugabe von entionisiertem Wasser aufrechterhalten, um der Verdunstung entgegenzuwirken. Außerdem muss die Lösung alle 168 Stunden (sieben Tage) vollständig erneuert werden.

Die Temperatur der Prüflösung sollte $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ betragen, die Lufttemperatur beim Trocknen $70 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von höchstens 50 %. Die Proben werden 10 Minuten lang eingetaucht und 50 Minuten lang getrocknet, wobei sie insgesamt zwischen 20 und 90 Tagen geprüft werden. Nach Beendigung der Versuche wird nach gründlicher Reinigung und Trocknung der Masseverlust bestimmt. Für die allgemeine Reinigung und Handhabung der Proben wird auf ISO 8407 verwiesen. Die entwickelte Prüfapparatur für den alternativen Immersionstest ist in Abbildung 39 und Abbildung 40 zu sehen. Die folgende Auflistung zeigt die verwendeten Einstellungen und die Unterschiede zur ISO 11130:

- 5 % Lösung, Gesamtvolumen eines Behälters von 8 Litern.
- Belüftete, temperaturgeregelte Kammer, um Temperaturen von $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ zu erreichen.
- Relative Luftfeuchtigkeit während der Trocknung $85 \pm 10 \text{ } \%$ bei $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Gesamtexpositionszeit von 21 Tagen (504 h).
- Höhere Temperatur der Lösung: $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Niedrigere Temperatur in der Trocknungsphase: $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Probengröße $150 \times 100 \times 1 \text{ mm}$.
- Probenwinkel von etwa 20° gegenüber der Senkrechten.

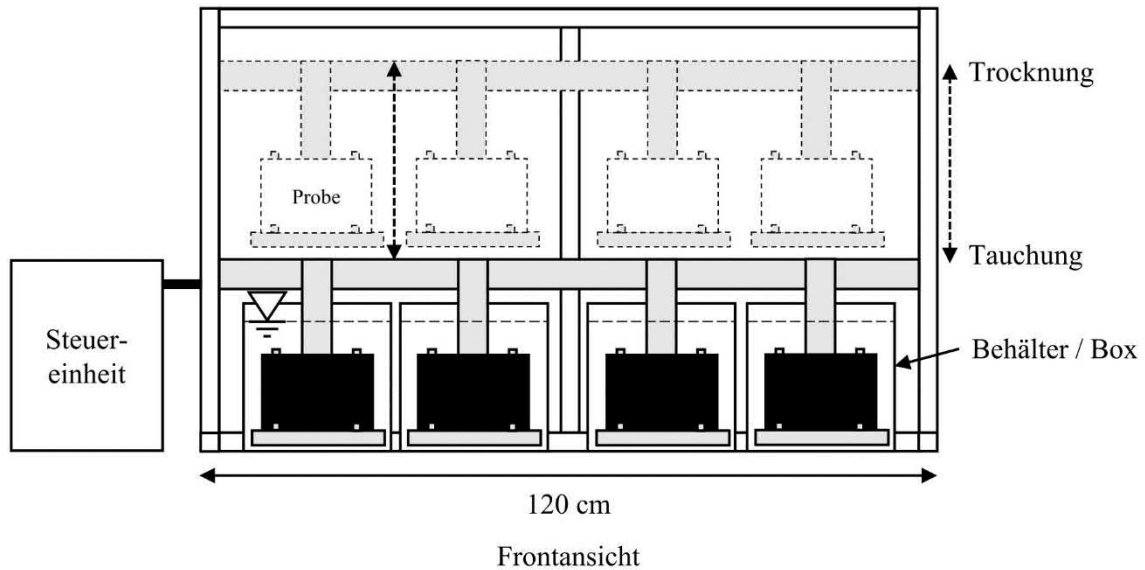


Abbildung 39: Entwickeltes Prüfgerät für die Wechseltauchprüfung in WINTERLIFE - Frontansicht

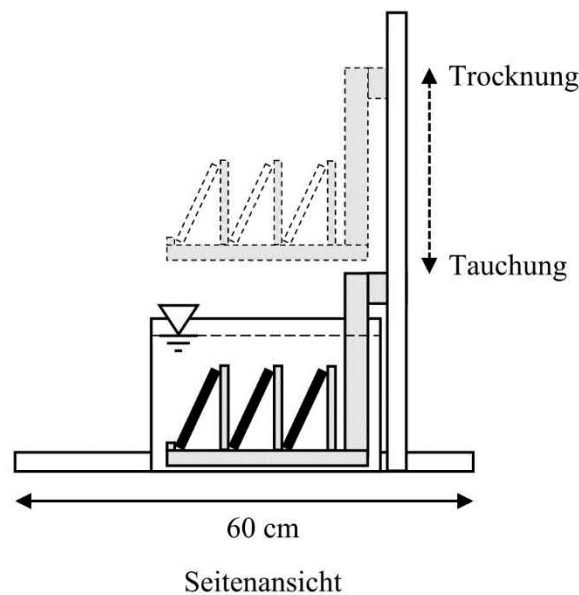


Abbildung 40: Entwickeltes Prüfgerät für die Wechseltauchprüfung in WINTERLIFE - Frontansicht

Verfahren zur Bestimmung des Korrosionsgewichtsverlustes:

Die Norm ISO 8407 (Korrosion von Metallen und Legierungen - Entfernung von Korrosionsprodukten) wird in vielen der bereits genannten Prüfverfahren herangezogen. Für die allgemeine Reinigung wird eine leichte mechanische Behandlung durch Bürsten empfohlen, um anhaftende Korrosionsprodukte zu entfernen. Können letztere nicht vollständig entfernt werden, werden die folgenden drei Arten von Verfahren empfohlen: chemische, elektrolytische und stärkere mechanische Behandlungen. Dabei ist Vorsicht geboten, um das unedle Metall nicht zu entfernen. Die Masse der Probe sollte in Abhängigkeit von den Reinigungszyklen angegeben werden, bis Massekonstanz erreicht wurde. Für chemische Verfahren sollten nur Reinigungslösungen verwendet werden, die das Grundmetall nicht angreifen. Für die Reinigung von Eisen- und Stahlproben wird vorzugsweise eine 20 % Diammoniumhydrogencitratlösung im Ultraschallbad verwendet. Als elektrolytisches Verfahren wird eine kathodische Behandlung mit 100 A/m² Stromdichte unter Verwendung einer Kohlenstoff- oder Platinanode und einer 10 % Diammoniumhydrogencitratlösung genannt. Zu den mechanischen Verfahren gehören Abkratzen, Schrubben, Bürsten, Ultraschallverfahren, Sandstrahlen usw. Einige dieser Verfahren können jedoch zur Entfernung von unedlem Metall führen und sollten daher mit Vorsicht behandelt werden.

Im Projekt WINTERLIFE wurde die empfohlene Kombination aus mechanischer und chemischer Reinigung mit Hilfe eines Ultraschallbads gewählt. Nach Beendigung des Prüfprogramms werden alle Proben mit Leitungswasser gereinigt und anhaftende Korrosionsprodukte durch vorsichtiges Abtupfen mit einem Papiertuch entfernt. Anschließend werden bis zu neun Proben in einem Ultraschallbad (siehe Abbildung 16) mit einer 20 % Diammoniumhydrogenzitratlösung bei 50 °C 30 Minuten lang gründlich gereinigt, dann mit einem Papiertuch trocken getupft und gewogen. Dieser Schritt wird so oft wiederholt (die Zeit im Ultraschallbad wird nach dem ersten Durchlauf von 30 Minuten auf 10 Minuten reduziert), bis die Massenkonzanz erreicht ist. Der relative Massenverlust wird berechnet, indem der Massenverlust durch die Ausgangsmasse vor dem Test dividiert wird. Diese Vorgehensweise erlaubt, im Vergleich zu anderen Methoden, ein hohes Maß an Wiederholbarkeit.



Abbildung 41: Reinigung der Proben im Ultraschallbad zur Bestimmung des Gewichtsverlustes

Vergleich von Korrosionsprüfmethoden und Anwendbarkeit:

Wie in ISO 11130 dargelegt, wird die Korrosion von vielen Faktoren beeinflusst und kann unter verschiedenen Bedingungen stark variieren. Folglich sind die Ergebnisse nicht nur des alternativen Immersionstests, sondern auch des Immersionstests (ASTM G31-72) und des neutralen Salzsprühtests (ISO 9227) nicht direkt auf reale Situationen übertragbar. Tests unter realen Bedingungen (z. B. Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, längere Eintauch- und Trocknungszeiten...) würden zu deutlich längeren Testzeiten führen und ein Prüfprogramm damit ineffizient und teuer machen. Für den relativen Vergleich verschiedener Taumittel mit oder ohne zugesetzte Inhibitoren sind die hier vorgestellten Methoden je-doch im Allgemeinen geeignet, wenngleich nicht alle von ihnen geringe Abweichungen aufweisen und einfach zu handhaben sind. Tabelle 8 gibt einen Überblick über die mit 5 % NaCl-Lösung auf Fe-Platten getesteten Methoden und ihre Randbedingungen.

Für die Wechseltauchprüfung (WT) wurden zwei verschiedene Umgebungstemperaturen untersucht: Raumtemperatur (WT @ RT) sowie erhöhte Temperatur (wie für NSS erforderlich: 35 ± 2 °C) in einer Klimakammer (WT @ KK) und, um eine große Anzahl von Proben gleichzeitig prüfen zu können, in einem temperaturgeregelten 10-Fuß-Container (WT @ CT). Bei diesen Tests betrug der Eintauchzyklus gemäß ISO 11130 eine Stunde, wobei die Proben 10 Minuten lang vollständig in die 5% NaCl-Lösung eingetaucht und 50 Minuten lang getrocknet wurden. Um den Unterschied in der Dauer des Eintauchens der Proben zu untersuchen, wurde zusätzlich ein weiteres Szenario bei Raumtemperatur getestet, bei dem der Zyklus auf eine halbe Stunde reduziert wurde (WT @ RT 1/2h).

Zudem wurden zwei Testszenarien gemäß ASTM G31-72 durchgeführt, bei denen die Proben 21 Tage lang (IM @ RT 21d) und sieben Tage lang (IM @ RT 7d) bei Raumtemperatur vollständig in die 5% NaCl-Lösung eingetaucht wurden. Die Temperatur war im Vergleich zu den anderen Tests etwas höher, da das System keinen Luftaustausch mit der Umgebung zulässt. Auf der Grundlage der neutralen Salzsprühnebel-Prüfmethode (NSS) wurden drei Schränke gebaut, in denen die Proben einem zweistündigen Zyklus ausgesetzt wurden, der aus einer dreiminütigen Besprühung mit einer 5% NaCl-Lösung und einer anschließenden 117-minütigen Trocknungsphase bestand. Dieser Zyklus wurde so gewählt, dass mit den verwendeten Düsen ein Durchsatz von 30 l Lösung pro Tag erreicht werden konnte. Auch dieser Test wurde bei Raumtemperatur durchgeführt.

Tabelle 7: Rahmenbedingungen der Methoden zur Prüfung der Korrosivität

Bez.	Prüfung	Umgebung	Temp.	RLF	Zyklus	Anzahl n
IM @ RT 21d	Immersionsprüfung	Raumtemperatur	21.87 °C ±0.95 °C	-	21 Tage Immersion	5
IM @ RT 7d	Immersionsprüfung	Raumtemperatur	21.87 °C ±0.95 °C	-	7 Tage Immersion	5
NSS @ RT 2h	neutr. Salzsprühprüfung	Raumtemperatur	19.15 °C ±0.79 °C	33.73 % ±7.69 %	2h (3 min Besprühung, 117 min Trocknung)	15
WT @ KK 1h	Wechsel-tauchprüfung	Klimakammer	34.25 °C ±0.68 °C	ca. >70 %	1h (10 min Immersion, 50 min Trocknung)	12
WT @ CT 1h	Wechsel-tauchprüfung	temperierter Container	34.24 °C ±0.72 °C	79.47 % ±8.61 %	1h (10 min Immersion, 50 min Trocknung)	23
WT @ RT 1/2h	Wechsel-tauchprüfung	Raumtemperatur	18.72 °C ±0.72 °C	32.12 % ±4.67 %	1/2h (1 min Immersion, 29 min Trocknung)	12
WT @ RT 1h	Wechsel-tauchprüfung	Raumtemperatur	18.72 °C ±0.72 °C	32.12 % ±4.67 %	1h (10 min Immersion, 50 min Trocknung)	12

Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse, ausgedrückt als prozentuellen Massenverlust, der unterschiedlichen Prüfmethode. Die Immersionsprüfung (IM) zeigt nur sehr geringe Auswirkungen auf die Korrosion, der Massenverlust betrug 0,20 M% nach 21 Tagen bzw. 0,07 M% nach 7 Tagen. Dieser geringe Massenverlust lässt auch zu, dass Handhabungsfehler bei Durchführung der Prüfung und, wahrscheinlich in viel größerem Ausmaß, bei Reinigung der Proben einen großen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Alle bei Raumtemperatur durchgeführten Prüfmethode weisen höhere Massenverluste auf: die neutrale Salzsprühnebelprüfung (NSS) und die Wechseltauchprüfungen (WT) liegen im Bereich von 2-4 M% Massenverlust. Dieses Korrosionsniveau ist nicht hoch genug, um mögliche Verzerrungen durch die Reinigung vernachlässigen und die Auswirkungen von (geringen Dosen) inhibierenden Substanzen erkennen zu können.

Da beim neutralen Salzsprühtest (NSS) NaCl-haltige Aerosole versprüht werden, kann eine Korrosion der umgebenden Materialien nicht ausgeschlossen werden. Daher ist die Prüfung bei höheren Temperaturen in der Klimakammer oder im temperaturgeregelten Container keine praktikable Option. Damit ist nur die Wechseltauchprüfung (WT) geeignet Prüfungen bei höheren Temperaturen durchzuführen. Die Ergebnisse der WT in der Klimakammer zeigen große Streuungen, die wahrscheinlich durch den temperierten, unregelmäßigen starken Luftstrom innerhalb der Kammer verursacht werden. Zudem hat die Klimakammer nur für eine Prüfvorrichtung (mit 12 Probekörpern) Platz. Stattdessen wurde ein 10-Fuß-Container mit Temperaturregelung angeschafft, der Platz für drei Prüfgeräte hat, sodass 36 Proben gleichzeitig geprüft werden konnten (siehe Abbildung 43). Die Ergebnisse der WT im temperierten Container zeigen deutlich höhere Korrosionsraten sowie deutlich geringere Abweichung als in der Klimakammer (± 1 M% statt $\pm 2,4$ M%). Die Ergebnisse aller Prüfmethode relativ zur (in weiterer Folge gewählten) Prüfmethode WT@CT ist in Abbildung 44 zu sehen und zeigt, dass damit verglichen die Methode WT@KK nur mehr 80 % des Massenverlustes verursacht, alle anderen Methoden weniger als 20 %. Ein optischer Vergleich der Korrosionswirkung auf die Stahlplatten in Abhängigkeit der Prüfmethode ist im Kapitel 5.5.3 bzw. Abbildung 84 ersichtlich.

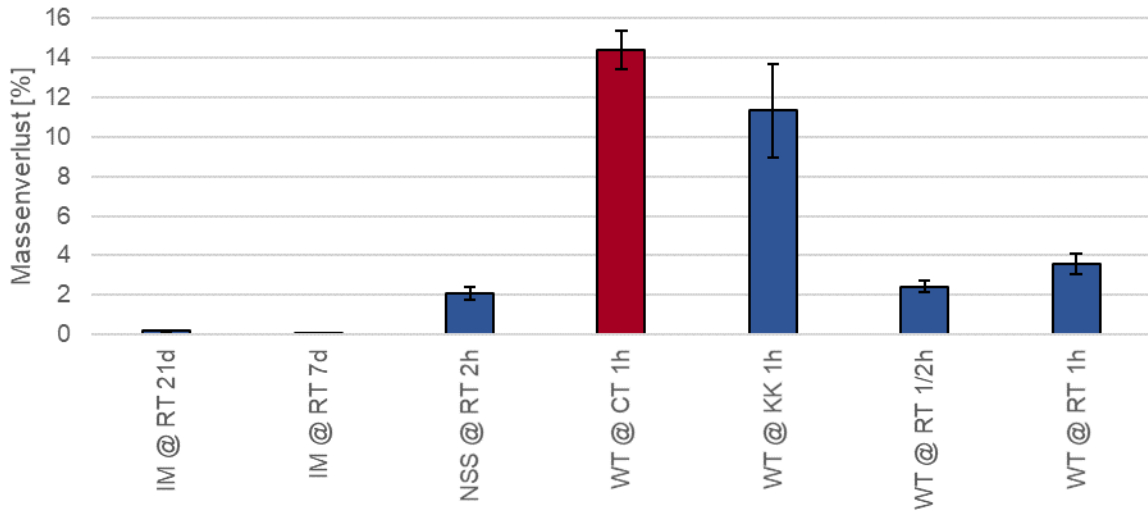


Abbildung 42: Vergleich der Korrosionsprüfmethode (5 % NaCl-Lösung auf Fe)



Abbildung 43: Drei Wechseltauchprüfungsstände (WT) im Klimacontainer (CT) von WINTERLIFE

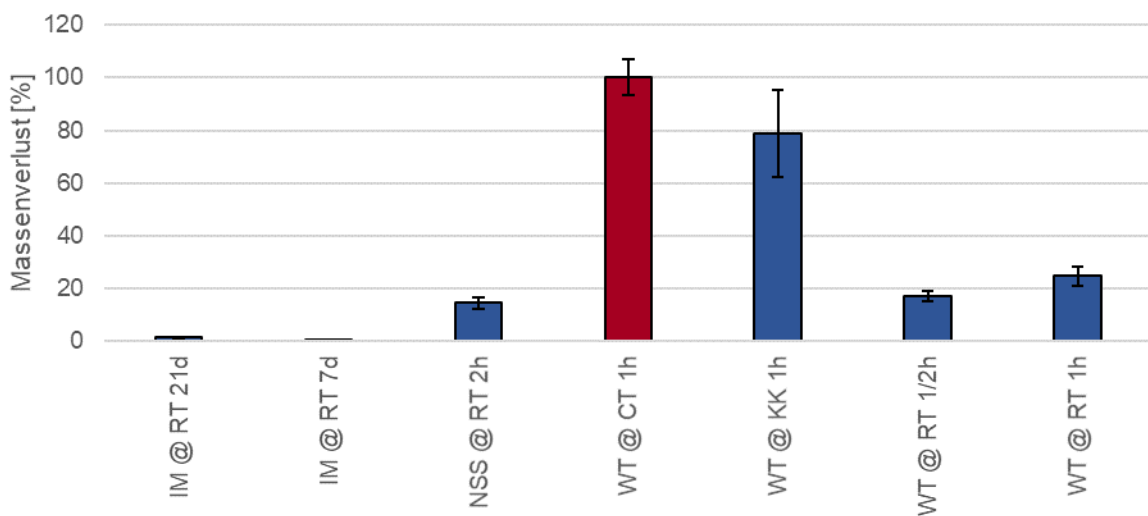


Abbildung 44: Relativer Vergleich der Korrosionsprüfmethode (im Vergleich zur Referenz im Klimacontainer)

3.4.4 Chemische Untersuchungen WINTERLIFE

In WINTERLIFE wurden verschiedene spektroskopische, mikroskopische und diffraktometrische Methoden eingesetzt, um Informationen über den Korrosionsvorgang an der Oberfläche von verschiedenen Metallen zu gewinnen, die auf Bahnsteigen eingesetzt sind und die der Korrosion von Taumitteln ausgesetzt sind. Von den spektroskopischen Methoden hat sich die Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie als besonders aussagekräftig erwiesen. Bei den mikroskopischen Methoden waren Untersuchungen mit der Laser-textur Messung besonders erfolgreich, da diese die starken Profilunterschiede und damit die Rauigkeit besonders gut abbildet. Schließlich wurden die Korrosionsprodukte mechanisch und im Ultraschallbad von der Probenoberfläche entfernt und mit der Röntgenpulverdiffraktion auf die Phasenzusammensetzung hin untersucht.

Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie: Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie, engl. X-ray photoelectron spectroscopy, XPS, liefert chemische Informationen über die Korrosion der Oberfläche. XPS beruht auf dem äußeren Photoeffekt, bei dem Photoelektronen durch elektromagnetische Strahlung aus einem Festkörper gelöst werden. Vereinfacht verläuft der Prozess in drei Schritten: 1. Anregung des Elektrons durch das einfallende Photon, 2. Transport des angeregten Elektrons zur Oberfläche, 3. Austritt des Photoelektrons. Austrittsrichtung und die kinetische Energie der Elektronen erlauben Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung und elektronische Struktur der Festkörper. Das Gerät besteht aus einer Lichtquelle (Röntgenröhre, UV-Lampe, Laser oder Synchrotron), einem Probenhalter und einem Analysator.

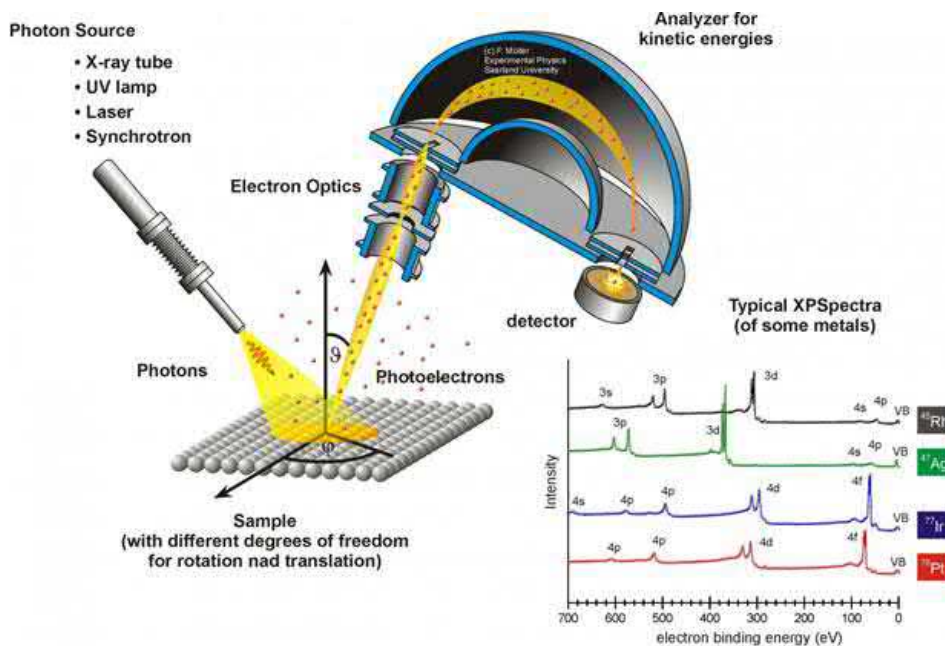


Abbildung 45: Schematische Erklärung der Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie mit einem Beispielspektrum (Foto: Uni Wien, Fakultät f. Physik)

Messparameter: Alle Messungen wurden mit einem SPECS XP-Spektrometer durchgeführt, das mit einer monochromatischen Al-K α X-Röntgenquelle (μ Focus 350) und einem halbkugel-förmigen WAL-150 Analysator (Bestimmungswinkel: 60°) ausgestattet ist. Die Durchtrittsenergien waren 100 eV bzw. 30 eV und die entsprechenden Schrittweiten waren 0.5 eV bzw. 50 meV. Erstere wurden für Übersichtsspektren und letztere für Detailspektren genutzt (Anregungsenergie: 1486.6 eV, Strahlenergie und Auflösungsvermögen: 70 W bei 500 μ m; durchschnittlicher Winkel: 51° zur Oberflächennormale; Basisdruck: 4×10^{-10} mbar, Druck während der Messung: 2×10^{-9} mbar). Die Linearität zur Bindungsenergie (BE) Skala wurde kalibriert nach ISO15472.

Die Datenanalyse und die Transmissionskorrektur wurden durchgeführt mit der CASA XPS Software, unter Verwendung des Shirley/Tougaard Hintergrunds²⁶ und den Scofield Sensitivitätsfaktoren²⁷. Ladungskorrektur wurde angewendet, so dass das Signal von hinzukommendem Kohlenstoff (C-C/C-H) verschoben wurde auf 285 eV. Die Entfaltung der Spektren wurde durchgeführt unter Verwendung von Gaussian-Lorentzian Kurven (GL(30)), wenn nichts anderes vermerkt ist. Alle Werte der chemischen Zusammensetzung sind in relativen Atomprozent (at%) angegeben, wobei die Nachweisgrenze in den Übersichtsmessungen normalerweise bei ca. 0.1-0.5 at% liegt, in Abhängigkeit von dem jeweiligen Element. Die Zuordnung der verschiedenen Komponenten wurde gemäß der Literatur vorgenommen²⁸. Die Analysen im Anhang enthalten einen Überblick über die Quantifizierungen für jedes Element und die Analyse der entsprechenden Details in den Spektren. Ausheiz-Experimente in Serie 2 wurden mit dem SPECS EBH-150 Elektronenstrahl-Heizer durchgeführt. Eisenproben wurden erhitzt auf ca. 415°C für eine Stunde (die Temperaturmessung erfolgte mit einem type K Thermoelement, das unter der Probe befestigt war).

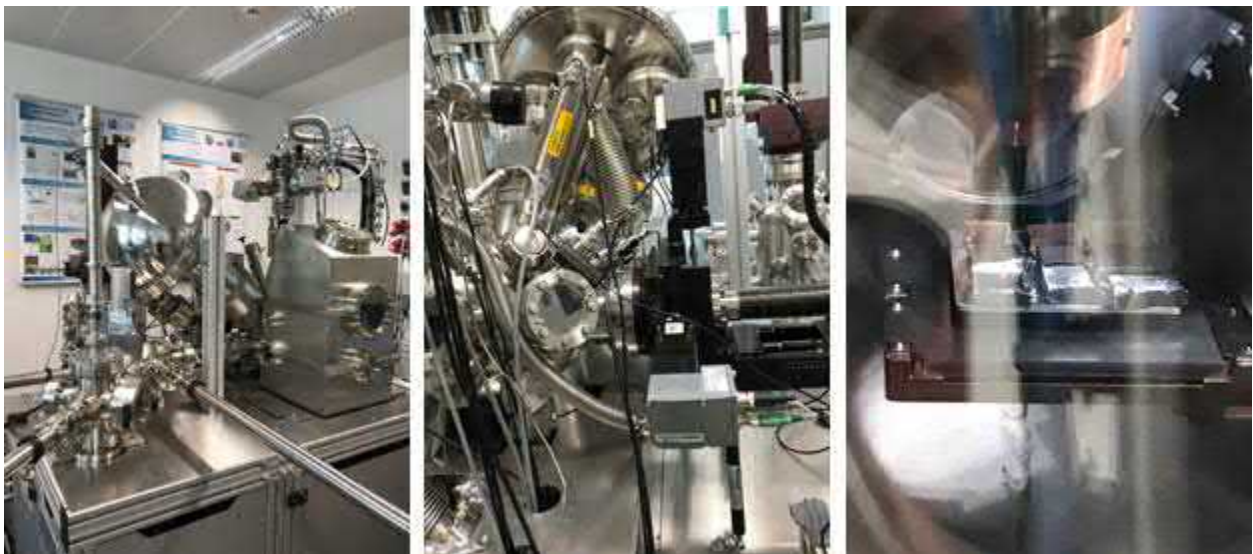


Abbildung 46: Fotografische Abbildungen des XPS-Gerätes der TU Wien im Analytical Instrumentation Centre: Links: Halbkugelanalysator, Mitte: Probenschleuse, Rechts: Blick auf die eingeschleusten Proben

Ergebnisse: 1. Serie vom 13.05.2021, Probenanzahl: 9

Die Proben wurden an Luft gelagert zwischen der Entnahme aus dem Probengefäß und dem Beginn der XPS Messungen. Die Proben wurden auf dem Probenhalter mit einem doppelseitigen, leitenden Graphit-Klebeband befestigt. Die Abbildung 81 im Anhang zeigt die Positionen an denen gemessen wurde.

- Cu: Kupfer Referenzprobe
- Cu salt: mit NaCl bewitterte Kupferprobe ohne Inhibitor
- Cu inhibitor: mit NaCl bewitterte Kupferprobe mit 3% Glucose (Inhibitor) bezogen auf die Salzmenge
- Fe: Eisen Referenzprobe
- Fe salt: mit NaCl bewitterte Eisenprobe ohne Inhibitor
- Fe inhibitor: mit NaCl bewitterte Eisenprobe mit 3% Glucose (Inhibitor) bezogen auf die Salzmenge

²⁶ Shirley, D. A. (1972), Tougaard, S. (1997)

²⁷ Scofield, J. H. et al. (1976), Yeh, J.J. (1985)

²⁸ Wagner, C.D. et al. (2003), Beamson, G. et al. (1992)

- FeZn: Verzinktes Eisenblech Referenzprobe
- FeZn salt: mit NaCl bewittertes, verzinktes Eisenblech ohne Inhibitor
- FeZn inhibitor: mit NaCl bewittertes, verzinktes Eisenblech mit 3% Glucose (Inhibitor) bezogen auf die Salzmenge

Alle Proben zeigen wie erwartet Signale für die Elemente Cu/Fe/Zn sowie für O und C von Oxiden und von Oberflächenkontaminationen. Zusätzlich beinhalten die Materialien jeweils Spuren von Ca und N. Si wird detektiert in Cu und Fe Proben, während Na nur in Cu Proben und Cl auf einigen Fe und Fe/Zn Proben vorkommt (Anhang Abbildung 71, Abbildung 72, Abbildung 73). Die meisten Proben zeigen größere Mengen an Oberflächenverunreinigung mit Kohlenstoff ($C > 50$ at%). Oberflächenverunreinigungen sind allerdings signifikant reduziert bei Proben, die mit NaCl bewittert wurden (mit und ohne Inhibitor) und die relativen Mengen an Cu, Fe, Fe/Zn sind größer, wenn man diese mit den Referenzproben vergleicht.

Ergebnisse: 2.Serie vom 13.05.2021, Probenanzahl: 3

- Fe: Eisen Referenzprobe
- Fe salt: mit NaCl bewitterte Eisenprobe ohne Inhibitor
- Fe inhibitor: mit NaCl bewitterte Eisenprobe mit Inhibitor

Alle Proben zeigen einen reduzierten Anteil an Kohlenstoff nach dem Ausheizen, im Vergleich zu dem ursprünglichen Zustand. Genauso wie bei der 1. Serie findet man größere Mengen Kohlenstoff auf der unbehandelten Eisenprobe, wogegen nur geringe Mengen auf Eisen Proben mit Inhibitor detektiert werden. Zusätzlich zu Fe, C und O werden nach dem Ausheizen signifikante Mengen an Cr und Ca auf allen Proben detektiert (XPS Anhang), sowie kleine Mengen an Cu auf den Eisenblechen mit Inhibitor.

Detaillierte Analyse der Spektren (Die Ergebnisse und die Spektren befinden sich im Anhang):

Kupfer: Detaillierte Cu 2p Spektren (Anhang Abbildung 74 a) und Cu LMM Auger Signale (Anhang Abbildung 74 b) wurden untersucht, um die vorherrschende Bindungsumgebung der Kupferatome zu bestimmen. Zwei Komponenten wurden gefunden für Cu 2p Signale: Cu_2O (932.4 eV BE) und eine kleine Komponente bei 933.7 eV. BE ($\text{CuO}/\text{Cu}(\text{OH})_2$)²⁹. Die zweite Komponente ist die intensivere für Proben die nur mit NaCl bewittert wurden und ist weniger intensiv für Proben, die zusätzlich mit dem Inhibitor behandelt wurden. Cu LMM Signale zeigen den Hauptpeak bei ca. 916.2 eV kinetischer Energie. Abbildung 75 im Anhang zeigt einen Vergleich zwischen den Auger Parametern für Cu 2p und Cu LMM Signale für diese Probenserie im Vergleich zur Literatur.

O1s Signale zeigen zwei Hauptkomponenten bei 531.5-532.5 eV (C-O/C=O Verunreinigungen, -(OH)) sowie Metalloxide (<530 eV, Fig. 6a). Eine detaillierte Analyse und Zuordnung ist jedoch sehr schwierig aufgrund der geringen Mengen an Cu die nur schwer im XPS sichtbar sind. Zusätzlich sind C1s Spektren abgebildet. Oberflächenkontaminationen stammen vom Kohlenstoffsignal, das aus unterschiedlichen Mengen an C-C/C-H (285 eV), C-O/C-N (286-287 eV) and C=O/O-C=O (287.5-289 eV) besteht.

Eisen (1. Serie): Alle Stahlproben zeigen die Hauptkomponente Fe 2p_{3/2} zwischen 710.6 eV und 711.0 eV. Die Bindungsumgebungen sprechen für Fe_2O_3 , Fe_3O_4 und/oder FeOOH [7]. Eine weitere Unterscheidung zwischen den Möglichkeiten ist allerdings nur mit XPS nicht möglich. Es gibt keine größeren Unterschiede zwischen den Proben in dieser Serie in Bezug auf die Fe 2p Daten (Anhang Abbildung 76 a)

²⁹ Wagner, C.D. et al. (2003), Biesinger, M.C. et al. (2010), Biesinger, M.C. (2017)

Eisen (2. Serie): Unbehandelte Stahlproben zeigen hauptsächlich Fe(0) (706.6 eV) und geringe Mengen an Fe Oxiden, während die mit Salz behandelten Proben ohne Inhibitor zwischen 25 at% und 35 at% Fe(0) und 65 at% bis 75 at% Fe Oxide und die mit Inhibitor behandelten Proben nur einen relativen Eisenoxidanteil von 50% zeigen. Die Position des Fe 2p_{3/2} Signals (709.6 eV) vom Oxid lässt vermuten, dass hauptsächlich FeO vorhanden ist³⁰ (Anhang Abbildung 83 a). In früheren Messungen wurde hauptsächlich Fe₂O₃/Fe₃O₄ /FeOOH gefunden. Eine Reduktion sollte eigentlich bei den niedrigen Temperaturen nicht stattfinden³¹. Wir nehmen also an, dass ein gleichmäßiger Film aus FeO auf Fe mit einer Schichtdicke von ca. 1.6-2.1 nm für die mit Salz behandelten Proben, und eine Schicht von ~1.1nm für die Proben mit Inhibitor und weniger als 0.6 nm für die unbehandelten Proben³² ergeben eine mittlere freie Elektronen Weglänge für 2p Elektronen aus Fe in FeO von 1.5 nm). Wir schlussfolgern daraus, dass die Verwendung des Inhibitors zu einer signifikant dünneren Oxidschicht auf dem Eisenblech führt. Die O1s und C1s Signals (Anhang Abbildung 83 b) sind ähnlich wie in früheren Messungen mit unterschiedlichen Mengen an Oxiden und Kontaminationen.

Fe/Zn: Auf zwei Proben (FeZn 2 und FeZn inhib 2) findet signifikante Aufladung während der XPS Messung statt (sichtbar an den breiten asymmetrischen Signalen). Aufgrund dessen sind diese Proben für eine detaillierte Analyse nicht geeignet (Anhang siehe Abbildung 79 und Abbildung 80). Fe 2p_{3/2} Spektren von verzinkten Eisenblechen (wo das Fe Signal intensiv genug ist) sind sehr ähnlich in Form und Zusammensetzung mit den Eisenblechen die oben beschrieben werden (Anhang siehe Abbildung 79 a).

O1s Spektren von verzinkten Eisenblechen sind ähnlich zu jenen von Cu und Fe mit variierenden Metalloxyd/C-O,C=O Ratios und leicht unterschiedlichen BE für die Metalloxyd Komponenten (Anhang siehe Abbildung 79 b) Analyse der Zn XPS und Auger Spektren zeigen das Zn 2p_{3/2} Signal bei 1022.0 eV BE und das Zn LMM Signal bei 986.8 eV KE (Anhang Abbildung 80 a,b). Der Auger Parameter beträgt 2008.8 eV im Durchschnitt. Vergleich zwischen dem Bereich für die Auger Parameter von Zn mit Werten aus der Literatur sind im Anhang Abbildung 81 dargestellt. Dieser Vergleich lässt vermuten, dass Zn(OH)₂ die häufigste Bindungsumgebung ist. Aufgrund der BE des Zn2p_{3/2} XPS Signals > 1021.6 eV kann man aber ZnO oder eine Kombination von ZnO und Zn(OH)₂ als Hauptkomponente nicht ausschließen³³.

Röntgendiffraktionsuntersuchungen:

Röntgen-Pulverdiffraktion, engl. X-Ray powder Diffraction, XRD, ist eine Standardmethode in der Chemie zur Untersuchung der Phasenzusammensetzung von Festkörperproben. Polykristalline Pulverproben werden mit Röntgenstrahlung beleuchtet und es kommt an der Elektronenhülle der Atome zur Beugung. Durch destruktive und konstruktive Interferenz entsteht ein Diffraktogramm, dessen Muster charakteristisch für die in der Probe vorhandenen kristallinen Festkörperphasen ist. Die prozentuelle Phasenzusammensetzung wird mithilfe der Datenbank PDF4+ ausgewertet. Alle Messungen wurden mit einem Philips Empyrean mit Kupferröhre und in Bragg-Brentano Geometrie mit GalliPix Detektor durchgeführt.

In dem von uns verwendeten Tauchversuch zur Korrosionsprüfung wurden Eisenbleche mit verschiedenen Taumitteln bewertet (siehe Kap. 3.5.4). Die Korrosionsprodukte wurde mechanisch und mithilfe eines Ultraschallbades von der Probenoberfläche entfernt. Die gesäuberten Plattenoberflächen wurden anschließend fotografiert, in Bezug auf ihren Korrosionsgrad bewertet und die Menge des Korrosionsproduktes wurde auf Konstanz bestimmt. XRD wurde verwendet um die Phasenzusammensetzung dieser Korrosionsprodukte zu messen. In allen Proben befanden sich Rückstände des Tausalzes (<10%). Dieser Anteil an Tausalz wurde herausgerechnet. In Abbildung 48 ist daher nur die Phasenzusammensetzung der Korrosionsprodukte dargestellt.

³⁰ Biesinger, M.C. et al. (2011)

³¹ Tang, Y. et al. (2013), Condon, N.G. (1997)

³² Tanuma, S. et al. (1993)

³³ Biesinger, M.C. et al. (2010)

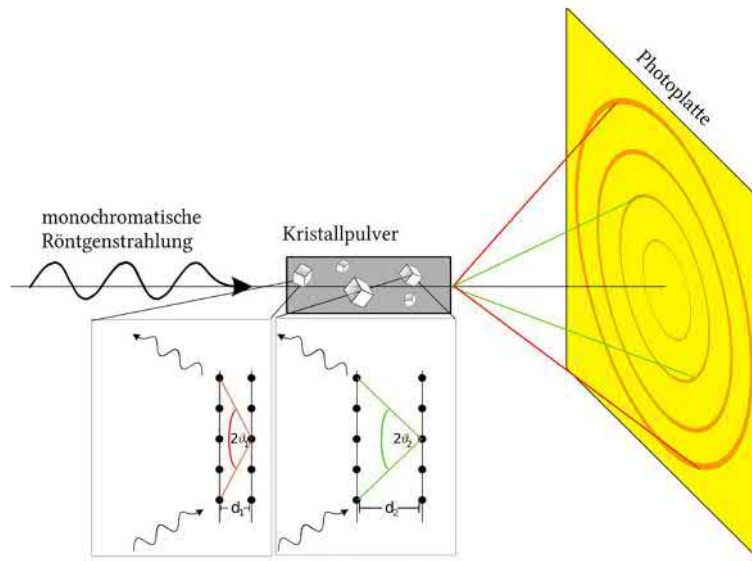


Abbildung 47: Schematische Darstellung des Prinzips der Röntgen-Pulver-Diffraktion

Phasenzusammensetzung Korrosionsprodukte ausgewählter Taumittel

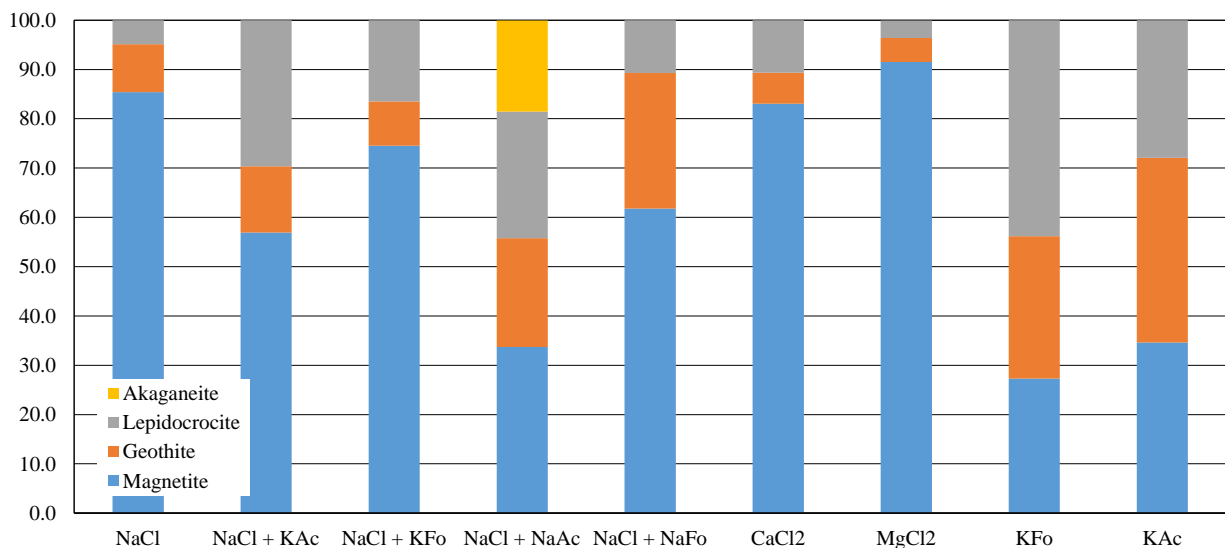


Abbildung 48: Prozentuelle Phasenzusammensetzung der Korrosionsprodukte ausgewählter Taumittel, die von der Oberfläche der korrodierten Proben mittels Ultraschalles entfernt wurden

Wie in Kapitel 3.4.1 dargestellt, existiert ein Verlauf der verschiedenen Eisenoxidverbindungen bei fortschreitender Korrosion: $\beta\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH},\text{Cl}) \rightarrow \gamma\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH}) \rightarrow \alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH}) \rightarrow x\text{FeO}\cdot y\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot z\text{H}_2\text{O}$. Dementsprechend findet man in den Korrosionsprodukten die folgenden vier Phasen in unterschiedlichen Quantitäten: Akaganeite $\beta\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH},\text{Cl})$, Lepidocrocite $\gamma\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$, Goethite $\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ und Magnetite $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$. Das Akaganeite ist relativ instabil und tritt nur bei Versuchen mit einer Mischung von NaCl und Natriumacetat (NaAc) auf. In allen anderen Fällen ist Lepidocrocite das jüngste Oxidationsprodukt. Grundsätzlich gibt es bei der Eisenoxidation keine dauerhafte Passivierung der Oberfläche, da die elektrische Leitfähigkeit des schon gebildeten (feuchten) Rosts und seine Sauerstoffdurchlässigkeit die weitere Korrosion an der Grenze Rost/Material begünstigen. Allerdings kann das Magnetite ab einer gewissen Schichtstärke einen passivierenden Effekt zeigen. Dieser Effekt sollte hier keine Rolle spielen, vielmehr gehen wir davon aus, dass ein hoher Magnetite-Anteil für einen weit fortgeschrittenen oxidativen Angriff steht. Dementsprechend zeigen aus chemischer Perspektive Formiate und Acetate, sowie ihre Mischungen mit Steinsalz günstigere Korrosionseigenschaften als reines Steinsalz sowie reines Calciumchlorid und

Magnesiumchlorid. Es muss betont werden, dass der hier gefundene Trend in Bezug auf die Phasenzusammensetzung nicht direkt korreliert mit der Quantität an Oxidationsprodukten, die in Kap. 3.4.3 und Kap. 3.4.4 bestimmt wurden. Es lässt sich aber anhand dieser Messungen die unterschiedliche Qualität des oxidativen Angriffs der Oberflächen erkennen.

Messungen der Oberflächentextur:

Es wurden zunächst Rasterkraftmikroskopie (AFM) Messungen durchgeführt. Diese stoßen aber bei sehr starker Rauigkeit der Oberflächen an ihre Grenzen und sind daher nicht aussagekräftig. Die Methode der Wahl ist die Messung der Oberflächentextur mittels Lasertexturmessgerät FRT MicroProf 100 mit der Auswertesoftware Formfaktor FRT Mark 3. Die Ergebnisse sind in Abbildung 49 dargestellt und es lassen sich sehr gut die Unterschiede in der Rauigkeit erkennen, diesen zeigen die Höhenunterschiede in Bezug auf den niedrigsten Punkt in der NaCl Probe (ganz links in Abbildung 49). Durch Differenzbildung zum arithmetischen Mittelwert der Höhen lässt sich die Rauigkeit berechnen. Diese wird in Mikrometern angegeben und wird für jeden Korrosionsprozess mit dem entsprechenden Massenverlust korreliert. Eine Auftragung der Rauigkeit gegen den Massenverlust zeigt keinen linearen Zusammenhang aufgrund der starken Streuung der Werte. Während die Standardfehler für den Massenverluste bekannt sind (siehe Kap. 3.4.3 und Kap. 3.4.4) kann man die Standardfehler für die Oberflächenrauigkeit nur grob mit ca. $\pm 20\%$ abschätzen. Dies hängt damit zusammen, dass die Oberflächenkorrosion sehr heterogen ist und man an sehr vielen verschiedenen Stellen an einer korrodierten Probenplatte die Messung wiederholen müsste, um einen repräsentativen Wert zu erhalten. Trotzdem lässt sich erkennen, dass mit zunehmender Korrosion (steigendem Massenverlust) die Oberflächenrauigkeit zunimmt. Zudem zeigen die Aufnahmen, dass bei Verwendung eines Inhibitors (Glukose) der Massenverlust und die Oberflächenrauigkeit abnehmen.

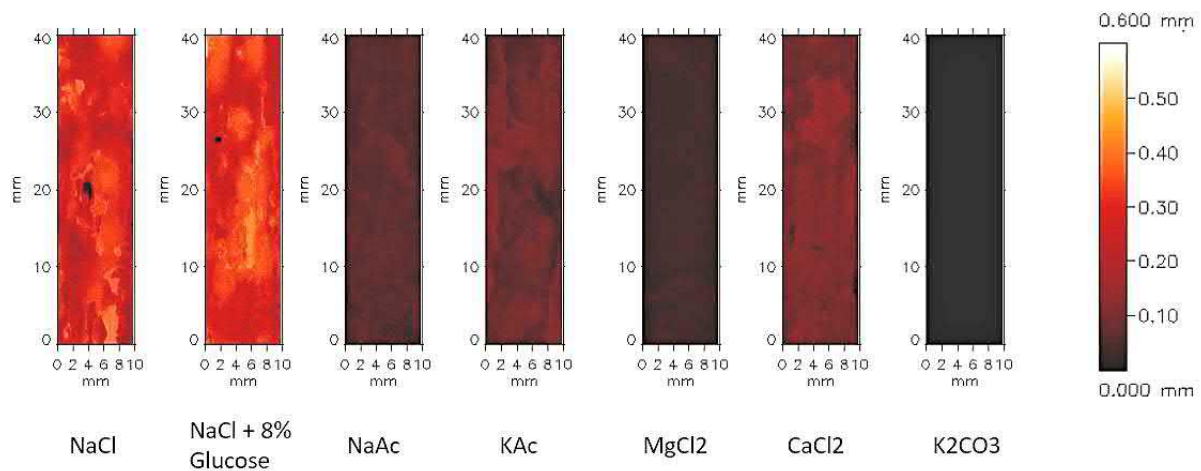


Abbildung 49: Lasertexturmessungen für eine korrodierte Eisenplatte (10x15cm). Der Messbereich betrug 1x4cm. Die Messposition wurde jeweils in der Mitte der Platte gewählt.

Tabelle 8: Massenverlust und Oberflächenrauigkeit für Eisenbleche, die mit verschiedenen Taumitteln und einem Inhibitor (8% Glukose) bewettert wurden.

Taumittel	Masseverlust Korrosion [m%]	Rauigkeit Ra [μm]
NaCl	14,26	9,0
NaCl+8% Glc	6,69	7,751
Nac	5,95	4,201
CaCl ₂	4,55	4,715
MgCl ₂	3,73	2,812
KAc	2,86	4,91
K ₂ CO ₃	0,87	1,545

3.4.5 Ergebnisvergleich Korrosionsversuche

Analytischer Vergleich der Korrosionseffekte auf Stahl (Fe):

Auf der Grundlage der Ergebnisse des Methodenvergleiches konnten die Anforderungen einer guten Wiederholbarkeit bei ausreichend hoher Korrosion nur mit der Wechseltauchprüfung im temperaturgeregelten Container (WT@CT) erzielt werden. Die Beherrschung der Einflussfaktoren hat sich dabei als eine kritische Größe für einen zuverlässigen Vergleich der Korrosivität verschiedener Grundtaumittel ohne bzw. mit Inhibitoren mit statistischer Signifikanz zu erreichen. Daher wurden alle dargestellten Testergebnisse als Wechseltauchversuch bei erhöhter Temperatur im Klimacontainer durchgeführt. Der optische Vergleich der Korrosivität ist im Anhang dargestellt (Kap. 5.5.3).

Ausgehend vom Prüfprogramm aus Tabelle 5 zeigt Abbildung 50 einen Vergleich der Taumittel ohne zusätzliche Inhibitoren nach 21 Tagen (504 Stunden) Einwirkung auf Stahl (Fe). Natriumchlorid (NaCl) hat demnach den größten Massenverlust durch Korrosion von etwa 14,3 M%. Kaliumformiat (KfO 10,0 M%), Kaliumacetat (KAc 6,1 M%), Natriumformiat (NaFo 6,0 M%) sowie CaCl₂ (5,4 M%) zeigen geringe Korrosion. Die geringste Korrosivität wurde bei Calciummagnesiumacetat (CMA 1,9 M%) und Kaliumcarbonat (K₂CO₃ 1,0 M%) gemessen. Damit besitzt die 5 % K₂CO₃-Lösung eine knapp 14-fach niedrigere Korrosivität als die 5 % NaCl-Lösung. Zudem ist in Abbildung 51 der relative Massenverlust [%], bezogen auf die 5 % NaCl-Referenzlösung (= 100 %) dargestellt.

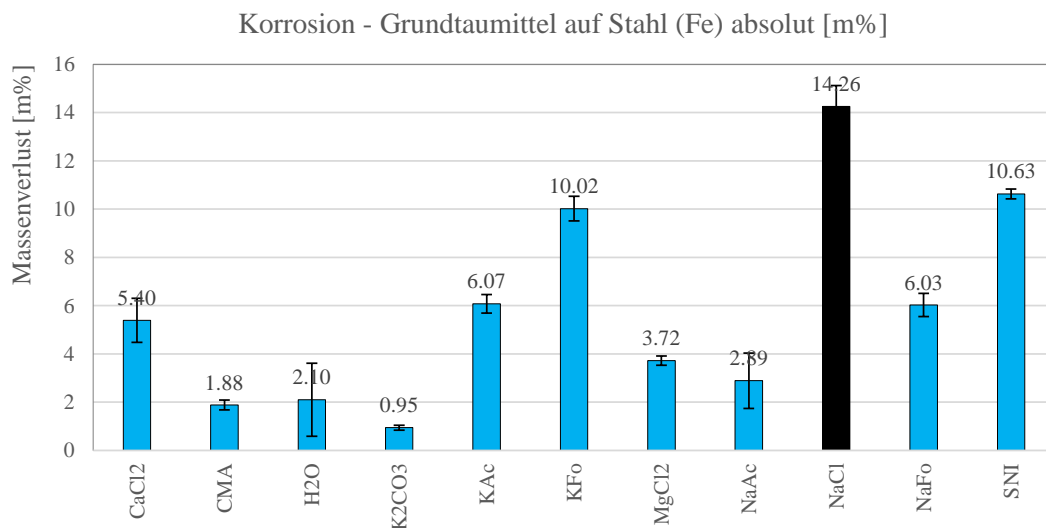


Abbildung 50: Massenverlust der untersuchten 5 % Taumittellösungen (Grundtaumittel) auf Stahl

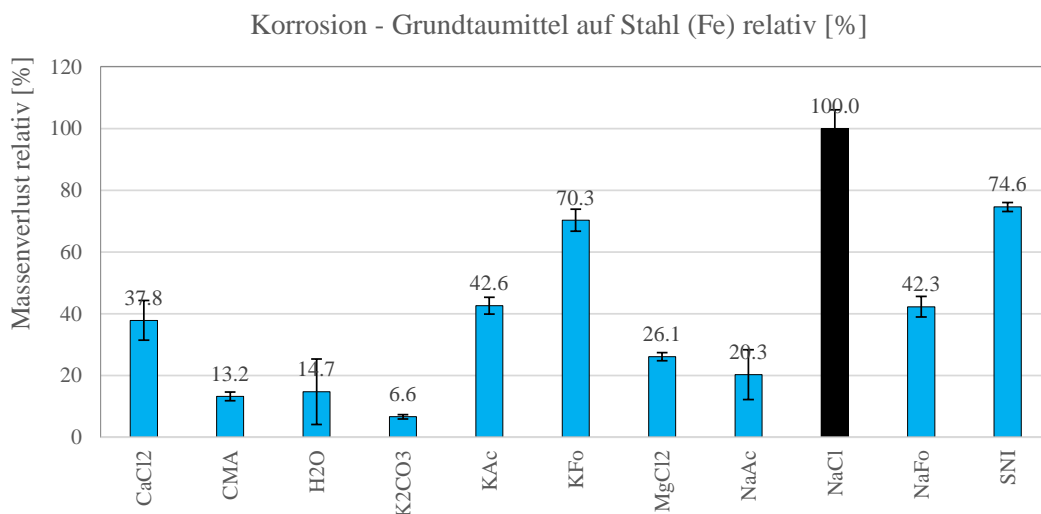


Abbildung 51: Auf Mittelwert (14,26 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust

Da alternative Taumittel im Vergleich zu NaCl mittel bis erheblich teuer sind, besteht eine weitere Möglichkeit darin, dem (preiswerten) NaCl eine kleine Menge eines (teuren) Inhibitors hinzuzufügen. Details solcher, dem NaCl zugesetzten Inhibitoren (also inhibierende Stoffe oder alternative Taumittel), sind dem Prüfprogramm in Tabelle 5 und Tabelle 6 zu entnehmen. Die Ergebnisse der Korrosionsversuche auf Stahl (Fe) ausgedrückt als Massenverlust sind in Abbildung 52 dargestellt. Bei Interpretation dieser Ergebnisse ist der Massenverlust von 14,3 M% reiner 5 % NaCl-Lösung zu berücksichtigen. Es ist zu erkennen, dass der Inhibitorstoff Tetrabutylammoniumbromid (TbAb) keine Verbesserung aufweist, Glucose (Glu) hingegen zeigt eine deutliche Reduktion der Korrosion mit steigendem Anteil (2 % Glu: 11,8 M%, 4 % Glu: 9,8 M%, 6 % Glu: 8,3 M%, 8 % Glu: 7,3 M%). Besonders korrosionsinhibierend wirkt Mannose (8 % Man: 5,5 M%), Calciumnitrit (8 % CaNi: 4,1 M%) und Natriummetasilikat (8 % NaSi: 5,7 M% bzw. 4 % NaSi: 4,4 M%). Natriumphosphat (8 % Na₂HPO₄: 1,4 M%) ist insgesamt der Inhibitor mit der größten Reduktion der Korrosivität. Eine auf die 5 % NaCl-Referenzlösung (= 100 %) bezogene relative Darstellung ist in Abbildung 53 gegeben.

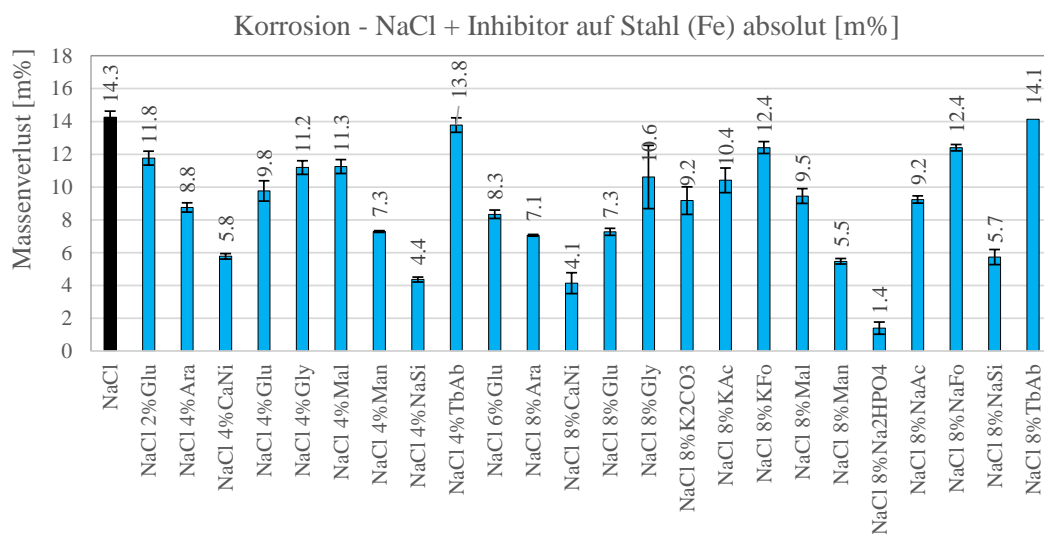


Abbildung 52: Massenverlust der 5% NaCl-Lösung mit den untersuchten Inhibitoren auf Stahl

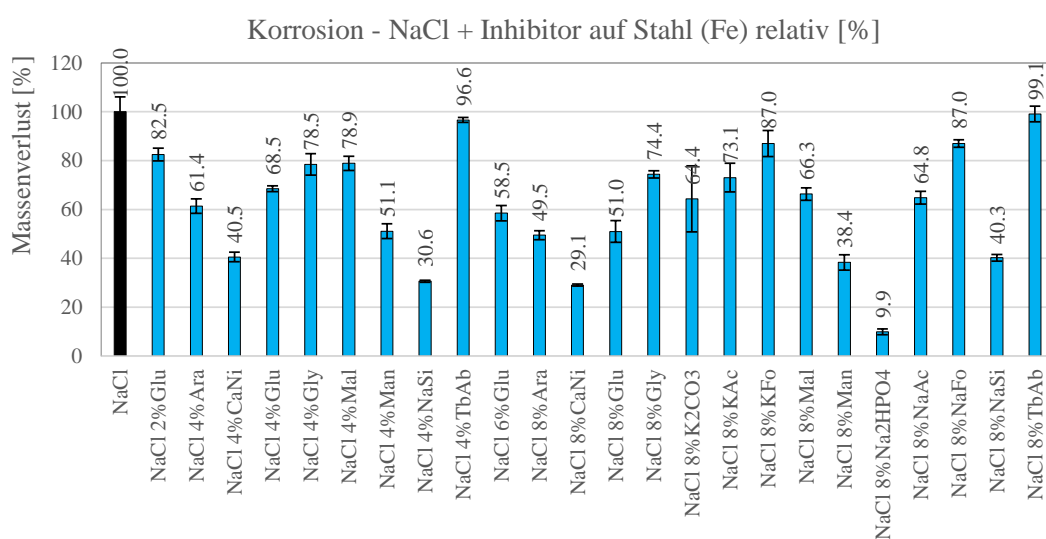


Abbildung 53: Auf Mittelwert (14,26 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust auf Stahl

Analytischer Vergleich der Korrosionseffekte auf verzinkten Stahl Fe(Zn) und Kupfer Cu

Gemäß dem Prüfprogramm aus Tabelle 5 sind in Abbildung 54 die Massenverluste [M%] ausgewählter Taumittel zu sehen. Auf Kupfer (Cu) ist die Korrosionswirkung im Allgemeinen sehr niedrig, wobei $MgCl_2$ und $CaCl_2$ die größte Korrosion hervorrufen. Auf verzinktem Stahl (Fe-Zn) liegen alle Taumittel im Bereich zwischen 1,5 und 2,0 M% Verlust infolge Korrosion. Davon ausgenommen sind NaCl (2,5 M%) sowie Kaliumcarbonat (K_2CO_3) mit 2,2 M% und großer Schwankungsbreite, was u.a. auf den insgesamt geringen Korrosionsabtrag bzw. einen Korrosionsdurchbruch durch die Verzinkung zurückzuführen ist. Zudem ist ein relativer Vergleich (bezogen auf 5 % NaCl-Lösung auf Fe(Zn) = 100 %) der Grundtaumittel für Fe(Zn) in Abbildung 55 ersichtlich.

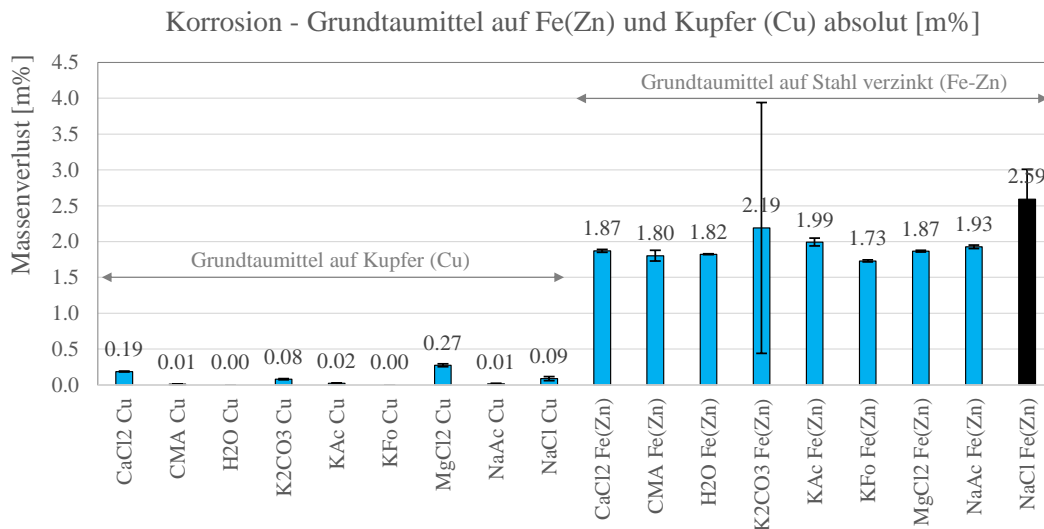


Abbildung 54: Massenverlust ausgewählter Taumittel auf verzinkten Stahl Fe(Zn) und Kupfer Cu

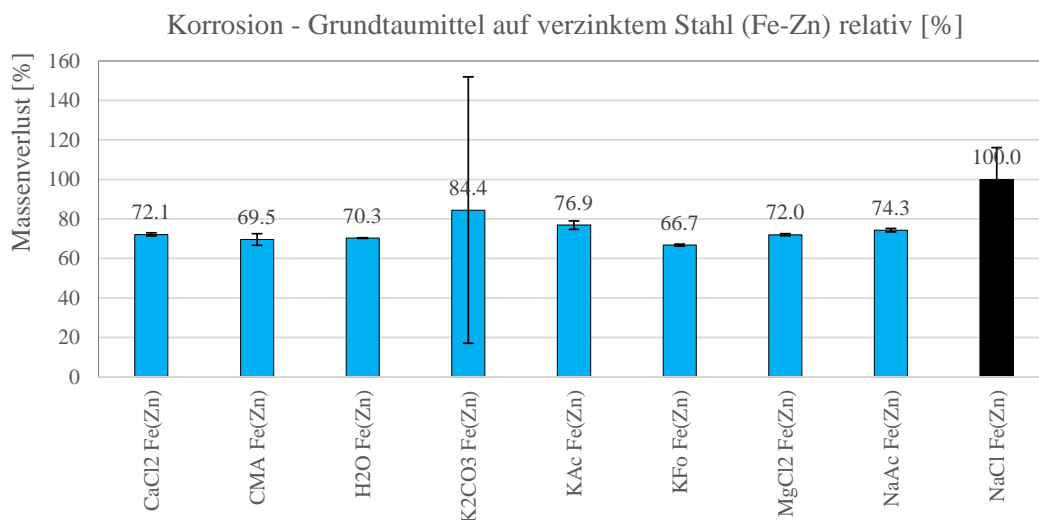


Abbildung 55: Auf Mittelwert (2,59 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust auf Fe(Zn)

Ein relativer Vergleich für Cu (5 % NaCl-Lösung auf Cu = 100 %) ist in ersichtlich, wobei zu beachten ist, dass der relative Vergleich hier wenig bedeutsam ist und nur der Vollständigkeit halber angegeben ist, da die absoluten Massenverluste auf Cu so gering sind, dass alleine die Schwankungsbreite einen maßgeblichen Einfluss auf die Reihung der Korrosionswirkung hat und diese zusätzlich durch die Normierung auf den geringen Massenverlust von NaCl skaliert wird. Stabilere Ergebnisse in Bezug auf Cu sind bei insgesamt höherer Korrosion bei längerer Versuchsdauer oder höherer Referenztemperatur erzielbar.

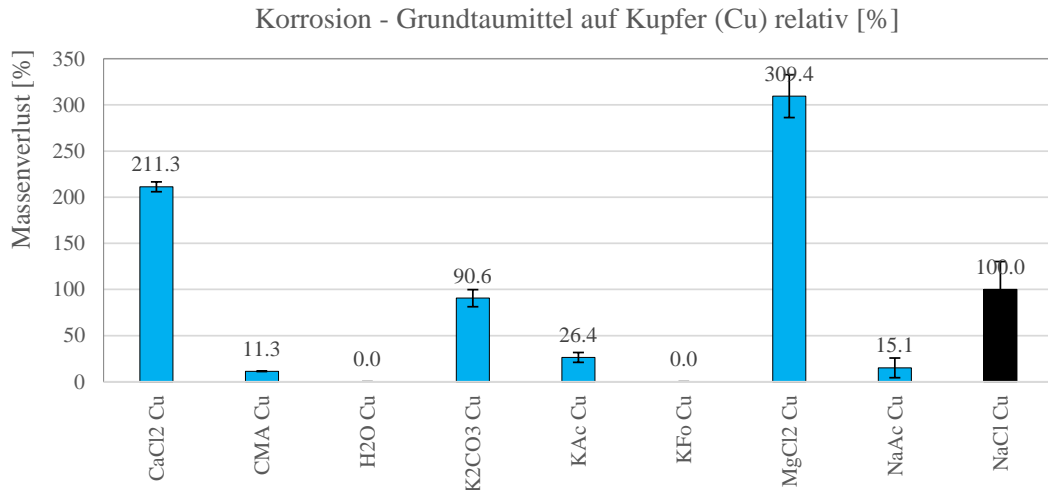


Abbildung 56: Auf Mittelwert (0,09 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust auf Cu

Die Prüfergebnisse der Inhibitoren gemäß dem Versuchsplan aus Tabelle 6 sind in Abbildung 57 zu sehen. Im Vergleich zu den Ergebnissen von NaCl ohne Inhibitor auf Kupfer (Cu 0,09 m%) bzw. verzinktem Stahl (Fe-Zn 2,59 m%) liegen die absoluten Masseverluste infolge Korrosion mit Inhibitor in der Schwankungsbreite bzw. überwiegend unter (Stahl verzinkt) bzw. geringfügig über diesen Werten.

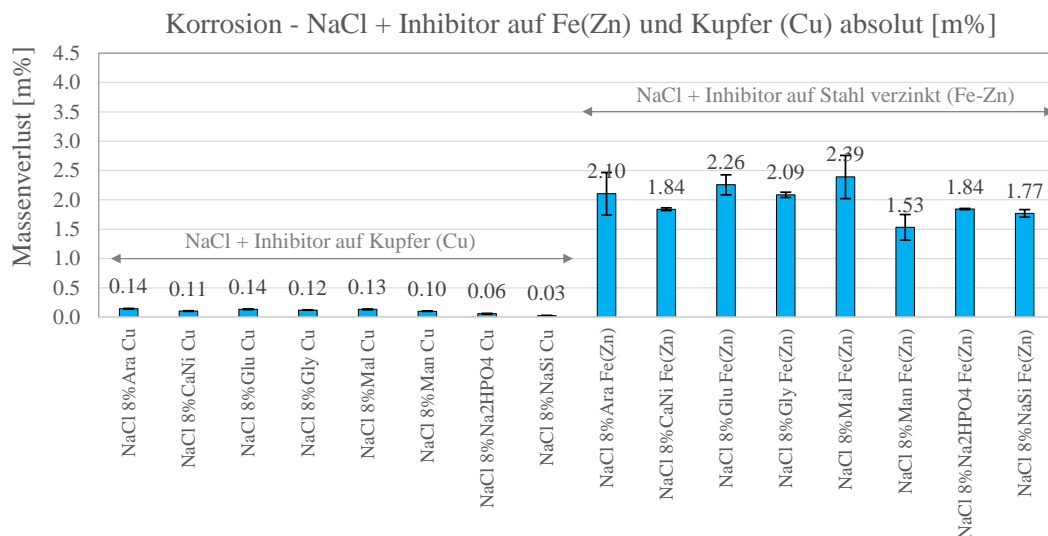


Abbildung 57: Massenverlust ausgewählter Inhibitoren auf verzinktem Stahl Fe(Zn) und Kupfer Cu

Abbildung 58 bezieht die Ergebnisse von verzinktem Stahl Fe(Zn) auf die NaCl-Referenzlösung (5 % NaCl-Lösung auf Fe(Zn) = 100 %). Dabei ist eine Reduktion im Bereich von 10 bis 40 % erkennbar, die in der letzten Versuchsreihe (11/2021-12/2021) bestimmt wurden. Aus der insgesamt geringeren Korrosion von verzinktem Stahl gegenüber reinem Stahl ergibt sich der Vorteil der Verzinkung, solange diese Schutzschicht nicht durch Korrosionsabtrag überwunden ist. Der Ergebnisvergleich auf verzinktem Stahlblech ohne bzw. mit den geprüften Inhibitoren zeigt, dass der Korrosionsfortschritt insgesamt mit Inhibitoren ebenfalls geringfügig bis deutlich reduziert wird.

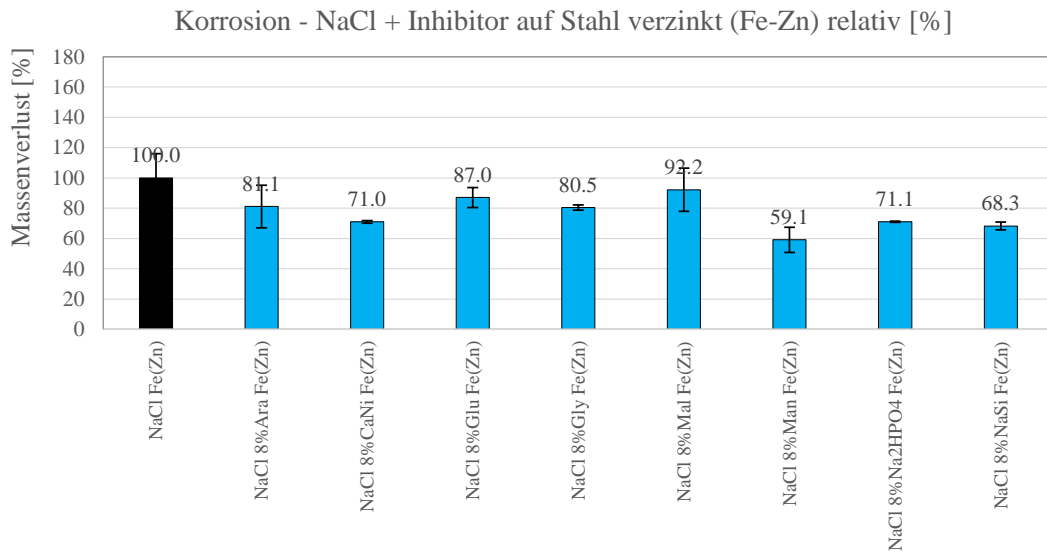


Abbildung 58: Auf Mittelwert (2,59 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust auf Fe(Zn)

In Abbildung 59 sind die Ergebnisse von Kupfer (Cu) auf die NaCl-Referenzlösung (5 % NaCl-Lösung auf Cu = 100 %) dargestellt. Wie bereits angeführt ist der Masseverlust durch Korrosion auf Kupfer (0,09 m%) absolut gesehen um ein Vielfaches geringer im Vergleich zu verzinktem Stahl (2,59 m%) bzw. reinem Stahl (14,26 m%). Dementsprechend ist der Nachweis von Effekten in Bezug auf die Korrosion mit etwas größeren Unsicherheiten behaftet. Interessant ist hier jedoch, dass die zuckerbasierten Inhibitoren bei Kupfer einheitlich eine etwas stärkere Korrosion (auf insgesamt niedrigem Niveau) ergeben, während die Korrosion bei Natriummetasilikat und Natriumphosphat als Inhibitor deutlich reduziert ist.

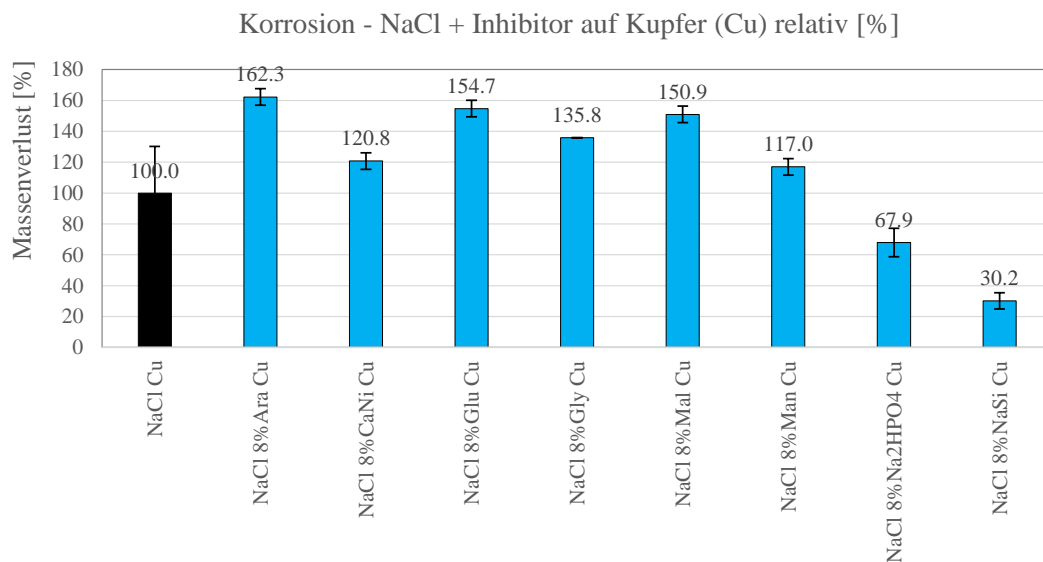


Abbildung 59: Auf Mittelwert (0,09 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust auf Cu

3.5 Umweltwirkung

3.5.1 Mensch

Der nachstehende Überblick der Umweltwirkungen der Grundtaumittel und Inhibitoren sowie eines ausgewählten Produktes auf Basis von NaCl basiert auf einer umfassenden Recherche, der einschlägigen Literatur sowie den Ergebnissen aus vorhergehenden Untersuchungen. Die Wirkung der verwendeten Stoffe ist dabei von der Dosierung und Exposition abhängig. Aus Sicht des Winterdienstes ist daher zu unterscheiden in Anlieferung und Lagerung, Streumittelaufnahme und Ausbringung (händisch, maschinell, trocken, gelöst) sowie die Exposition der Kunden auf den Verkehrsflächen nach der Ausbringung bzw. verdünnt nach dem Tauvorgang. Zur besseren Verständlichkeit erfolgt eine kurze Beschreibung und relative Einschätzung in Bezug auf das Referenztaumittel Natriumchlorid (NaCl).

NaCl Natriumchlorid (Sodium Chloride): +/-

Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig. Natriumchlorid ist aufgrund der guten Ausbringbarkeit, Tauwirkung sowie Kosten weltweit der Standard im Winterdienst. Die Umweltwirkungen sind üblicherweise bei sparsamem Einsatz vertretbar.

CaCl₂ Calcium(di)chlorid (Calcium Chloride): --

Starke Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute (trocken), leicht giftig. In gelöstem Zustand und in Form von Sole weniger problematisch. Aufgrund der gesundheitlichen Bedenken stellt CaCl₂ für die ÖBB-INFRA derzeit keine Alternative dar.

MgCl₂ Magnesium(di)chlorid (Magnesium Chloride): ++

Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute (trocken), in gelöster Form als Sole in der Regel unproblematisch und ungiftig. Nur schwache Reizwirkung und vertretbare Umweltwirkungen.

NAc Natriumacetat (C₂H₃NaO₂, Sodium Acetate): +

Schwache bis keine Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig und weitgehend umweltverträglich. Natriumacetat in gelöster Form aber fast so verträglich wie NaCl und weniger korrosiv.

KAc Kaliumacetat (CH₃CO₂K, Potassium Acetate): +/-

Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz empfohlen (trocken). Wird in der Regel nur in Form von Sole gestreut und ist dadurch wenig problematisch, geringfügig wassergefährdend. In gelöster Form aber fast so verträglich wie NaCl und weniger korrosiv.

CMA Calciummagnesiumacetat ((CaMg₂(CH₃COO)₆ Calcium Magnesium Acetate): +

CMA ist wasserlöslich, staubbindend, hygroskopisch, nicht korrosiv und gesundheitlich unbedenklich. CMA kann aber bei höherer Dosierung zu Glätte führen, was auf Bahnsteigen eher ungünstig ist. Calciummagnesiumacetat ist staubbindend, nicht korrosiv und weitgehend umweltverträglich.

NFO Natriumformiat (NaHCO₂ oder CHNaO₂, Sodium Formate): +/-

Natriumformiat ist leicht löslich und hat eine schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute und ist ungiftig. Kosten, Verfügbarkeit und Wirksamkeit sind schlechter als bei NaCl, dafür besteht eine etwas bessere Umweltverträglichkeit bei Ausbringung in Form von Sole.

KFO Kaliumformiat (KHCO₂ oder CHKO₂) Potassium Formate): +/-

Kaliumformiat hat eine schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz wird bei trockener Verarbeitung empfohlen. Es ist geringfügig wassergefährdend und wird als Taumittel in Form von Sole eingesetzt. Die Kosten und Verfügbarkeit sind ungünstiger als bei NaCl, dafür ist es für die Umwelt verträglicher und weniger korrosiv.

GL Glycerin (C₃H₈O₃, Glycerol, Glycerine Alcohol): +

Glycerin wird aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, kann flüssig oder als Sole ausgebracht werden und ist gut verträglich. Nach neuen Untersuchungen u.a. im vorliegenden Forschungsprojekt WINTERLIFE wirkt es zudem als Korrosionsinhibitor, weshalb ein Einsatz mit NaCl denkbar ist.

KCO Kaliumcarbonat (K₂CO₃ Pottasche, Potassium Carbonate): +

Kaliumcarbonat ist wenig bis gar nicht korrosiv und ist gut in Wasser löslich, stark alkalisch und für

Menschen leicht toxisch aber umweltverträglich. Kaliumcarbonat (Pottasche) wird als alternatives Taumittel mit geringer Korrosivität und guter Verträglichkeit für Pflanzen bei Salzstreuverböten eingesetzt.

GLC Glucose (C₆H₁₂O₆, Traubenzucker, Glucose): ++

Glucose wird meist aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, ist Grundlage der meisten Stoffwechselprozesse und nicht gefäbrend. Keine negativen Auswirkungen auf Menschen, Fauna & Flora. Wirkt gemäß Untersuchungen als Korrosionsinhibitor. Glucose kann trocken, flüssig oder als Sole ausgebracht werden und ist gut verträglich.

SNI Snow-N-Ice (Produkt NaCl 96,2%, NaSO₄ 2,0%, KClO₂ 1,6%, MnCl₂ 0,2%): +/-

Das Produkt Sno-N-Ice besteht überwiegend aus NaCl + Zusätzen und Verunreinigungen und hat vergleichbare Wirkungen auf Menschen, Fauna und Flora wie NaCl.

NaCl + Glucose (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Glucose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Glucose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu reinem NaCl.

NaCl + Maltose (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Maltose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Maltose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu reinem NaCl.

NaCl + Arabinose (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Arabinose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Arabinose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu NaCl.

NaCl + Mannose (4-8%): +/-

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Mannose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Mannose für Menschen (nicht Fauna) unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu NaCl.

NaCl + Glycerin (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Glycerin, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Mannose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu NaCl.

NaCl + Natriummetasilikat (4-8%): -

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Natriummetasilikat, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Natriummetasilikat als (geringfügiger Bestandteil) ist nicht unbedenklich in der Ausbringung aber hat eine sehr gute Inhibitorwirkung.

NaCl + Calciumnitrit (4-8%): -

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Calciumnitrit, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Calciumnitrit als (geringfügiger Bestandteil) ist nicht unbedenklich in der Ausbringung aber hat eine sehr gute Inhibitorwirkung. Wasserfreies Calciumnitrit ist instabil und oxidiert langsam an Luft zum Calciumnitrat $\rightarrow \text{Ca}(\text{NO}_2)_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Daher muss auch Calciumnitrat in Bezug auf Umwelt und Gesundheitsschäden entsprechend beurteilt werden. Calciumnitrat ist gesundheitsschädlich bei Verschlucken, was im Praxisfall eher unwahrscheinlich ist.³⁴

NaCl + Natriumphosphat (4-8%): -

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Natriumphosphat, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Natriumphosphat als (geringfügiger Bestandteil) ist nicht unbedenklich in der Ausbringung, hat aber die insgesamt beste Inhibitorwirkung.

³⁴ Ropp, R.C. et al. (2012)

3.5.2 Fauna

Der nachstehende Überblick der Umweltwirkungen der Grundtaumittel und Inhibitoren sowie eines ausgewählten Produktes auf Basis von NaCl basiert auf einer umfassenden Recherche, der einschlägigen Literatur sowie den Ergebnissen aus vorhergehenden Untersuchungen. Die Wirkung der verwendeten Stoffe ist dabei von der Dosierung und Exposition abhängig. Aus Sicht der Fauna ist daher zu unterscheiden in die Exposition der Haustiere von Kunden am Bahnsteig und angrenzenden Verkehrsflächen nach der Ausbringung bzw. verdünnt nach dem Tauvorgang. Für die übrige Fauna ist die Exposition in Hinblick auf die bereits durch den Schmelzvorgang stark verdünnte Restmengen sowie eine allfällige Kumulation in beaufschlagten Flächen zu beurteilen. Zur besseren Verständlichkeit erfolgt eine kurze Beschreibung und relative Einschätzung in Bezug auf das Referenztaumittel Natriumchlorid (NaCl).

NaCl Natriumchlorid (Sodium Chloride): +/-

Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig. Natriumchlorid ist aufgrund der guten Ausbringbarkeit, Tauwirkung sowie Kosten weltweit der Standard im Winterdienst. Die Umweltwirkungen sind üblicherweise bei sparsamem Einsatz vertretbar.

CaCl₂ Calcium(di)chlorid (Calcium Chloride): --

Starke Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute (trocken), leicht giftig. In gelöstem Zustand und in Form von Sole weniger problematisch.

MgCl₂ Magnesium(di)chlorid (Magnesium Chloride): ++

Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute (trocken), in gelöster Form als Sole in der Regel unproblematisch und ungiftig. Nur schwache Reizwirkung und vertretbare Umweltwirkungen.

NAc Natriumacetat (C₂H₃NaO₂ Sodium Acetate): +/-

Schwache bis keine Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig und weitgehend umweltverträglich. Natriumacetat in gelöster Form aber fast so verträglich wie NaCl und weniger korrosiv. Acetate fördern signifikant das Wachstum von Bakterien und Algen, was bei unmittelbarer Nähe der gestreuten Flächen zu Gewässern zu beachten ist.³⁵

KAc Kaliumacetat (CH₃CO₂K, Potassium Acetate): +/-

Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz empfohlen (trocken). Wird in der Regel nur in Form von Sole gestreut und ist dadurch wenig problematisch, geringfügig wassergefährdend. In gelöster Form aber fast so verträglich wie NaCl und weniger korrosiv. Wie bereits oben beschrieben fördern Acetate das Wachstum von Bakterien und Algen signifikant.

CMA Calciummagnesiumacetat ((CaMg₂(CH₃COO)₆ Calcium Magnesium Acetate): +

CMA ist wasserlöslich, staubbindend, hygroskopisch, nicht korrosiv und gesundheitlich unbedenklich. CMA kann aber bei höherer Dosierung zu Glätte führen, was auf Bahnsteigen eher ungünstig ist. Calciummagnesiumacetat ist staubbindend, nicht korrosiv und weitgehend umweltverträglich. Im Allgemeinen hat CMA eine geringe aquatische Toxizität, während KAc und NaAc eine größere aquatische Toxizität aufweisen³⁶. Acetate fördern signifikant das Wachstum von Bakterien und Algen (. Für das wirbellose *Eisenia fetida* erwies sich CMA als weniger toxisch als Natriumformiat oder NaCl, welche von vergleichbarer Toxizität waren³⁷.

NFO Natriumformiat (NaHCO₂ oder CHNaO₂) Sodium Formate): +/-

Natriumformiat ist leicht löslich und hat eine schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute und ist ungiftig. Kosten, Verfügbarkeit und Wirksamkeit sind schlechter als bei NaCl, dafür besteht eine etwas bessere Umweltverträglichkeit bei Ausbringung in Form von Sole. Wie bereits angeführt fördern Formiate signifikant das Algen- und Bakterienwachstum. Insgesamt weisen Natriumformiat und Natriumchlorid in etwa eine vergleichbare Toxizität für die Fauna und Flora auf.

³⁵ LaPerriere J. D. et al. (1989); Bang, S.S. et al. (1998)

³⁶ Fischel, M. (2001)

³⁷ Robidoux, P.Y. (2001)

KFO Kaliumformiat (KHCO₂ oder CHKO₂) Potassium Formate): +/-

Kaliumformiat hat eine schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz wird bei trockener Verarbeitung empfohlen. Es ist geringfügig wassergefährdend und wird als Taumittel in Form von Sole eingesetzt. Wie bereits angeführt fördern Formiate signifikant das Algen- und Bakterienwachstum, was bei einer Nähe zu Gewässern zu beachten ist.³⁸ Die Kosten und Verfügbarkeit sind ungünstiger als bei NaCl, dafür ist es für die Umwelt insgesamt etwas verträglicher und weniger korrosiv.

GL Glycerin (C₃H₈O₃, Glycerol, Glycerine Alcohol): +

Glycerin wird aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, kann flüssig oder als Sole ausgebracht werden und ist gut verträglich. Nach neuen Untersuchungen u.a. im vorliegenden Forschungsprojekt WINTERLIFE wirkt es zudem als Korrosionsinhibitor, weshalb ein Einsatz mit NaCl in der Feuchtsalzstreuung denkbar ist.

KCO Kaliumcarbonat (K₂CO₃ Pottasche, Potassium Carbonate): +

Kaliumcarbonat ist wenig bis gar nicht korrosiv und ist gut in Wasser löslich, stark alkalisch und für Menschen leicht toxisch aber umweltverträglich. Kaliumcarbonat (Pottasche) wird als alternatives Taumittel mit geringer Korrosivität und guter Verträglichkeit für Pflanzen bei Salzstreuverboten eingesetzt.

GLC Glucose (C₆H₁₂O₆ Traubenzucker, Glucose): ++

Glucose wird meist aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, ist Grundlage der meisten Stoffwechselprozesse und nicht gefährdend. Keine negativen Auswirkungen auf Menschen, Fauna & Flora. Wirkt gemäß Untersuchungen als Korrosionsinhibitor. Glucose kann trocken, flüssig oder als Sole ausgebracht werden und ist gut verträglich.

SNI Snow-N-Ice (Produkt NaCl 96,2%, NaSO₄ 2,0%, KClO₂ 1,6%, MnCl₂ 0,2%): +/-

Das Produkt Sno-N-Ice besteht überwiegend aus NaCl + Zusätzen und Verunreinigungen und hat vergleichbare Wirkungen auf Menschen, Fauna und Flora wie NaCl.

NaCl + Glucose (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Glucose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Glucose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu reinem NaCl.

NaCl + Maltose (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Maltose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Maltose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu reinem NaCl.

NaCl + Arabinose (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Arabinose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Arabinose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu NaCl.

NaCl + Mannose (4-8%): -

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Mannose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Mannose für Menschen, Flora unbedenklich aber für die Fauna fallweise toxisch ist (Insekten), sind die Umweltwirkung vergleichbar bis schlechter im Vergleich zu NaCl.

NaCl + Glycerin (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Glycerin, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Mannose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu NaCl.

³⁸ LaPerriere J. D. et al. (1989); Bang, S.S. et al. (1998)

NaCl + Natriummetasilikat (4-8%): --

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Natriummetasilikat, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Natriummetasilikat als (geringfügiger Bestandteil) ist nicht unbedenklich in der Ausbringung aber hat eine sehr gute Inhibitorwirkung.

NaCl + Calciumnitrit (4-8%): --

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Calciumnitrit, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Calciumnitrit als (geringfügiger Bestandteil) ist nicht unbedenklich in der Ausbringung aber hat eine sehr gute Inhibitorwirkung.

NaCl + Natriumphosphat (4-8%): --

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Natriumphosphat, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Natriumphosphat als (geringfügiger Bestandteil) ist nicht unbedenklich in der Ausbringung, hat aber die insgesamt beste Inhibitorwirkung.

Die bereits in der ersten Analyse festgestellten Umweltprobleme alkoholbasierter Taumittel (EA, EG, PG, MA) haben dazu geführt, dass diese von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen wurden und nicht mehr an dieser Stelle explizit angeführt wurden. Wesentliche Wirkungen von Taumitteln auf Glykolbasis sind u.a. ein 1.) erhöhter Biochemischer Sauerstoffbedarf (BSB) und 2.) krebserregende Wirkungen auf die Bachfauna. Ethylen- und Propylenglykol-Enteiser haben endokrin schädigende Eigenschaften. Ethylenglykol ist für Säugetiere akut toxisch und kann zum Tod von Tieren führen.³⁹

Abgesehen von Zucker als wirksamem und in Hinblick auf Fauna und Flora in der üblichen Anwendung weitgehend unbedenklichen Inhibitor sind die wirksamsten Inhibitoren Natriummetasilikat, Calciumnitrit und Natriumphosphat jedenfalls nicht von vorneherein unbedenklich. Sofern eine Verwendung dieser Inhibitoren in Betracht kommt, werden ergänzende Umweltuntersuchungen und Berücksichtigung der jeweiligen Konzentration und Exposition jeweils bei Mischung, Ausbringung, Tauwirkung und Austragung in stark verdünnter Form nach dem Tauvorgang zu empfehlen sein.

³⁹ Corsi S. R. et al., (2006)

3.5.3 Flora

Der nachstehende Überblick der Umweltwirkungen der Grundtaumittel und Inhibitoren sowie eines ausgewählten Produktes auf Basis von NaCl basiert auf einer umfassenden Recherche, der einschlägigen Literatur sowie den Ergebnissen aus vorhergehenden Untersuchungen. Die Wirkung der verwendeten Stoffe ist dabei von der Dosierung und Exposition abhängig. Während die Nebenwirkungen von Salz auf die menschliche Gesundheit dosisabhängig ist, sind Auswirkungen des Streusalzes auf die Flora schon bei geringer Konzentration zu beobachten. Aus Sicht der Flora ist daher zu unterscheiden in die Exposition in Hinblick auf die bereits durch den Schmelzvorgang stark verdünnte Restmengen sowie eine allfällige Kumulation in beaufschlagten Flächen zu beurteilen. Zur besseren Verständlichkeit erfolgt eine kurze Beschreibung und relative Einschätzung in Bezug auf das Referenztaumittel Natriumchlorid (NaCl).

NaCl Natriumchlorid (Sodium Chloride): +/-

Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig. Natriumchlorid ist aufgrund der guten Ausbringbarkeit, Tauwirkung sowie Kosten weltweit der Standard im Winterdienst. Eine Auswirkung kann auftreten bei NaCl - Konzentration von bereits über >500 ppm (Folgen sind niedrige Keimrate und Bräunung der Blätter). Der Einsatz von Streusalz zum Enteisen von Fahrbahnen und Gehwegen führt zu erhöhten Salzgehalten im Boden sowie im Oberflächen- und Grundwasser⁴⁰. Gelangt Salz durch Schmelzwasser in die Pflanzenrhizosphäre entsteht ein Ungleichgewicht im Nährstoffhaushalt. Diese Salzverschmutzung verursacht langfristige Veränderungen des Bodens und der aquatischen mikrobiellen Ökologie. Die Akkumulierung des Natriums in der Bodenlösung führt aufgrund von Austauschreaktionen zu Desorption von Kalium, Kalzium und Magnesium von den Bodenkolloiden und zur Adsorption von Natrium. Steigt die Wassersättigung des Bodens wird Natrium desorbiert und gegen H⁺ aus dissoziiertem Wasser ausgetauscht und verändert somit den pH-Wert des Bodens⁴¹. Durch die erhöhte Salzkonzentration steigt das osmotische Potential der Zellen und somit die Wasserversorgung und Turgordruck in Pflanzen⁴².

Sowohl Bakterienkultivierung als auch 16S rRNA Sequenzierung zeigen einen Anstieg der halophilen Bakterien und Archaeen in Proben aus Streusalz exponierten Gebieten⁴³. Bis zu 25% des Streusalzes gelangt als Salzsprühnebel in die Atmosphäre⁴⁴. Untersuchungen zeigen, dass Salzablagerungen exponentiell mit der Distanz zu Straßen und beaufschlagten Verkehrsflächen absinken und dass über 90% des Salzes innerhalb von 15 Metern abgelagert werden⁴⁵. Das aufgewirbelte Streusalz führt durch die Osmose zu Wasserentzug an Pflanzenoberflächen. Das Absterben von Knospen und Zweigspitzen durch Salzsprühnebel führt zu übermäßiger Anzahl von Seitenzweigen. Natriumchlorid kann die Bodendurchlässigkeit und Belüftung reduzieren und somit Überlandströmung und Erosion im Nahbereich der beaufschlagten Flächen erhöhen.

Die Umweltwirkungen von Natriumchlorid aus dem Winterdienst auf die angrenzende Flora ist jedenfalls erheblich und insbesondere bei unmittelbarer Nähe zu Gewässern sowie Grundwasserschutz- und Schongebieten sowie in sensiblen Waldgebieten (Forstrecht) zu beachten. Zum Einsatz von NaCl in sensiblen Gebieten wurden in der Vergangenheit bereits eine Reihe von spezifischen Genehmigungsverfahren und Gerichtsverfahren durchgeführt. Gemeinsames Merkmal vieler relevanter Fälle war die Vorlage entsprechender Nachweise, dass ein Einsatz alternativer Taumittel nicht mit vertretbaren Mitteln möglich war. Weiters der Streumiteileinsatz durch sparsame und gezielte Streuung soweit als möglich reduziert wird und ein überwiegendes Interesse am Schutz des Menschen in Bezug auf die Verkehrssicherheit besteht. In weniger sensiblen Bereichen wird dagegen der Einsatz des weltweit am häufigsten eingesetzten Taumittels NaCl bei sparsamem Einsatz in der Regel als vertretbar angesehen.

⁴⁰ Brod, H. G. et al. (1993)

⁴¹ Gisi, U. et al. (1997)

⁴² Stahr, K. et al. (1996)

⁴³ Pecher, W.T. et al. (2019)

⁴⁴ Blomqvist, G. (1998)

⁴⁵ Leonardi, S. et al. (1987)

CaCl₂ Calcium(di)chlorid (Calcium Chloride): --

Starke Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute (trocken), leicht giftig. In gelöstem Zustand und in Form von Sole weniger problematisch. Chloride sind leicht im Wasser löslich und erhöhen die Wasserhärte. Erhöhte Chloridwerte können zu anoxischem Zustand im aufnehmenden Gewässer führen. Cl-Kontakt mit Laub kann zu Versengung, Bräunung und Alterung der Blätter führen. Cl-Kontakt kann zu osmotischem Stress führen. Cl und Ca Ionen können Schwermetalle mobilisieren. Ca²⁺ kann die Bodendurchlässigkeit und die Bodenbelüftung erhöhen.

MgCl₂ Magnesium(di)chlorid (Magnesium Chloride): ++

Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute (trocken), in gelöster Form als Sole in der Regel unproblematisch und ungiftig. Chloride sind leicht im Wasser löslich und erhöhen die Wasserhärte. Erhöhte Chloridwerte können zu anoxischem Zustand im aufnehmenden Gewässer führen. Cl-Kontakt mit Laub kann zu Versengung, Bräunung und Alterung der Blätter führen. Cl-Kontakt kann zu osmotischem Stress führen. Mg²⁺ kann die Bodenstabilität und Durchlässigkeit erhöhen. MgCl₂ weist insgesamt nur schwache Reizwirkung auf und die negativen Umweltwirkungen sind im Vergleich zu NaCl geringer.

NAc Natriumacetat (C₂H₃NaO₂, Sodium Acetate): +/-

Schwache bis keine Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, ungiftig und weitgehend umweltverträglich. Das am stärksten ausgeprägte Umweltproblem im Zusammenhang mit Taumittel auf Acetatbasis ist der Anstieg des biochemischen Sauerstoffbedarfs (BSB), der den verfügbaren Sauerstoff für Organismen im Boden und in Gewässern reduziert⁴⁶. Das Acetat-Ion ist in der Natur der am häufigsten vorkommende organische Säuremetabolit, und sein biologischer Abbau könnte zu anaeroben Bodenbedingungen oder zu einer lokalen Erschöpfung des gelösten Sauerstoffs (DO) in Oberflächengewässern führen. Daten, die sich auf einen NaAc/NaFm-basierten Enteisler beziehen, deuten darauf hin, dass während des Frühjahrs-Tauwetterabflusses kurze Zeiträume von Sauerstoffmangel in aufnehmenden Gewässern auftreten können, mit potenzieller Gefahr bei wärmerem Wetter⁴⁷. In Summe ist Natriumacetat in gelöster Form aber fast so verträglich wie NaCl für die Flora und deutlich weniger korrosiv.

KAc Kaliumacetat (CH₃CO₂K, Potassium Acetate): +/-

Schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz empfohlen (trocken). Wird in der Regel nur in Form von Sole gestreut und ist dadurch wenig problematisch, geringfügig wassergefährdend. In gelöster Form aber fast so verträglich wie NaCl und weniger korrosiv.

CMA Calciummagnesiumacetat (CaMg₂(CH₃COO)₆, Calcium Magnesium Acetate): +

CMA ist wasserlöslich, staubbindend, hygroskopisch, nicht korrosiv und gesundheitlich unbedenklich. CMA kann aber bei höherer Dosierung zu Glätte führen, was auf Bahnsteigen eher ungünstig ist. Die Wirkung von Taumitteln auf Acetatbasis auf Pflanzen kann je nach Pflanzenart und vorhandener Konzentration variieren. Für Kentucky-Blaugras, Rotschwingelgras, Gerste und Kresse wurde festgestellt, dass CMA weniger toxisch war als NFO und NaCl⁴⁸. CMA kann das Pflanzenwachstum fördern, indem es die Bodendurchlässigkeit verbessert und das benötigte Calcium und Magnesium als Nährstoffe bereitstellt, was in Gebieten, in denen starker Salzverbrauch zu einer Bodenverdichtung geführt hat, eine wertvolle Eigenschaft sein kann⁴⁹. In Summe ist Calciummagnesiumacetat staubbindend, nicht korrosiv und in Bezug auf die Flora im Vergleich zu NaCl weitgehend umweltverträglich.

NFO Natriumformiat (NaHCO₂ oder CHNaO₂, Sodium Formate): +/-

Natriumformiat ist leicht löslich und hat eine schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute und ist ungiftig. Kosten, Verfügbarkeit und Wirksamkeit sind schlechter als bei NaCl, dafür besteht eine etwas bessere Umweltverträglichkeit bei Ausbringung in Form von Sole.

⁴⁶ LaPerriere, J.D. et al. (1989); Fischel, M. (2001)

⁴⁷ TRB (1991), D'Itri, F. M- (1992); Horner R. R. et al. (1992); Defourny, C. (2000), Bang, S.S. et al. (1998)

⁴⁸ Robidoux P. Y. et al. (2001)

⁴⁹ Fritzsche, C. J. (1992)

KFO Kaliumformiat (KHCO₂ oder CHKO₂, Potassium Formate): +/-

Kaliumformiat hat eine schwache Reizwirkung auf Augen und Schleimhäute, Augenschutz wird bei trockener Verarbeitung empfohlen. Es ist geringfügig wassergefährdend und wird als Taumittel in Form von Sole eingesetzt. Die Kosten und Verfügbarkeit sind ungünstiger als bei NaCl, dafür ist es für die Umwelt verträglicher und weniger korrosiv.

GL Glycerin (C₃H₈O₃, Glycerol, Glycerine Alcohol): +

Glycerin wird aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, kann flüssig oder als Sole ausgebracht werden und ist weitgehend verträglich. Glycerin kann aber unter bestimmten Bedingungen für Pflanzenarten leicht schädlich sein. Es wurde berichtet, dass Glycerin mehrere Auswirkungen auf den Pflanzenzellstoffwechsel hat und die Aktivität einiger Enzyme bei erhöhten Konzentrationen hemmen könnte, insbesondere bei Organismen, die nicht salztolerant sind⁵⁰. Zu den durch Glycerin verursachten zellulären Wirkungen gehören Veränderungen der zytoplasmatischen Ereignisse aufgrund einer erhöhten Viskosität durch intrazelluläres Glycerin, eine veränderte Polymerisation von Tubulin, eine Veränderung der Mikrotubuli-Assoziation, Auswirkungen auf das bioenergetische Gleichgewicht und eine direkte Veränderung der Plasmamembran und der Glykokalyx⁵¹. Nach neuen Untersuchungen u.a. im vorliegenden Forschungsprojekt WINTERLIFE wirkt Glycerin als Korrosionsinhibitor, weshalb ein Einsatz mit NaCl in der Feuchtsalzstreuung grundsätzlich denkbar ist.

KCO Kaliumcarbonat (K₂CO₃ Pottasche, Kalium Carbonate): +

Kaliumcarbonat ist wenig bis gar nicht korrosiv und ist gut in Wasser löslich, stark alkalisch und für Menschen leicht toxisch aber umweltverträglich. Kaliumcarbonat (Pottasche) wird als alternatives Taumittel mit geringer Korrosivität und guter Verträglichkeit für Pflanzen bei Salzstreuverböten eingesetzt.

GLC Glucose (C₆H₁₂O₆, Traubenzucker, Glucose): ++

Glucose wird meist aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt, ist Grundlage der meisten Stoffwechselprozesse und nicht gefährdend. Keine negativen Auswirkungen auf Menschen, Fauna & Flora. Wirkt gemäß Untersuchungen als Korrosionsinhibitor. Glucose kann trocken, flüssig oder als Sole ausgebracht werden und ist gut verträglich.

SNI Snow-N-Ice (Produkt NaCl 96,2%, NaSO₄ 2,0%, KClO₂ 1,6%, MnCl₂ 0,2%): +/-

Das Produkt Sno-N-Ice besteht überwiegend aus NaCl + Zusätzen und Verunreinigungen und hat vergleichbare Wirkungen auf Menschen, Fauna und Flora wie NaCl.

NaCl + Glucose (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Glucose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Glucose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu reinem NaCl.

NaCl + Maltose (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Maltose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Maltose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu reinem NaCl.

NaCl + Arabinose (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Arabinose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Arabinose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu NaCl.

NaCl + Mannose (4-8%): -

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Mannose, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Mannose für Menschen, Flora unbedenklich aber für die Fauna fallweise toxisch ist (Insekten), sind die Umweltwirkung vergleichbar bis schlechter.

⁵⁰ Aubert S. et al., (1994), Heimer, Y. M. (1973)

⁵¹ Hammerstedt R. H. et al. (1992)

NaCl + Glycerin (4-8%): +

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Glycerin, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Da Mannose für Menschen, Fauna und Flora unbedenklich im Vergleich zu NaCl sind, ist die Umweltwirkung geringfügig besser im Vergleich zu NaCl.

NaCl + Natriummetasilikat (4-8%): --

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Natriummetasilikat, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Natriummetasilikat als (geringfügiger Bestandteil) ist nicht unbedenklich in der Ausbringung aber hat eine sehr gute Inhibitorwirkung.

NaCl + Calciumnitrit (4-8%): --

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Calciumnitrit, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Calciumnitrit als (geringfügiger Bestandteil) ist nicht unbedenklich in der Ausbringung aber hat eine sehr gute Inhibitorwirkung.

NaCl + Natriumphosphat (4-8%): --

Besteht aus dem Grundtaumittel NaCl und Natriumphosphat, die gemeinsam ohne großen Aufwand trocken, angefeuchtet oder in Form von Sole ausbringbar sind. Natriumphosphat als (geringfügiger Bestandteil) ist nicht unbedenklich in der Ausbringung, hat aber die insgesamt beste Inhibitorwirkung.

Die bereits in der ersten Analyse festgestellten Umweltprobleme alkoholbasierter Taumittel (EA, EG, PG, MA) haben dazu geführt, dass diese von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen wurden und nicht mehr an dieser Stelle explizit angeführt wurden. Es wurde gezeigt, dass Glykole das Pflanzenwachstum hemmen, jedoch nur geringfügig stärker als Salz. Weitere Studien fanden heraus, dass Ethylenglykol hohe Abbauraten durch aerobe Mikroorganismen mit geringem Bioakkumulationspotential aufweist. Sie fanden auch, dass Ethylenglykol ein geringes Adsorptionspotenzial an Bodenpartikel und damit eine hohe Mobilität im Boden aufweist. Zusammenfassend sind Alkohole daher in der Regel etwas schädlicher für die Flora im Vergleich zu NaCl, der Ausschlussgrund sind aber in der Regel die Auswirkungen auf die Fauna⁵². Aufgrund des besonders niedrigen Gefrierpunktes und der geringen Korrosivität wird dennoch in Sonderfällen (z.B. Flughäfen, Enteisung Flugzeuge) eine Anwendung erfolgen, wenn entsprechende Schutzvorkehrungen getroffen wurden und eine ausreichende Verdünnung vor der Immission sichergestellt ist.

Abgesehen von Zucker als wirksamem und in Hinblick auf Fauna und Flora in der üblichen Anwendung weitgehend unbedenklichen Inhibitor sind die wirksamsten Inhibitoren Natriummetasilikat, Calciumnitrit und Natriumphosphat jedenfalls nicht von vorneherein unbedenklich. Sofern eine Verwendung dieser Inhibitoren in Betracht kommt, werden ergänzende Umweltuntersuchungen und Berücksichtigung der jeweiligen Konzentration und Exposition jeweils bei Mischung, Ausbringung, Tauwirkung und Austragung in stark verdünnter Form nach dem Tauvorgang zu empfehlen sein.

⁵² Kawasaki et al. (1983), Hartwellet al. (1995)

3.6 Ergebnisse und Bewertung

3.6.1 Grundlagen Referenzbeispiel Bahnhof

Das Referenzbeispiel Bahnhof wurde in WINTERLIFE gewählt, um ein Mengengerüst für den Vergleich der Taumittel aufzubauen. Weiters dient das Referenzbeispiel als Grundlage für einen konkreten Praxistest ausgewählter Alternativen vor einer endgültigen Entscheidung. Zudem kann dieses Mengengerüst auch als Basis dienen, um allfällige Dimensionen der Umweltwirkungen abzuschätzen. Wie in Abbildung 60 dargestellt wurde ein vor kurzem generalsanierter Bahnhof mit bekannten Kosten ausgewählt, der Anteil von Korrosion infolge Winterdienst betroffener Anlagen (10%) abgeschätzt und über die Lebensdauer die Annuität eines Lebensjahres ermittelt. Aus den Übersichtsplänen wurden die betreuten Flächen ermittelt und über Referenzkennzahlen die Anzahl der Einsätze und der Streumittelverbrauch mit dem Referenztaumittel NaCl für einen Durchschnittswinter ermittelt.

Mit den aus der Marktuntersuchung bekannten Kosten und der Kosteneffizienz sind in weiterer Folge der Taumittelbedarf für Alternativen sowie die sich ergebenden Mehrkosten in einem Durchschnittswinter abschätzbar. Ausdrücklich nicht berücksichtigt in diesem vereinfachten Beispiel sind allfällige Aufwendung (Personal, Material, Gerät, Fremdleistung) infolge einer möglichen Änderung der Lagerung, Einsatzplanung und Streustrategie, da diese von den konkreten Eigenschaften der Alternative abhängt. Im nächsten Schritt wurden die Mehrkosten über die Lebensdauer aufsummiert, da signifikante Auswirkungen auf die Lebensdauer nur bei langjähriger Anwendung zu erwarten sind. Im Referenzbeispiel muss die 1,5-fache Menge Taumittel für eine vergleichbare Wirkung ausgebracht werden, was die Taumittelkosten zusammen mit dem höheren Einheitspreis (Faktor 5) entsprechend erhöht. Da vergleichsweise teure Anlagen betroffen sind, rechnet sich der Einsatz über die gesamte Lebensdauer im Referenzbeispiel, wenn durch verringerte Korrosion die Lebensdauer um zumindest 2 Jahre (+4%) erhöht werden kann. Werden der Betonangriff und die Korrosion in Versuchen z.B. um 20% reduziert, ist eine solche Erhöhung jedenfalls plausibel.

Grundlagen Lebenszyklusanalyse Korrosionswirkung Referenzbahnhof



Eckdaten Beispiel:

- Investitionssumme: z.B. 35 Mio. € (Erneuerung)
- Von Winterdienst & Korrosion betroffen ca. 10% = 3,5 Mio. €
- Verlust Lebensjahr → Annuität von 3,5 Mio. z.B. Ø 50 Jahre bei 3% → **136.000 €/a Kosten**

Winterdienst Beispiel:

- Winterdienst Bahnsteige + Zugänge (2.500 m²), Vorplatz (1250 m²), Parken (750 m²) = 4.500 m²
- Betreuung jedenfalls 30 min vor ersten bzw. 30 min nach letztem Zug (jedenfalls 6 – 22 Uhr)
- Verbrauch über Wetterereignisse Vorarlberg < 500 m Seehöhe (Geschätzt):
 - ca. Ø 18 Schneefalltage mit Ø 3,6 cm Schnee (1/3 2x Streuen, 1/3 3x Streuen, 1/3 4x Streuen z.B. je Ø 40 g/m² NaCl → ca. 2,2 kg/m² * 4.500 m² = 9.720 kg NaCl/Winter
 - ca. Ø 50 Reifitage (1x präventiv) je Ø 20 g/m² NaCl → ca. 1,0 kg/m² * 4.500 m² = 4.500 kg NaCl
- Kosten auftauendes Streumittel: 120 €/t NaCl → ca. 14 t → ca. 1.700 € / Winter für Taumittel

Alternatives Taumittel :

- Tauleistung im Vergleich zu NaCl mit Faktor 1,5
- Taumittelbedarf ca. 14 t/Winter * 1,5 = 21 t/Winter
- Kosten alternatives Taumittel z.B. Faktor 5 teurer → 21t/Winter * 600 €/t → ca. 12.600 € / Winter → Mehrkosten von 10.900 € / Jahr

Wirtschaftlichkeit Alternative:

- BW Mehrkosten WD auf 50 Jahre = 280.500 €
- Min. Gewinn Lebensdauer für Wirtschaftlichkeit 280.500/136.000 ≥ 2 Jahre (ca. +4%)!
- Wirtschaftlich, wenn Lebensdauerertrag > 2 Jahre

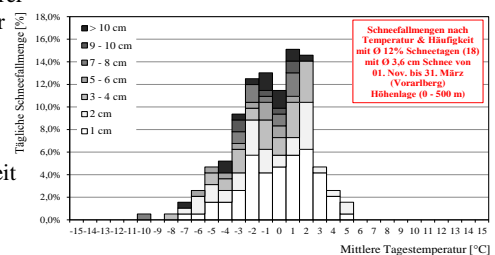


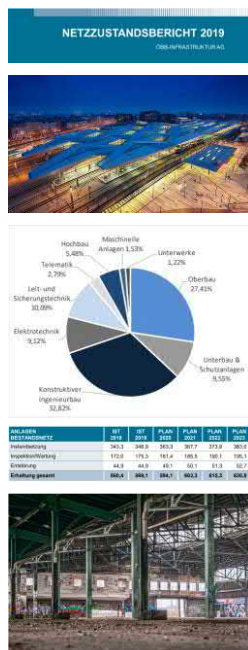
Abbildung 60: Grundlagen, Annahmen und Lebenszyklusanalyse Taumittelverbrauch und Korrosionswirkung auf einem Referenzbahnhof mit Abschätzung erforderlicher Gewinn Lebensdauer für Amortisation Taumittelalternative

3.6.2 Grundlagen Referenzbeispiel ÖBB-INFRA

Das Referenzbeispiel ÖBB-INFRA wurde in WINTERLIFE gewählt, um ein Mengengerüst für die Abschätzung der netzweiten Einführung alternativer Taumittel aufzubauen. Das Referenzbeispiel kann dabei als Basis dienen, um die Kostendimension in der Beschaffung und den Einsatz der Alternativen gegenüberzustellen, die übrigen betrieblichen Erfordernisse darauf abzustellen und allfällige Folgen für die Beauftragung Dritter in der Durchführung des Winterdienstes zu berücksichtigen. Weiters können auf Basis der ermittelten Dimensionen des Streumittelverbrauches die Dimensionen der Umweltwirkungen abgeschätzt werden. Vor allem in Hinblick auf allfällige Zusätze, deren Anteil am Grundtaumittel sowie einer wiederholten Ausbringung über viele Jahre ist dies für die Abschätzung der Auswirkungen auf Menschen, Flora und Fauna wesentlich (Kap. 3.5).

Wie in Abbildung 61 dargestellt, erfolgt die Abschätzung des Wertes des Anlagevermögens der ÖBB-INFRA aus dem Netzzustandsbericht. Der Anteil von durch Winterdienst betroffenen Anlagen ist im Vergleich zum Referenzbeispiel eines Bahnhofes naturgemäß deutlich geringer. Wie zuvor wird in einem nächsten Schritt der Wert eines Lebensjahres der betroffenen Anlagen über die Annuität ermittelt. Der Taumittelbedarf mit dem Referenztaumittel NaCl für den Winterdienst der ÖBB kann nur grob über die Verbrauchsdaten der beauftragten Firmen (Maschinenring) bzw. das Referenzbeispiel und die Anzahl der Stationen abgeschätzt werden. Mit dem geschätzten Taumittelbedarf eines durchschnittlichen Winters (15.000 t) ergeben sich Gesamtkosten für die Beschaffung sowie zusammen mit der Effizienz und den Einheitskosten die Mehrkosten der Alternativen. Aus der Gegenüberstellung des Barwertes der Mehrkosten über die Lebensdauer mit der Kosteneinsparung bei Verlängerung der Lebensdauer betroffener Anlagen um ein Jahr ergibt sich wieder der erforderliche Gewinn an Lebensdauer für die Wirtschaftlichkeit. Für das angeführte Beispiel wäre hier eine Erhöhung der Lebensdauer um mehr als 3,5 Jahre (+7%) für einen wirtschaftlichen Einsatz der Alternativen erforderlich. Das Beispiel zeigt zudem die erheblichen wirtschaftlichen Dimensionen einer netzweiten Umstellung auf alternative Taumittel deutlich auf.

Grundlagen Lebenszyklusanalyse Korrosionswirkung ÖBB-INFRA



Eckdaten Beispiel:

- Wiederbeschaffungswert ÖBB-INFRA: z.B. 45 Mrd. € (vgl. Netzzustandsbericht 2019)
- Von Winterdienst & Korrosion betroffen ca. 5% der Anlagen = 2,25 Mrd. €
- Mittlere Lebensdauer/Abschreibungsdauer betroffene Anlagen geschätzt ca. Ø 50 Jahre
- Verlust Lebensjahr → Annuität 2,25 Mrd. € auf Ø 50 Jahre bei 3% → ca. 87,1 Mio. €/a Kosten Lebensjahr

Winterdienst Beispiel:

- Durchschnittsverbrauch auftauende Streumittel NaCl: 15.000 t/Winter (geschätzt)
- Kosten auftauendes Streumittel: 120 €/t NaCl → 120 * 15.000 t → ca. 1,8 Mio €/Winter für Taumittel (Natriumchlorid)

Alternatives Taumittel :

- Tauleistung im Vergleich zu NaCl mit Faktor 1,5
- Taumittelbedarf ca. 15.000 t/Winter *1,5 = 22.500 t/Winter
- Kosten alternatives Taumittel z.B. Faktor 5 teurer → 22.500 t/Winter *600 €/t → ca. 13,5 Mio. € / Winter → Mehrkosten von 11,7 Mio. € / Jahr

Wirtschaftlichkeit Alternative:

- BW Mehrkosten WD auf 50 Jahre = 301 Mio. €
- Min. Gewinn Lebensdauer für Wirtschaftlichkeit $301/87,1 \geq 3,5$ Jahre (ca. +7%)!
- Alternatives Taumittel ist dann wirtschaftlich, wenn der Lebensdauerertrag > 3,5 Jahre mit hoher Sicherheit erzielbar ist

Anlagentyp	Einheit	Bestand 2018	Bestand 2019	Alters-Ø 2019 [Jahre]	Technische Nutzungsdauer [Jahre]
Gleise Kernnetz (Gleisrang a)	km	5.577	5.605	19	Ø 37 (16-60)
Gleise Ergänzungsnetz (Gleisrang a)	km	1.262	1.254	25	Ø 45 (25-60)
Weichen Kernnetz (Gleisrang a)	Stk.	5.322	5.322	16	Ø 33 (18-50)
Weichen Ergänzungsnetz (Gleisrang a)	Stk.	656	656	22	Ø 34 (30-50)
Dächer	Stk.	3.379	3.405	23	Ø 55
Brücken (inkl. konstr. Durchlässe)	Stk.	8.863	8.773	50	Ø 100 (90-150)
Tunnel	Stk.	250	251	42	Ø 142 (80-150)
Gebäude	Stk.	2.138	2.066	55	Ø 91 (28-182)
Stellwerksanlagen	Stk.	1.120	1.128	23	Ø 32 (25-40)
ETCS (Europ. Train Control System)	km	408	408	8	Ø 25
Oberleitung	km	8.130	8.183	27	Ø 91 (40-60)

Abbildung 61: Grundlagen, Annahmen und Lebenszyklusanalyse Taumittelverbrauch und Korrosionswirkung für die ÖBB-INFRA mit Abschätzung erforderlicher Gewinn Lebensdauer für Amortisation Taumittelalternative

3.6.3 Berechnung und Ergebnisse

Ausgehend von dem in Kap. 2.3 dargestellten Bewertungsansatz der Nutzwertanalyse ist eine Vorauswahl an Grundtaumitteln und Produkten für die vertiefte Untersuchung der Eignungskriterien erfolgt. Für eine konkrete Entscheidungsfindung zwischen Alternativen ist die Nutzwertanalyse aber nur begrenzt geeignet, da wesentliche Aspekte durch die Benotung und (subjektive) Gewichtung in ihren Dimensionen nur schwer erfassbar sind. Aufbauend auf die bisherige Forschung zu den Eignungskriterien von Taumitteln wurde daher der Ansatz gewählt, die Mehrkosten alternativer Grundtaumittel ohne/mit Inhibitor oder Produkten mit der erforderlichen Verlängerung der Lebensdauer betroffener Anlagen zu vergleichen. Wenn die eingesparten Kosten aus der Verlängerung der Lebensdauer infolge reduzierter Korrosion die Mehrkosten der alternativen Taumittel mit hoher Zuverlässigkeit übersteigen und für die Umwelt keine relevante Verschlechterung darstellen, wird ein Einsatz voraussichtlich gerechtfertigt sein.

Aufbauend auf das Mengengerüst der Referenzbeispiele Bahnhof und ÖBB-INFRA sind die Berechnungsergebnisse und der Vergleich der Taumittel in einer Übersichtstabelle (Abbildung 62) zusammengefasst bzw. für die Detailanalyse in Abbildung 63 bis Abbildung 70 dargestellt. Aufbauend auf die theoretische Grenztauleistung bei einer Referenztemperatur von -5°C zeigt sich, dass die angeführten Grundtaumittel bzw. das Produkt bis auf Glucose und Glycerin in einer Bandbreite zwischen demselben bis zweifachem Taumittelbedarf für eine vergleichbare Wirkung liegen (Abbildung 63, Abbildung 65). Trotz teilweise erheblich höherer Einheitskosten bleiben die Mehrkosten für alternative Taumittel für einen Winter auf einem Referenzbahnhof überschaubar (Abbildung 64) und liegen unter 10.000 € für die wichtigsten Alternativen (z.B. CaCl_2 , MgCl_2 , NAc, KAc, NFO, GL, $\text{NaCl}+4\%-8\%$ Inhibitor). Eine netzweite Ausrollung des Winterdienstes mit diesen Alternativen würde sich dagegen bereits mit einem niedrigen einstelligen Millionenbetrag auswirken (Abbildung 66).

Werden die Kosten der alternativer Taumittel im Lebenszyklus für den Referenzbahnhof aufsummiert, ergeben sich je nach gewählter Alternative Mehrkosten von einigen 10.000 € bis zu 1,5 Mio. € (Abbildung 67). Die geringsten Mehrkosten hat dabei $\text{NaCl}+\text{Inhibitor}$ (10-20 k€), CaCl_2 (30 k€), MgCl_2 (40 k€), NAc (80 k€), NFO (90 k€), MA (130 k€), GL (170 k€). Das ausgewählte Produkt (Sno-N-Ice) würde im Lebenszyklus des Referenzbahnhofs zu Mehrkosten von 350 k€ führen. Wie bereits an anderer Stelle angeführt (Kap. 3.1.1, Kap. 3.5), ist ein Einsatz von CaCl_2 sowie der Alkohole (EA, EG, PG, MA) aufgrund ihrer Umweltwirkung bzw. Mehrkosten nicht sinnvoll, da ausreichend geeignetere Alternativen zur Verfügung stehen. Werden die Kosten der verbleibenden Alternativen mit dem erforderlichen Gewinn an Lebensdauer der betroffenen Anlagen am Referenzbahnhof verglichen, zeigt sich, dass meist weniger als ein Jahr Lebensdauerertrag für die Amortisation ausreicht. Aufbauend auf die Ergebnisse der Korrosionsversuche in WINTERLIFE und die gezeigten erheblichen Reduktionspotenziale der Korrosivität ist für alle angeführten Alternativen zu erwarten, dass ein Einsatz wirtschaftlich sein wird. Die höchste Wirtschaftlichkeit wird in allen Fällen bei Einsatz von NaCl in Kombination mit einem geeigneten Inhibitor (z.B. 4-8% Zuckerderivate) zu erreichen sein (Abbildung 68).

Die Berechnungen für eine netzweite Umsetzung alternativer Taumittel durch die ÖBB-INFRA zeigen ein grundsätzlich ähnliches Bild wie für den Referenzbahnhof bei naturgemäß deutlich höheren Mehrkosten (Abbildung 69). Die geringsten Mehrkosten sind wieder für $\text{NaCl}+\text{Inhibitor}$ (13-19 Mio. €), CaCl_2 (31,5 Mio. €), MgCl_2 (44,1 Mio. €), NAc (84,4 Mio. €), NFO (93,5 Mio. €), MA (132,2 Mio. €), GL (177,4 Mio. €) zu erwarten. Das ausgewählte Produkt (Sno-N-Ice) würde im Lebenszyklus der ÖBB-INFRA bei netzweiter Anwendung zu Mehrkosten von ca. 360 Mio. € führen. Angesichts des in den Korrosionsversuchen und Analysen gezeigten Reduktionspotenzials der Korrosivität wird die erforderliche Erhöhung der Lebensdauer für einen wirtschaftlichen Einsatz der Alternativen für die wichtigsten Alternativen mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls erreichbar sein (Abbildung 70). Die bei weitem höchste Wirtschaftlichkeit bei dem geringsten finanziellen und technischen Risiko weist auch hier in allen Fällen der Einsatz von NaCl in Kombination mit einem geeigneten Inhibitor auf. Zudem hätte eine solche Kombination den Vorteil, dass sich an der Winterdienstpraxis aufgrund vergleichbarer Tauwirkung praktisch nichts ändert und die Umweltwirkungen sogar geringfügig besser im Vergleich zur geübten Praxis sein dürften.

Winterdienst OEVB	Temperatur [°C]	Eismenge [g]		E-Kosten nach Menge [€]		Streufläche [m ²]	Bedarf BH* [kg/m ²]	Bedarf ÖBB* [t/a]		Mischkosten [€/t]	Inhibitor #1 Inhibitor #1							
	-5,00	Ø NaCl	Ø CaCl ₂	Ø MgCl ₂	Nac	Kac	Cma	Nfo	Kfo	Kco	Ea	Eg	Pg	Ma	Gl	Sno-N-Ice	NaCl+4%	NaCl+8%
		1 000,0	100	Menge [t]			3,2	(geschätzt)	15 000	(geschätzt)	20	4%	8%					
Dichte [g/cm ³]	2,16	2,15	2,32	1,5	1,8	0,72	1,92	1,91	2,43	0,789	1,15	1,1	0,85	1,27	1,56	2,16	2,14	2,11
Eutektikum (°C)	-22,0	-52,5	-33,5	-18	-60	-27,5	-16,0	-53,0	-36,1	-118	-46,27	-50	-116	-47	-11,2	-22,0	-21,57	-21,14
Eutektikum [m ³]	23,5	30,9	21,3	23,3	49	32,5	21,0	48,0	40,0	93,5	57	59	87,7	67	50	23,5	24,56	25,62
Konzentration [m ³ %]	7,2	8,4	6,9	9,5	11,7	12,9	10,1	13,7	13,7	14,1	14,1	13,9	8,2	18,4	31,5	7,2	7,6	7,8
Streumenge [g]	77,7	92,1	73,7	105,2	131,9	148,1	112,6	158,5	158,2	163,6	163,6	161,4	89,8	225,1	459,9	77,6	81,7	85,1
Relation NaCl	100%	119%	95%	135%	170%	191%	145%	204%	204%	211%	211%	208%	116%	290%	592%	100%	105%	110%
E-Kosten [€/t]	120	170	247	250	600	1200	250	700	900	1965	1213	1905	400	200	290	1053	147	154
Kosten Gesamt [Cent]*	0,93	1,6	1,8	2,6	7,9	17,8	2,8	11,1	14,2	32,1	19,8	30,8	3,6	4,5	11,5	8,2	1,2	1,3
Kosteneffizienz relativ	100%	168%	195%	282%	849%	1907%	302%	1190%	1527%	3449%	2129%	3299%	385%	483%	1233%	877%	129%	140%
Bedarf BH [t/a]	14,4	17,1	13,7	19,5	24,4	27,5	20,9	29,4	29,3	30,3	30,3	29,9	16,7	41,7	85,2	14,4	15,1	15,8
Kosten BH [€/a]	1 728	2 905	3 375	4 876	14 667	32 947	5 216	20 565	26 390	59 596	36 789	57 013	6 661	8 346	24 722	15 159	2 223	2 424
Bedarf ÖBB [t/a]	15 000	17 780	14 226	20 318	25 463	28 600	21 735	30 603	30 544	31 593	31 593	31 175	17 347	43 471	88 800	15 000	15 776	16 441
Kosten ÖBB [Mio. €/a]	1,80	3,03	3,52	5,08	15,28	34,32	5,43	21,42	27,49	62,08	38,32	59,39	6,94	8,69	25,75	15,79	2,32	2,53

Wirtschaftlichkeit OEVB	Zins [%]	Wert BH [Mio. €]		Wert ÖBB [Mrd. €]		Anteil ÖBB [%]		Anteil ÖBB [%]		Ø Leben [a]		Ø Leben [a]		Faktor q [-]				
	3%	Ø NaCl	Ø CaCl ₂	Ø MgCl ₂	Nac	Kac	Cma	Nfo	Kfo	Kco	Ea	Eg	Pg	Ma	Gl	Sno-N-Ice	NaCl+4%	NaCl+8%
		35	45	2%	50	10%	2%	50	10%	2%	50	10%	2%	50	10%	2%	50	10%
Mehrkosten WD [€/a]	0	1 177	1 647	3 148	12 939	31 219	3 488	18 837	24 662	57 868	35 061	55 285	4 933	6 618	22 994	13 431	495	696
Anlagewert betr. [Mrd. €]	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Annuität Anlage [€/a]	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029	136 029
BW Mehrkosten WD [€/a]	0	30 283	42 370	81 005	332 913	803 263	89 754	484 684	634 551	1 488 935	902 108	1 422 465	126 935	170 290	591 631	345 566	12 742	17 916
Gewinn Leben erf. [a]	0,0	0,2	0,3	0,6	2,4	5,9	0,7	3,6	4,7	10,9	6,6	10,5	0,9	1,3	4,3	2,5	0,1	0,1
relativ zu Ø Leben [%]	0,0	0,4%	0,6%	1,2%	4,9%	11,8%	1,3%	7,1%	9,3%	21,9%	13,3%	20,9%	1,9%	2,5%	8,7%	5,1%	0,2%	0,3%

Beispiel ÖBB Gesamt	Ø NaCl		Ø CaCl ₂		Ø MgCl ₂		Nac		Kac		Cma		Nfo		Kfo		Kco		Ea		Eg		Pg		Ma		Gl		Sno-N-Ice		NaCl+4%		NaCl+8%				
	Mehrkosten ÖBB [Mio. €/a]	Anlagewert betr. [Mrd. €]	Annuität Anlage [Mio. €/a]	BW Mehrkosten WD [Mio. €]	Gewinn Leben erf. [a]	relativ zu Ø Leben [%]	Mehrkosten ÖBB [Mio. €/a]	Anlagewert betr. [Mrd. €]	Annuität Anlage [Mio. €/a]	BW Mehrkosten WD [Mio. €]	Gewinn Leben erf. [a]	relativ zu Ø Leben [%]	Mehrkosten ÖBB [Mio. €/a]	Anlagewert betr. [Mrd. €]	Annuität Anlage [Mio. €/a]	BW Mehrkosten WD [Mio. €]	Gewinn Leben erf. [a]	relativ zu Ø Leben [%]	Mehrkosten ÖBB [Mio. €/a]	Anlagewert betr. [Mrd. €]	Annuität Anlage [Mio. €/a]	BW Mehrkosten WD [Mio. €]	Gewinn Leben erf. [a]	relativ zu Ø Leben [%]	Mehrkosten ÖBB [Mio. €/a]	Anlagewert betr. [Mrd. €]	Annuität Anlage [Mio. €/a]	BW Mehrkosten WD [Mio. €]	Gewinn Leben erf. [a]	relativ zu Ø Leben [%]	Mehrkosten ÖBB [Mio. €/a]	Anlagewert betr. [Mrd. €]	Annuität Anlage [Mio. €/a]	BW Mehrkosten WD [Mio. €]	Gewinn Leben erf. [a]	relativ zu Ø Leben [%]	
0,0	0,9	35,0	0	0,0	0,0	0,0	0,9	35,0	35,0	35,0	35,0	32,5	3,6	19,6	25,7	60,3	36,5	57,6	6,9	24,0	14,0	0,5	0,7	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	
35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	35,0	
0	32	44	84	347	837	93	505	661	1 551	940	1 482	132	177	616	360	13	19	360	13	19	360	13	19	360	13	19	360	13	19	360	13	19	360	13	19	360	13
0,0	0,9	1,3	2,4	9,9	23,9	2,7	14,4	18,9	44,3	26,9	42,4	3,8	5,1	17,6	10,3	0,4	0,5	17,6	10,3	0,4	0,5	17,6	10,3	0,4	0,5	17,6	10,3	0,4	0,5	17,6	10,3	0,4	0,5	17,6	10,3	0,4	0,5
0,0	1,8%	2,5%	4,8%	19,8%	47,8%	5,3%	28,9%	37,8%	88,7%	53,7%	84,7%	7,6%	10,1%	35,2%	20,6%	0,8%	1,1%	35,2%	20,6%	0,8%	1,1%	35,2%	20,6%	0,8%	1,1%	35,2%	20,6%	0,8%	1,1%	35,2%	20,6%	0,8%	1,1%	35,2%	20,6%	0,8%	1,1%

Legende: NaCl = Natriumchlorid, CaCl = Calciumchlorid, MgCl = Magnesiumchlorid, Nac = Natriumacetat, Kac = Kaliumacetat, Cma = Calciummagnesiumacetat, Nfo = Natriumformiat, Kfo = Kaliumformiat, Kco = Kaliumcarbonat, Ea = Ethylalkohol, Eg = Ethylenglykol, Pg = Propylenglykol, Ma = Methylenglykol, Gl = Glycerin, Sno-N-Ice = NaCl - Derivat

Abbildung 62: Zusammenfassung der Lebenszyklusanalyse mit Abschätzung Taumittelverbrauch, Mehrkosten mit sowie Abschätzung des erforderlichen Gewinns an Lebensdauer infolge reduzierter Korrosion mit alternativen Taumitteln für eine Amortisation für den Referenzbahnhof und die ÖBB-INFRA

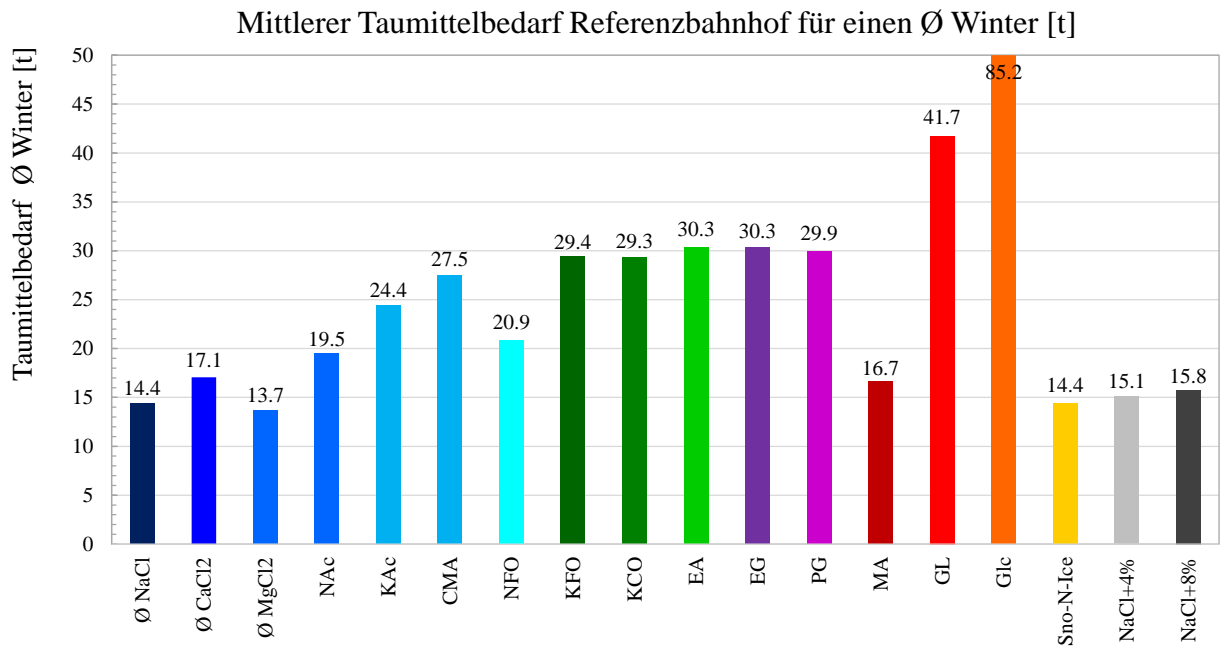


Abbildung 63: Zusammenfassung Ergebnisse mittlerer Taumittelbedarf Referenzbahnhof für einen Ø Winter [t]

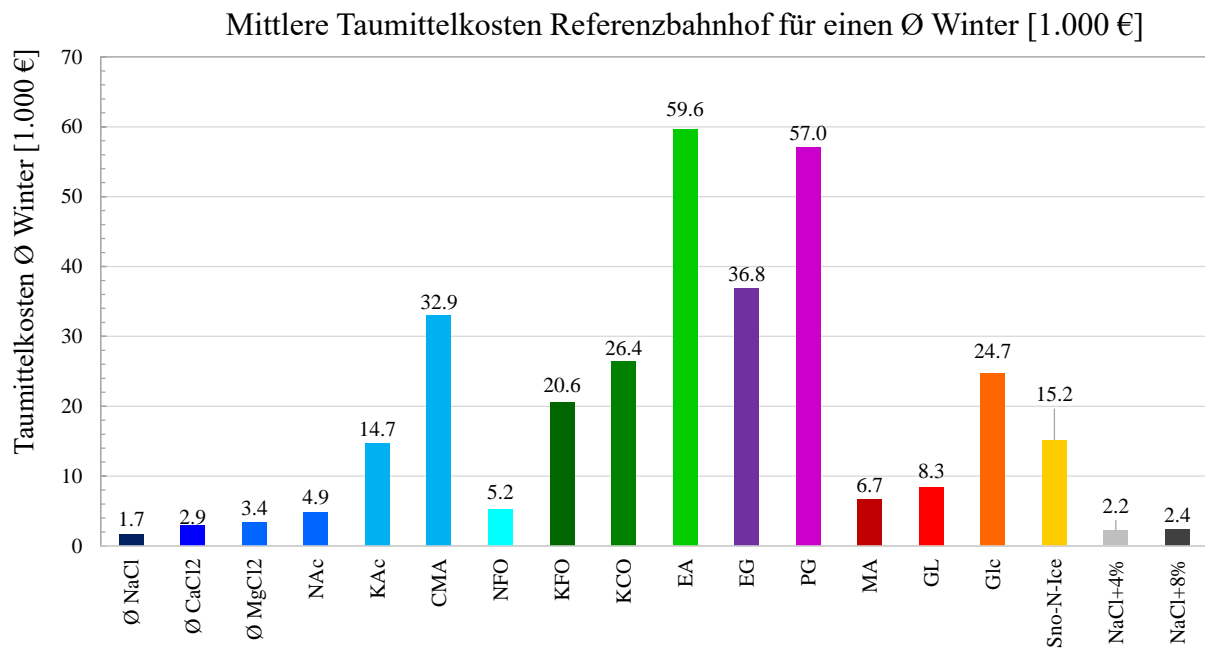


Abbildung 64: Mittlere Taumittelkosten Referenzbahnhof für einen Ø Winter [1.000 €]

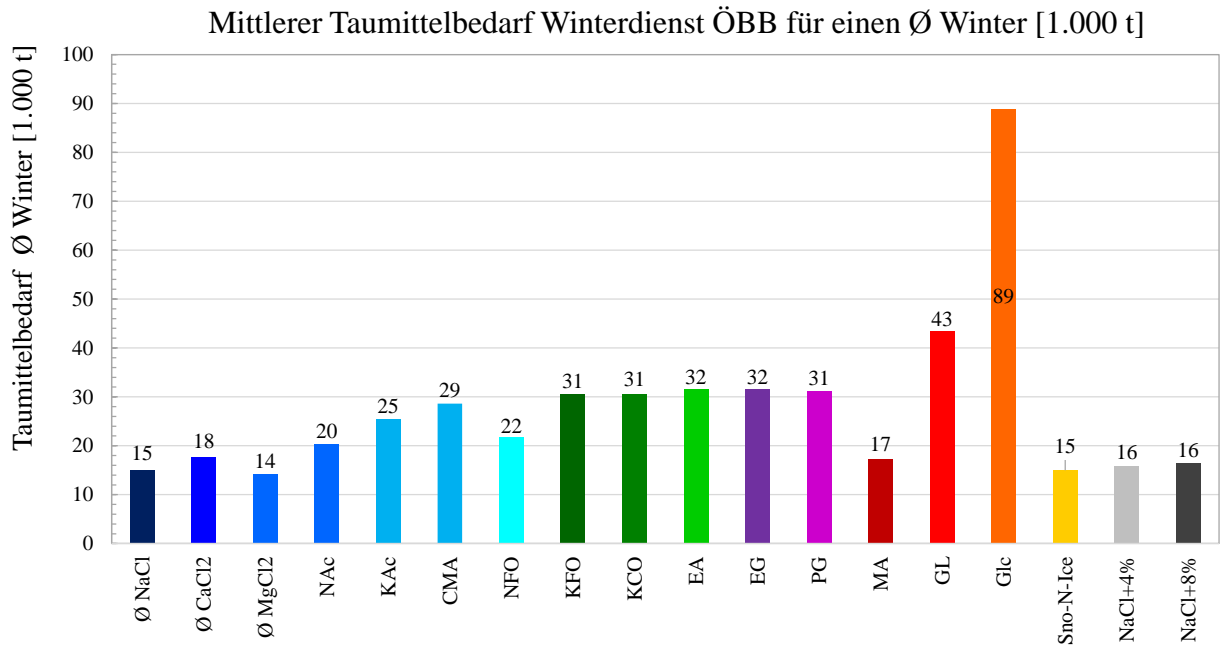


Abbildung 65: Zusammenfassung mittlerer Taumittelbedarf Winterdienst ÖBB für einen Ø Winter [1.000 t]

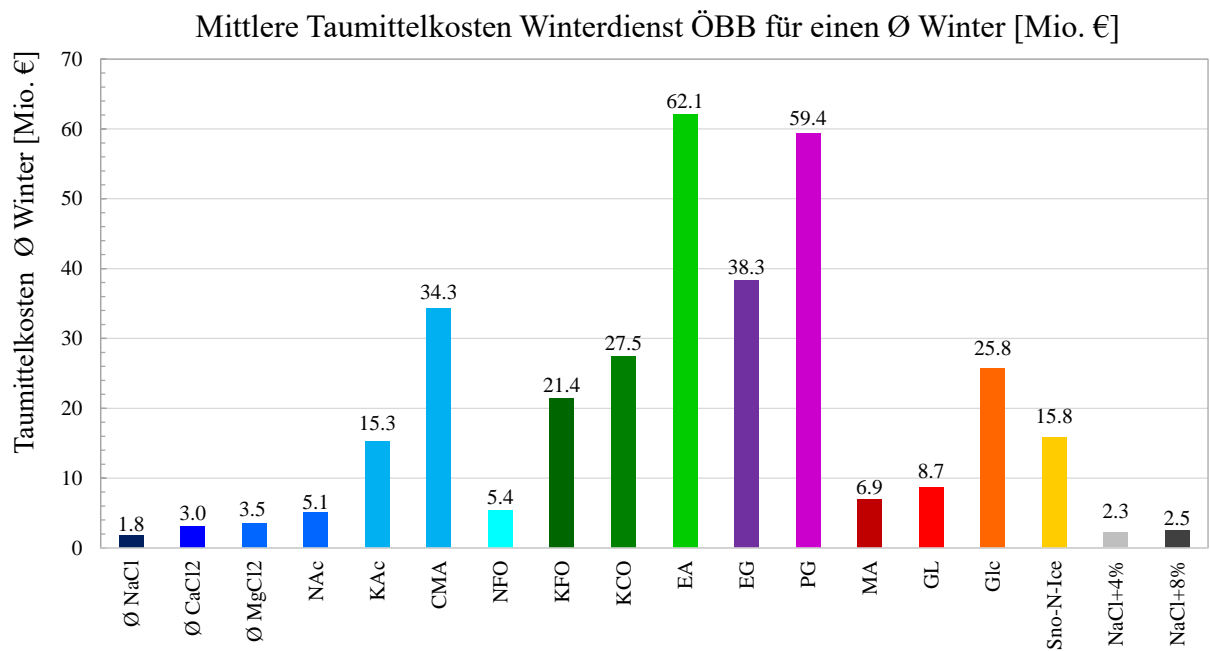


Abbildung 66: Zusammenfassung mittlere Taumittelkosten Winterdienst ÖBB für einen Ø Winter [Mio. €]

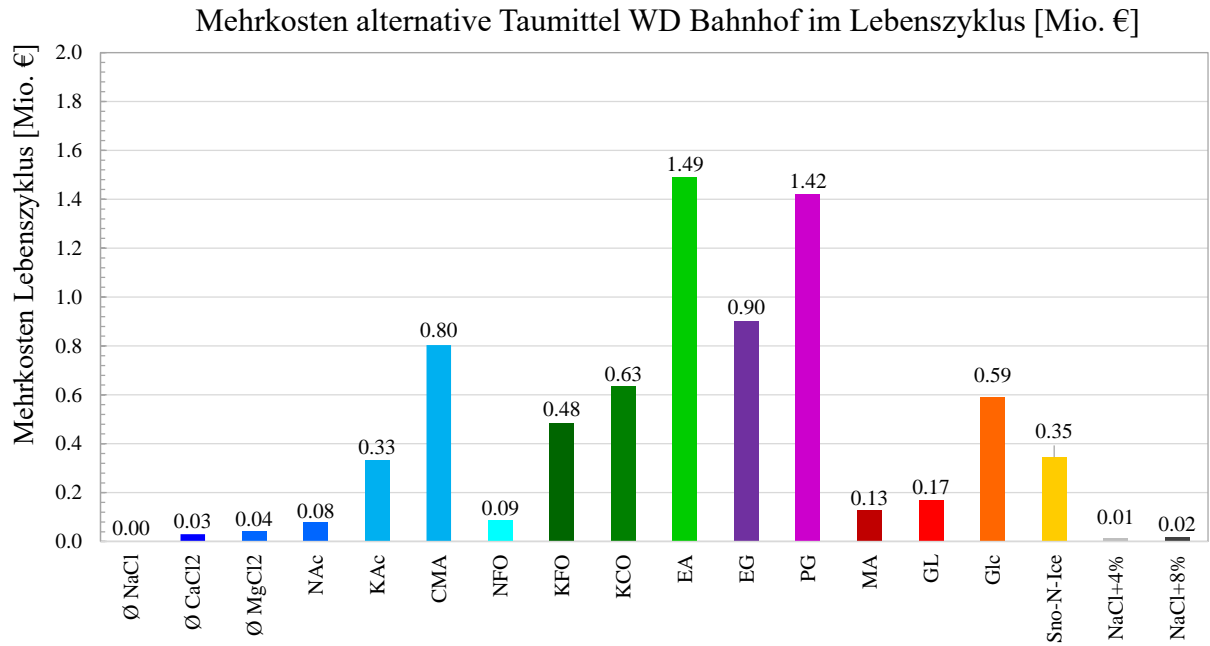


Abbildung 67: Zusammenfassung Mehrkosten alternative Taumittel WD Bahnhof im Lebenszyklus [Mio. €]

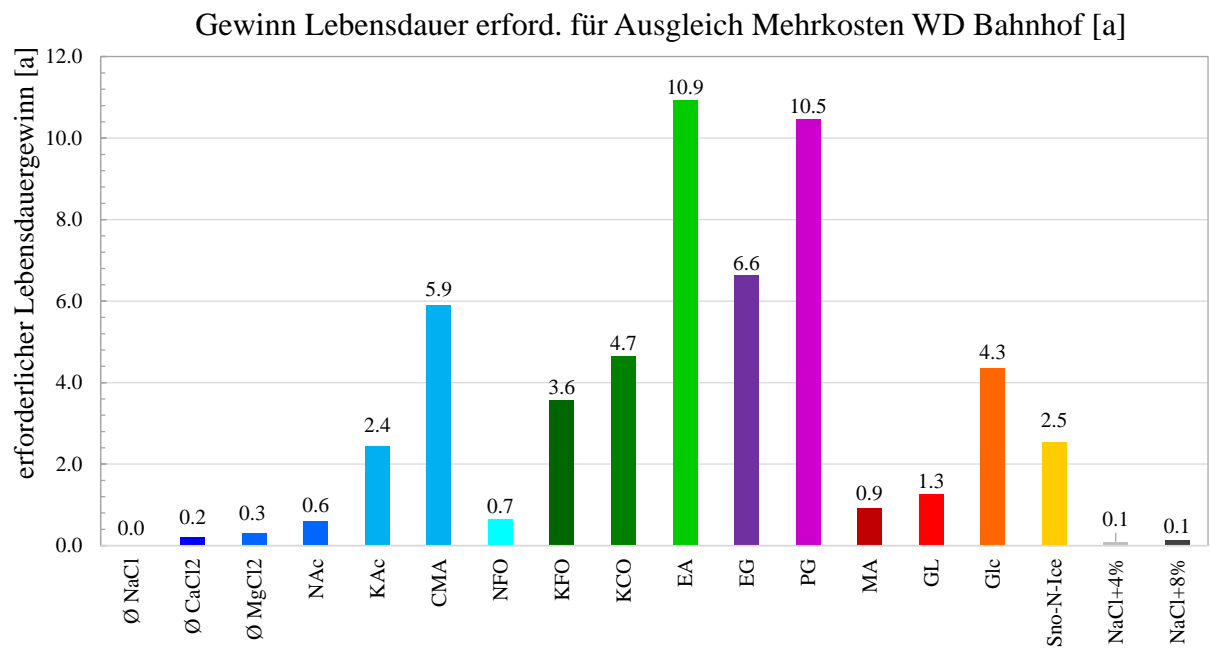


Abbildung 68: Zusammenfassung Gewinn Lebensdauer erforderlich für Ausgleich Mehrkosten WD Bahnhof [a]

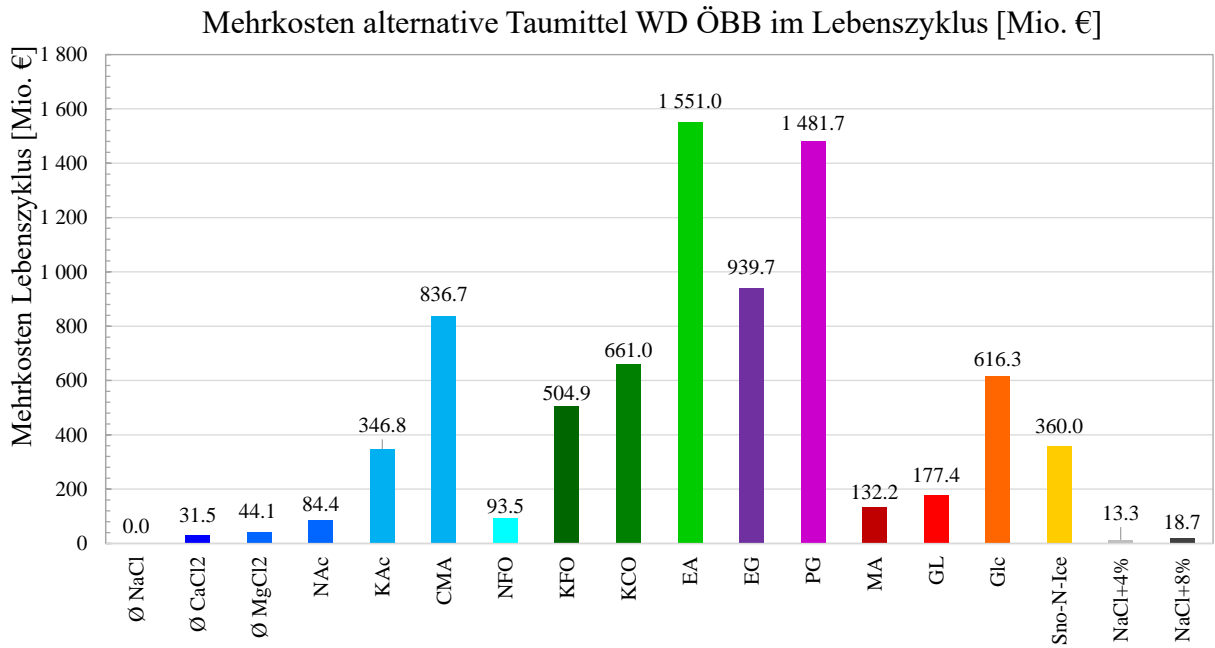


Abbildung 69: Zusammenfassung Mehrkosten alternative Taumittel WD ÖBB im Lebenszyklus [Mio. €]

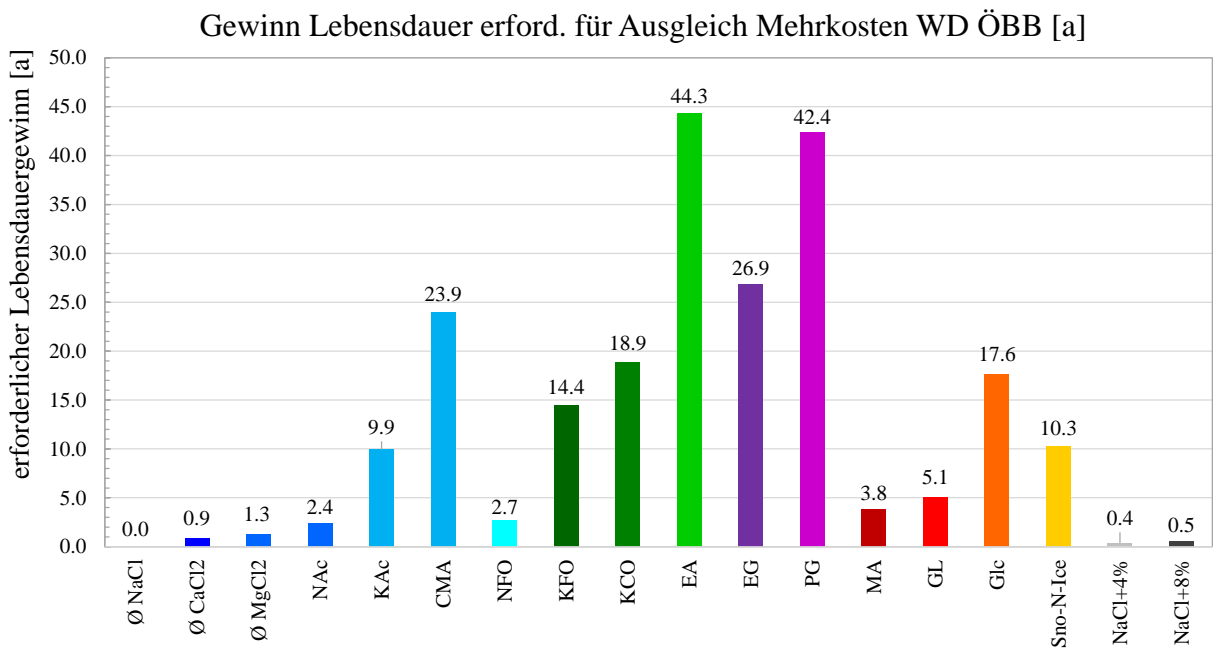


Abbildung 70: Zusammenfassung Gewinn Lebensdauer erforderlich für Ausgleich Mehrkosten WD ÖBB [a]

4 Zusammenfassung

Im Bearbeitungszeitraum des FFG-Forschungsprojektes WINTERLIFE wurden umfassende Literaturanalysen, Markanalysen und Untersuchungen zu den Eignungskriterien von auftauenden Streumitteln für den Winterdienst im Projektzeitraum von 09/2019 bis 12/2021 durchgeführt. Wie die Recherchen gezeigt haben, gibt es eine Reihe von Substanzen mit auftauender Wirkung sowie eine große Anzahl an Produkten am Markt, die im Rahmen einer Forschungsarbeit mit begrenzten Ressourcen nicht alle untersuchbar sind. Die Literatur vor allem aus dem englischsprachigen Raum zum Thema ist ebenfalls sehr umfangreich und kann in Primärliteratur mit Untersuchung einer begrenzten Anzahl and Taumitteln oder Produkten sowie Querschnittsanalysen mit meist qualitativer Beschreibung unterschieden werden. In WINTERLIFE wurde daher der Ansatz entwickelt alle Produkte nach Grundtaumittel, Zusätze und Verunreinigung zu klassifizieren. Die Analyse der Grundtaumittel bestimmt die maßgebenden Eigenschaften in Bezug auf die Eigenschaften als Taumittel, während die Zusätze spezifisch die Eigenschaften verbessern (z.B. Antibackmittel, Korrosionsinhibitoren) und die Verunreinigungen ein Qualitätsmerkmal darstellen (Rückstände). Der Vorteil dieses Ansatzes liegt vor allem darin, dass er auf Basis der dargestellten Ergebnisse im Bericht eine Ersteinschätzung jedes relevanten Produkts auf Basis seiner Komponenten und des Preises erlaubt.

Wie die Literatur sowie insbesondere die Ergebnisse der Untersuchungen in WINTERLIFE gezeigt haben, ist Natriumchlorid (NaCl) aus Sicht des Winterdienstes alleine eindeutig das wirtschaftlichste und effektivste Taumittel. Diese Einschätzung basiert auf den Ergebnissen zu Kosten und Verfügbarkeit, Lagerfähigkeit und Ausbringbarkeit, Taumittelbedarf sowie insbesondere der Kosteneffizienz bei vergleichbarer Wirkung. Wie gezeigt, liegen die Kosten bei vergleichbarer Tauwirkung für alternative Grundtaumittel wie Calciumchlorid CaCl_2 (170%), Magnesiumchlorid MgCl_2 (195%), Natriumacetat NAc (280%), Natriumformiat NFO (300%), Glycerin GL (480%), Kaliumacetat KAc (850%) und Kaliumcarbonat KCO (1500%) deutlich darüber. Die Kosten für Taumittel machen im Vergleich zu den anderen Kosten des Winterdienstes (Personal, Material & Gerät, Fremdleistung) nur einen Bruchteil der Gesamtkosten aus, da der Winterdienst um Bahnhöfe bzw. an Bahnsteigen einen hohen manuellen Aufwand erfordert. Bezogen auf einen Referenzbahnhof und einen Winter liegen die Mehrkosten für einige alternative Taumittel bei unter 10.000 €. Erfolgt hingegen eine Anwendung im Lebenszyklus über mehrere Jahrzehnte auf allen Bahnhöfen der ÖBB z.B. mit CaCl_2 (32 Mio. €), MgCl_2 (44 Mio. €), NAc (84 Mio. €), NFO (94 Mio. €), GL (177 Mio. €), KAc (347 Mio. €), KCO (661 Mio. €) sind die Mehrkosten im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren gravierend. Ein Einsatz alternativer Taumittel oder Produkte ist aus Sicht der Verfasser nur dann zu rechtfertigen, wenn diesen Mehrkosten nachweisbar Vorteile gegenüberstehen, die diese zuverlässig aufwiegen.

Wie die Recherchen, Gespräche mit dem Auftraggeber sowie die Untersuchungen gezeigt haben, sind diese möglichen Vorteile vor allem im Bereich der Korrosivität mit Folgewirkung auf die Lebensdauer der Anlagen sowie der Umweltaspekte zu finden. Für die Untersuchung der Korrosivität wurden Vernebelungsversuche (ÖNORM EN ISO 9227), Immersionsversuche (ASTM G31) sowie Tauchversuche (ÖNORM EN ISO 11130) aufgebaut und umfassend validiert. Sowohl in Bezug auf eine wirklichkeitsnahe Abbildung, als auch eine hinreichend große Korrosionswirkung und Wiederholbarkeit wurden die Tauchversuche mit 21 Tagen Versuchsdauer auf Stahlblech (ST37), verzinktem Stahlblech und Kupferblech als am geeigneten erkannt. Gegenüber den Referenzversuchen auf Stahlblech von NaCl (14,26% Masseverlust = 100%) wiesen die Grundtaumittel CaCl_2 (38%), MgCl_2 (26%), NAc (20%), NFO (42%), KAc (43%), KCO (7%) eine deutlich geringere Korrosivität auf. Auf verzinktem Stahlblech war der Korrosionsabtrag bei NaCl als Referenz deutlich geringer (2,59% Masseverlust = 100%), die alternativen Taumittel wiesen insgesamt eine erkennbar niedrigere Korrosivität auf (67% - 84%). Der Korrosionsabtrag bei Kupferblech für NaCl als Referenz (0,11% Masseverlust = 100%) war insgesamt noch deutlich geringer, hier waren jedoch CaCl_2 (211%) und MgCl_2 (309%) schlechter, während die übrigen Alternativen besser abschnitten. In Bezug auf die Grundtaumittel war damit der Nachweis erbracht, dass die Korrosivität erheblich reduziert werden kann, dafür aber nicht unerhebliche Mehrkosten in Kauf zu nehmen sind. Zudem sind nahezu alle alternativen Grundtaumittel mittel bis stark hygroskopisch, weshalb eine Trockenstreuung weitgehend ausscheidet und vor allem eine Feuchtsalz oder Solestreuung verbleibt.

Aufgrund der Ergebnisse der Markt- und Patentrecherche in WINTERLIFE ergab sich eine starke Indikation die hohe Verfügbarkeit, geringen Kosten und hohe Tauwirksamkeit von NaCl durch Zusätze in Hinblick auf die Korrosivität zu verbessern. Daher wurde ein im Handel frei verfügbares Produkt (Sno-N-Ice) basierend auf NaCl mit Zusätzen (Roter Farbstoff, Korrosionsinhibitoren, Betonschutz) sowie Verunreinigungen näher untersucht. Wie zu erwarten lag die Tauwirksamkeit aufgrund der nicht tauwirksamen Zusätze und Verunreinigungen um etwa 5-10% unter der von NaCl. Die Kosten waren jedoch erheblich höher, wodurch sich eine erheblich ungünstigere Kosteneffizienz (800-900%) auch im Vergleich zu den angeführten Grundtaumitteln ergab. Die Anwendung im Lebenszyklus über mehrere Jahrzehnte auf allen Bahnhöfen der ÖBB würde mit abgeschätzten Mehrkosten von 360 Mio. € erheblich über denen einiger Alternativen liegen, während die Korrosivität gegenüber NaCl in den Versuchen um nur knapp ein Viertel gesenkt wurde (74%). Die von diesem und anderen Herstellern in den Prospekten angegebenen Vorteile waren daher weder plausibel, noch in den Versuchen von WINTERLIFE reproduzierbar.

Aufbauend auf die Ergebnisse der Recherchen wurden daher vielversprechenden Zusatzstoffe mit Wirkung als Inhibitor in Hinblick auf ihre Eignung (Mischbarkeit, Dosierung, Wirksamkeit, Verfügbarkeit, Verträglichkeit) untersucht. Das größte Erfolgspotenzial hat sich für die Kombination von NaCl mit Korrosionsinhibitoren wie Glucose (Zucker), Natriummetasilikat, Calciumnitrit oder Mannose in einer Dosierung zwischen 4-8 Masseprozent ergeben, welche die Korrosivität auf 10-60% zu sehr moderaten Mehrkosten im Vergleich zu NaCl senken. In Hinblick auf die Kosteneffizienz ergeben sich je nach Zusatz und Dosierung Werte von 130 – 150% sowie Mehrkosten für Taumittel im Lebenszyklus von nur 15-20 Mio. €. Die einfache Herstellbarkeit und flexible Ausbringung trocken, als Feuchtsalz oder Sole bei nur geringfügig niedrigerer Tauleistung hätte zudem den Vorteil, dass sich an der üblichen Streupraxis nahezu nichts ändern würde. Weitere Vorteile für den breiteren Einsatz von NaCl+Inhibitor liegen darin, dass die Herstellung durch Lieferung durch viele Anbieter erfolgen kann, wodurch keine Abhängigkeit von Monopolanbietern (eines Produktes) entstehen und erhebliche Kostenvorteile erzielbar sind. Stellt man den Mehrkosten alternativer Grundtaumittel oder NaCl + Zusätze die Einsparungen aus einer möglichen Verlängerung der Lebensdauer betroffener Anlagen gegenüber, so reichen für die angeführten Alternativen 1-2 Jahre Gewinn an Lebensdauer für eine Amortisation jedenfalls aus. Insbesondere im Fall von NaCl mit den angeführten Zusätzen, aber auch mit den gezeigten alternativen Grundtaumitteln ist dieser Lebensdauerertrag aufgrund der erheblich reduzierten Korrosivität sehr plausibel. Am internationalen Markt sind ebenfalls eine Reihe an Produkten verfügbar, die eine geringere Korrosivität aufweisen. Die Mehrkosten bei flächendeckender Anwendung über längere Dauer sind für diese aber in der Regel erheblich und aufgrund der in WINTERLIFE untersuchten effizienteren Möglichkeiten kaum zu rechtfertigen.

Zusammenfassend hat die Entscheidung für alternative Taumittel unmittelbar erhebliche wirtschaftliche, technische, praktische und umweltrechtliche Konsequenzen, deren tatsächliche Wirkung sich oft erst nach Jahrzehnten zeigt und die in einem Forschungsprojekt kaum vollständig erfassbar sind. Auf Basis der Ergebnisse von WINTERLIFE wird daher empfohlen, die verbleibenden Alternativen an ausgewählten Bahnhöfen im Winterdienst für 1-2 Winter einzusetzen und die praktischen Implikationen (Bestellung, Handhabung, Anwendungsgrenzen) zu prüfen. Weiters werden vergleichbare Untersuchungen wie in dem Forschungsprojekt WINTERLIFE für Referenzbetone und weitere Metalle sowie Umweltuntersuchungen empfohlen, um negative Überraschungen zuverlässig auszuschließen. Bestehende Schutzrechte sind durch eine Patentrecherche bzw. Garantie des Anbieters sicherzustellen. Aufgrund des hohen Wertes der von Betonschäden und Korrosion betroffenen Anlagen der ÖBB rechnen sich die Mehrkosten der hervorgehobenen Alternativen, wenn die Lebensdauer im Schnitt auch nur 1-2 Jahre verlängert werden kann. Angesichts des gezeigten Reduktionspotenzials in der Korrosion ist das mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit erreichbar bzw. wird die Lebensdauer wahrscheinlich um ein deutlich größeres Maß verlängert werden können. Weiters ergeben sich aus der starken Beschleunigung der Korrosion bei wärmeren Temperaturen die Empfehlung die Eintragung von Taumitteln in geheizte Innenräume (Fußgeher) möglichst zu minimieren bzw. regelmäßig zu reinigen. Zudem ist es sinnvoll vor längeren Trockenperioden bzw. insbesondere am Ende des Winters alle Bereiche gründlich von Taumittelresten zu reinigen. Letztendlich liegt die Entscheidung über die Gewichtung der einzelnen Entscheidungsaspekte, die weitere Vorgehensweise in Beschaffung und Winterdienst sowie Verantwortung für die Ergebnisse beim Anwender.

5 Anhang

5.1 Literaturverzeichnis

- Achkееva, M. V., Romanyuk, N. V., Frolova, E. A., Kondakov, D. F., Khomyakov, D. M., & Danilov, V. P. (2015). Deicing properties of sodium, potassium, magnesium, and calcium chlorides, sodium formate and salt compositions on their basis. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 49(4), 481–484. doi:10.1134/s0040579515040028
- Akin M. & Shi, X. (2012); Development of Standardized Test Procedures for Evaluating Deicing Chemicals; *Journal of Testing and Evaluation* Vol. 40(6); 1015–1026 S
- Armand (1999); *Potassium Carbonate Handbook*; Handbook Armand Products Company; Princeton
- ASTM G31-72 (2004); *Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals*; ASTM International; West Conshohocken, PA; 8 S
- Aubert, S., Gout, E., Bligny, R., & Douce, R. (1994). Multiple effects of glycerol on plant cell metabolism. Phosphorus-31 nuclear magnetic resonance studies. *Journal of Biological Chemistry*, 269(34), 21420-21427.
- Badelt, H. (2015); *Qualitätssicherung für Streumaschinen und Tausalze*; Vortrag VSVI-Seminar Aktuelles aus dem Betriebsdienst; Ingelheim
- Bang, S. S., & Johnston, D. (1998). Environmental effects of sodium acetate/formate deicer, Ice Shear™. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 35, 580–587.
- Beamson, G., Briggs, D. (1992), *High Resolution XPS of Organic Polymers - The Scienta ESCA300 Database*, Wiley, 1992, Appendices 3.1 and 3.2.
- Berg, J. B. & Dannemand, M. & Kong, W. & FAN, J. (2015); Thermal Conductivity Enhancement of Sodium Acetate Trihydrate by Adding Graphite Powder and the Effect on Stability of Supercooling; Article in *Energy Procedia*; DOI: 10.1016/j.egypro.2015.02.121
- Biesinger, M.C., Lau, L.W.M., Gerson, A.R., Smart, R.St.C. (2010); *Smart, Appl. Surf. Sci.* 257 (2010) 887-898.
- Biesinger, M.C. (2017); *Surf. Interface Anal.* 49 (2017) 1325-1334.
- Biesinger, M.C., Payne, B.P., Grosvenor, A.P., Lau, L. W.M., Gerson, A.R., Smart, R.St.C. (2011); *Appl. Surf. Sci.* 257 (2011) 2717.
- Blomqvist, G. (1998). Impact of de-icing salt on roadside vegetation: A literature review.
- Brod, HG: *Langzeitwirkung von Streusalz auf die Umwelt*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V2, ISBN 3-89429-312-8, 165 pp, 1993. (In German).
- CASEY, P.C. et al. (2014); *Impacts of Using Salt and Salt Brine for Roadway De-icing*; Report, 152 pages
- Chappelow C. & McElroy A. & Blackburn R. & Darwin D. (1992); *Handbook of Test Methods for Evaluating Chemical Deicers*; Strategic Highway Research Program; vol. SHRP-H-332; Washington, DC; 283 S
- Condon, N.G., Leibsle, FM., Parker, T., Lennie, A.R., Vaughan, D.J., Thornton, G. (1997), *Phys. Rev. B* 55 (1997) 15885.
- Corsi, S. R., Geis, S. W., Loyo-Rosales, J. E., & Rice, C. P. (2006). Aquatic toxicity of nine aircraft deicer and anti-icer formulations and relative toxicity of additive package ingredients alkylphenol ethoxylates and 4, 5-methyl-1H-benzotriazoles. *Environmental science & technology*, 40(23), 7409-7415.
- Defourny, C. (2000). Environmental risk assessment of deicing salts. 8th World Salt Symposium, The Hague, Netherlands 2:767–770.
- Dhaiveegan, P. et al. (2016); Corrosion behaviour of 316L and 304 stainless steels exposed to industrial-marine-urban environment: field study, *RSC Adv.*, 6, 47314–47324. DOI: 10.1039/c6ra04015b
- D'Itri, F. M. (1992). *Chemical deicers and the environment*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Droescher, H. (2012); *The chemical system of sodium acetate / water as phase change material (PCM) for the use in seasonal energy storage*; Master Thesis TU Graz

- Dunn, S.A. & Schenk, R.U. (1976); Alternative Highway Deicing Chemicals; TRB Report 185-043
- Durth, W. & Hanke, H. (2004); Handbuch Straßenwinterdienst; ISBN-13: 978-3781216167 Kirschbaum Verlag Bonn; 380 S.
- Ebersten, R.B. (2015); Effect of Sugar as an Additive on the Longevity of Salt on Pavements; NTNU Trondheim
- Erhart, E., & Hartl, W. (2000), Effects of potassium carbonate as an alternative de-icer on ground vegetation and soil, *Ann. applied Biology*. (2000),136:281-289, <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2000.tb00036.x>
- Ezuber, HM (2009). Influence of temperature and thiosulfate on the corrosion behavior of steel in chloride solutions saturated in CO₂. *Materials & Design*, 30 (9), 3420–3427. doi: 10.1016 / j.matdes.2009.03.0.028
- Fischel, M. (2001); EVALUATION OF SELECTED DEICERS BASED ON A REVIEW OF THE LITERATURE; Report No. CDOT-DTD-R-2001-15, 168 pages.
- Fritzsche, C. J. (1992). Calcium magnesium acetate deicer: an effective alternative for salt-sensitive areas. *Water Environment and Technology WAETEJ*, 4(1), 44–51.
- FSV – Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (2010); Schneeräumung und Streuung; Qualitätssicherung Betrieb - Winterdienst – Organisation und Durchführung; 30 S
- Gerbino-Bevins, Barbara M., (2011); Performance Rating of De-icing Chemicals for Winter Operations; Civil Engineering Theses, Dissertations, and Student Research.
- Gisi, U. (1997). *Bodenökologie*. Georg Thieme Verlag.
- Gruber M. & Hofko B. & Kluger-Eigl W., Hoffmann, M. (2019); Wirkmodell Streuung, Räumung und Restsalz, Forschungsbericht im Auftrag der Länder und der ASFINAG; Wien 2019; 105 S
- Hammerstedt, R. H., & Graham, J. K. (1992). Cryopreservation of poultry sperm: the enigma of glycerol. *Cryobiology*, 29(1), 26-38.
- Hartwell, S. I., Jordahl, M. D., Evans, J. E., & May, E. B. (1995). Toxicity of aircraft deicers and antiicer solutions to aquatic organisms. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14(8), 1375–1386.
- Heimer, Y. M., 1973. The effects of NaCl, KCl and glycerol on the activity of nitrate reductase of a salt-tolerant and two non-tolerant plants. *Planta*, 113: 279–281.
- Hellsten, P. P., Kivimaki, A.-L., Miettinen, I. T., Makinen, R. P., Salminen, J. M., & Nysten, T. H. (2005). Degradation of potassium formate in the unsaturated zone of a sandy aquifer. *Journal of Environmental Quality*, 34, 1665–1671.
- Hellsten, P. P., Salminen, J. M., Jorgensen, K. S., & Nysten, T. H. (2005). Use of potassium formate in winter road deicing can reduce groundwater deterioration. *Environmental Science and Technology*, 39(13), 5095–5100.
- Hennings, E. (2014); Cryo brines - Phasengleichgewichte von Salz-Wasser-Systemen bei tiefen Temperaturen; Dissertation, TU Bergakademie Freiberg
- Hoffmann, M. (2018); Präventivstreuung - Reifglätte und Reifprognose; Beitrag FSV Schriftenreihe Heft Nr. 18: Differenzierte Feuchtsalzstreuung; Wien; 11 S
- Hoffmann, M. & Kluger-Eigl, W. & Hofko, B. & Blab, R. & Steyrer, G. & Berghold, H. & Maier-Farkas, H. & Neuhold, J. & Gattringer, J. & Nutz, P. (2018); Thawing capacity, freezing time and high shares of brine as main factors in the success of preventive winter maintenance; Peer reviewed paper XVth PIARC International Winter Road Congress, Danzig; 16 S
- Hoffmann, M. & Donev, V. & Maier-Farkas, H. & Steyrer G. & Berghold, H. & Kann, A. & Hadzimustafic, J. (2018); Implementing a dynamic winter maintenance management with real-time measurements and high-resolution weather nowcasts; Peer reviewed paper XVth PIARC International Winter Road Congress, Danzig; 14 S
- Hoffmann, M. (2017); Handbuch Winterdienst 2017 des Landes Niederösterreich zur Anwendung auf Landesstraßen B+L; Bericht im Auftrag des Amtes der NÖ Landesregierung; Wien-St. Pölten; 73 S
- Hoffmann, M. (2016); Winterdiensthandbuch 2016; Grundlagen für den Winterdienst auf Landesstraßen in Oberösterreich; Bericht im Auftrag des Amtes der NÖ Landesregierung; Wien-Linz; 136 S

- Hoffmann, M. & Donev, V. & Kann, A. & Hadzimustafic, J. & Maier-Farkas, H. & Steyrer, G. & Berghold, H. (2016); WINTERFIT II – Echtzeit - Prognosemodellen für den Winterdienst für Fahrbahntemperatur- & Reifentwicklung mit Potenzialanalyse und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung für den optimierten Winterdienst; Forschungsbericht für die ASFINAG; Wien; 187 Seiten
- Hoffmann, M. & Steininger, M & Böhmer, A. & Neuhold, J. (2015); Technische und wirtschaftliche Aspekte von Streuungen mit erhöhtem Soleanteil; Strasse und Autobahn, Nr. 9/2015; S 618 - 626
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Neuhold, J. (2014); Berechnung und Validierung von Fahrbahnzuständen im Winterdienst – Erfahrungen aus Österreich; Strasse und Autobahn, Nr. 3/2014; S190 - 198.
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Blab, R. (2014); Holistic winter maintenance model; XIVth International Winter Road Congress; Andorra la Vella, 4-7 February 2014; PIARC; Beitrag & Vortrag; ISBN 978-99920-0-773-0 Tagungsband
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Blab, R. & Kann, A. & Beck, A. & Stadlbacher, K. (2013); WinterFIT I – Anforderungen an den Wetterdienst und die Sensorik für den Winterdienst; Forschungsbericht in Kooperation mit ZAMG für die ASFINAG; Wien; 118 S
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Blab, R. (2013); Technische und wirtschaftliche Bewertung des Solestreugerätes „Stratos Combi Soliplus“; Forschungsbericht für die ASFINAG; Wien 2013; 49 S
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Blab, R. (2013); Begleitende Untersuchungen zur Einführung der Solestreueung; Forschungsbericht für das Amt der NÖ Landesregierung; Wien; 49 S
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Blab, R. (2012); Dynamic modeling of winter maintenance strategies and their impact on skid resistance; Vortrag: TRA2012 - Transport Research Arena 2012, Athen; 23.04.2012 - 26.04.2012; Procedia - Social and Behavioral Sciences / Elsevier, Volume 48 (2012), ISSN: 1877-0428; S. 682 - 691.
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Blab, R. (2012); New findings in winter maintenance and their implementation in Austria; Vortrag: SIRWEC 2012, Helsinki; 23.05.2012 - 25.05.2012; in: "SIRWEC 2012", (2012), 8 S
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Blab, R. & Neuhold, J. (2012); Strategien für einen optimierten Winterdienst in Österreich; Straße und Autobahn, Nr. 11 (2012), 11; S. 782 - 788.
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Blab, R. & Neuhold, J. (2011); Improved winter maintenance in Austria salt application recommendations for winter maintenance personal and driving recommendations for road users; Vortrag: 7th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology 2011, Bangkok; 03.08.2011 - 05.08.2011; in: "7th ICPT Proceedings", (2011), S. 805 - 818.
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Blab, R. (2011); Forschungsbericht Optimierung der Feuchtsalzstreueung; Forschungsbericht für Ämter der Landesregierungen, ASFINAG, BMVIT; 2011; 213 S.
- Hoffmann, M. & Nutz, P. & Blab, R. (2010); Handbuch Winterdienst - Hinweise für das Winterdienstpersonal zur Sicherstellung einer effektiven Salzstreueung auf Landes- und Gemeindestraßen in Österreich; Forschungsbericht für die Ämter der Landesregierungen, ASFINAG, BMVIT; 32 S.
- Hofko, B. & Steiner, D. & Hoffmann, M. & Neuhold, J. (2016); Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Winterdienst; Strasse und Autobahn, Nr. 10/2016; S789 - 796.
- Hofko, B. & Steiner, D. & Hoffmann, M. (2016); Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Winterdienst; Forschungsbericht im Auftrag der Länder und der ASFINAG; Wien 2015; 114 S
- Horner, R. R., & Brener, M. V. (1992). Environmental evaluation of calcium magnesium acetate for highway deicing applications. *Resource Conservation & Recycling*, 7, 213–237.
- Ihs A. and K. Gustafson (1997); Test and Evaluation of Calcium Magnesium Acetate-Sodium Chloride Mixtures in Sweden; Snow Removal and Ice Control Technology—Fourth International Symposium, Reno, Nevada, August 11–16, 1996, Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, 1997.
- ISO 9227 (2017); Korrosionsprüfungen in künstlichen Atmosphären – Salzsprühnebelprüfungen; ISO – International Organization for Standardization; Genf; 31 S
- ISO 11130 (2017); Korrosion von Metallen und Legierungen - Wechseltauchprüfung in Salzlösung; ISO – International Organization for Standardization; Genf; 31 S

- ISO 8407 (2021); Korrosion von Metallen und Legierungen - Entfernen von Korrosionsprodukten von Korrosionsprüfkörpern; ISO – International Organization for Standardization; Genf; 31 S
- Kawasaki, T., Akiba, T., & Moritsugu, M. (1983). Effects of high concentrations of sodium chloride and polyethylene glycol on the growth and ion absorption in plants. *Plant and Soil*, 75(1), 75–85.
- Klecka, G. M., Carpenter, C. L., & Landenberger, B. D. (1993). Biodegradation of Aircraft Deicing Fluids in Soil at Low Temperatures. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 25(3), 280–295. doi:10.1006/eesa.1993.1026
- Kluger-Eigl, W. & Hoffmann, M. & Gruber, M. (2018); Zwischenbericht Research project Streuung, Räumung und Restsalz; Beitrag FSV Schriftenreihe Heft Nr. 18: Differenzierte Feuchtsalzstreuung; Wien; 7 S
- Koefod S. & Adkin, J. & Akin M. (2012); Alternative Approaches to Measuring Ice-Melting Capacity: Optimization of Test Accuracy and Precision; Transportation Research Circular E-C126: Surface Transportation Weather and Snow Removal and Ice Control Technology; 432–442 S
- Laurinavicius, A. et al. (2016); Research of snow melting materials performance efficiency for road winter maintenance; *Transport*, 31:3, 322-332, DOI: 10.3846/16484142.2016.1211551
- LaPerriere, J. D., & Rea, C. L. (1989). Effects of calcium magnesium acetate deicer on small ponds in interior Alaska. *Lake and Reservoir Management*, 5(2), 49-57.
- Leonardi S., Flückiger, W., 1987: Die Verfrachtung salzhaltiger Verkehrsgischt entlang Autobahnen und ihre Wirkung auf exponierte Gehölze. *Straße und Verkehr* 1-87
- Ma, Z. & Bao, H. & Roskilly, A. P. (2017); Study on solidification process of sodium acetate trihydrate for seasonal solar thermal energy storage; *Solar Energy Materials and Solar Cells* 172 (2017) 99-107
- Meisel, W., Gütlich, P. (1981), *Werkstoffe und Korrosion*, Band 32, S296-301
- Melinder, A. (2007); *Thermophysical Properties of Aqueous Solutions Used as Secondary Working Fluids*; Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology
- Melinder, A. (2010); *Properties of Secondary Working Fluids for Indirect Systems: Secondary Refrigerants Or Coolants, Heat Transfer Fluids*; ISBN: 2913149766, 9782913149762 International Institute of Refrigeration (IIR); Paris
- Muthumani, A., Fay, L., Akin, M., Wang, S., Gong, J., & Shi, X. (2014). Correlating lab and field tests for evaluation of deicing and anti-icing chemicals: A review of potential approaches. *Cold Regions Science and Technology*, 97, 21–32. doi:10.1016/j.coldregions.2013.10.001
- NCHRP 577 (2007); *Guidelines for the Selection of Snow and Ice Control Materials to Mitigate Environmental Impacts*; ISBN: 978-0-309-09880-9, Levelton Consultants, National Cooperative Highway Research Program, USA
- Neuhold, J. & Hoffmann, M. & Blab, R. (2018); Implementation of winter maintenance strategies with increased shares of brine and preventive treatment in lower Austria; Peer reviewed paper XVth PIARC International Winter Road Congress, Danzig; 16 S
- Neuhold, J. & Nutz, P. & Hoffmann, M. & Blab, R. (2014); Innovative winter maintenance guidelines in Austria; XIVth International Winter Road Congress; Andorra la Vella, 4-7 February 2014; PIARC; Beitrag; ISBN 978-99920-0-773-0 Tagungsband 2014
- Nilssen, K., Klein-Paste, A., Wählin J. (2016); Accuracy of ice melting capacity tests: Review of melting data for sodium chloride; *Transportation Research Record* 2551.1 pages 1-9.
- Nutz, P. & Hoffmann, M. & Blab, R. (2018); Development of a road condition model for winter maintenance with de-icers; Peer reviewed paper XVth PIARC International Winter Road Congress, Danzig; 13 S
- Nutz, P., & Hoffmann, M. & Blab, R. (2014); New test procedures for solid and liquid deicer; XIVth International Winter Road Congress; Andorra la Vella, 4-7 February 2014; PIARC; Beitrag & Vortrag; ISBN 978-99920-0-773-0 Tagungsband 2014
- Nutz, P. & Hoffmann, M. & Blab, R. & Kann, A. & Beck, A. (2014); Sensor based adaption of treatment strategies; XIVth International Winter Road Congress; Andorra la Vella, 4-7 February 2014; PIARC; Beitrag & Vortrag; ISBN 978-99920-0-773-0 Tagungsband 2014

- Nutz, P. & Hoffmann, M. (2012); Towards real-time skid resistance forecast; Vortrag: SIRWEC 2012, Helsinki; 23.05.2012 - 25.05.2012; in: "SIRWEC 2012", (2012), 8 S
- Nutz, P. & Hoffmann, M. (2012); Optimierter Winterdienst für typische Wettersituationen; Vortrag (eingeladen) und Tagungsbandeintrag in: "Winterdienste - Herausforderungen und neue Entwicklungen", ÖWAV, (2012), ISBN: 978-3-902810-52-6; S. 60 - 71.
- Palmer, A. D. (1987); Formates as Alternative Deicers; Transportation research record 1127; USA
- Pascual, M. R. & Trambitas, D. & Calvo, E.S. & Kramer, H. & Witkamp, G. (2010); Determination of the eutectic solubility lines of the ternary system $\text{NaHCO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$; chemical engineering research and design 88 (2 0 1 0) 1365–1371
- Pecher, W. T., Al Madadha, M. E., DasSarma, P., Ekulona, F., Schott, E. J., Crowe, K., ... & DasSarma, S. (2019). Effects of road salt on microbial communities: Halophiles as biomarkers of road salt pollution. *PLoS One*, 14(9), e0221355.
- Ohly, A. (2020), Deutsches und Europäisches Patentrecht, Vorlesungsskript Ludwig Maximilians Universität, München 2020
- Roberge, P. R. et. Al. (2007): Corrosion Inspection and Monitoring; ISBN: 9780470099759 John Wiley & Sons, 2007
- Robert, R. B., De Noyelles, F.G., Locke, C. E (1992), Handbook of Test Methods for Evaluating Chemical Deicers. pages 31 - 42. 1992.
- Robidoux, P.Y., Delisle, C.E., 2001. Ecotoxicological evaluation of three deicers (NaCl, NaFo, CMA)-effect on terrestrial organisms. *Ecotox Environ Safe*. 48(2), 128-139
- Ropp, R. C. (2012). Encyclopedia of the alkaline earth compounds. Newnes.
- Scofield, J. H. (1976), *J. Electron. Spectroscop. Relat Phenom.* 8, 129
- Shirley, D.A. (1972), *Phys. Rev. B* 5, 4709 /
- Stahr, K., Ruck, A., & Jahn, R. (1996). Bestimmung der Wasserversorgung arider Oekosysteme mit einfachen Methoden. *Verhandlungen-Gesellschaft für Ökologie*, 25, 339-348.
- Tang, Y., Qin, H. Wu, K., Guo, Q. Guo, J. (2013), *Surf. Science* 609 (2013), 67-72.
- Tanuma, S., Powell, C.J., Penn, D.R. (1993), *Surf. Interf. Anal.* 21, 165 (1993).
- Thomsen, K. (2005); Modeling electrolyte solutions with the extended universal quasichemical (UNIQUAC) model; *Pure Appl. Chem.*, Vol. 77, No. 3, pp. 531–542, 2005. DOI: 10.1351/pac200577030531
- Toscano, G. P. & Colarieti, M. L. & Greco, G. (2012); Biodegradation of Aircraft Deicing Fluids in Soil Slurries; *Chemical Engineering Transactions*; DOI: 10.3303/CET1228001
- Tougaard, S. (1997), *Surf. Interf. Anal.* 25, 137
- TRB, (1991). Highway deicing, comparing salt and calcium magnesium acetate, Special Report 235, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC
- Wagner, C.D., Naumkin, A.V., Kraut-Vass, A., Allison, J.W., Powell, C.J., Rumble, J. R., NIST Standard Reference Database 20, Version 3.4 (web version) (<http://srdata.nist.gov/xps/>) 2003
- Wählin, J., Fjærestad, J. S., Thomsen, K., Klein-Paste, A. (2017), Thermodynamics of deicing chemicals; Conference Paper
- Yeh, J. J., Lindau, I. (1985), *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 32, 1 (1985).

5.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Gegenüberstellung Splittstreuung (Weißräumung) VS Salzstreuung (Schwarzräumung)	14
Abbildung 2:	Ausgewählte Impressionen aus der Winterdienstpraxis der ÖBB (Quelle: ÖBB, Maschinenring)	15
Abbildung 3:	Struktur der verwendeten Nutzwertanalyse für die Vorauswahl von Grundtaumitteln und Produkten für weitere Untersuchungen	16
Abbildung 4:	Kriterien Gefrierkurve, Tauleistung, Rieselfähigkeit Reinheit, Kosten, Effizienz, Korrosivität, LCC	18
Abbildung 5:	Nutzwertanalyse Teil 1 – Anorganische Salze (NaCl, CaCl ₂ , MgCl ₂ , LiCl)	23
Abbildung 6:	Nutzwertanalyse Teil 2 – Organische Salze (Azetate = NAc, KAc, CMA; Formiate = NFO, KFO)	24
Abbildung 7:	Nutzwertanalyse Teil 3 – Alkohole, Diole, Polyole (EA, EG, PG, MA, GL)	25
Abbildung 8:	Nutzwertanalyse Teil 4 – (An-)Organische & sonstige Produkte (NH ₃ , Glc, KCO, Produkt, offen)	26
Abbildung 9:	Ergebnisse Marktuntersuchung auftauende Streumittel – Auswahl erhältliche Produkte	28
Abbildung 10:	Übersicht ausgewählte Patente aus der Recherche zu Taumitteln, Produkten und Inhibitoren	29
Abbildung 11:	Beispiel chemische Analyse eines Produktes (Sno-N-Ice) im Vergleich zu NaCl	31
Abbildung 12:	Impressionen Produktion, Lieferung und Lagerung von Taumitteln (Quellen: Diverse)	32
Abbildung 13:	Prüfung der Rieselfähigkeit mit der Auslaufbox nach Sonntag und Einfluss des Feuchtegehaltes	33
Abbildung 14:	Optischer Vergleich verschiedener Taumittel nach längerer Lagerung an der Luft	35
Abbildung 15:	Auswahl von (Klein-)Geräten zur Räumung und Streuung im Winterdienst	37
Abbildung 16:	Gefrierkurve einer idealen Lösung im Vergleich zu den Gefrierkurven realer Taumittel in Wasser (NaCl, MgCl ₂ , CaCl ₂ , CH ₄ N ₂ O, KFO, KAc)	38
Abbildung 17:	Empirische Gefrierkurven von Taumitteln nach Konzentration aus vorhergehenden Untersuchungen der TU Wien (NaCl, MgCl ₂ , CaCl ₂)	39
Abbildung 18:	Konsolidierte Gefrierkurven ausgewählter Taumittel nach Konzentration in WINTERLIFE auf Basis umfangreicher Recherchen und empirischer Gefrierversuche (Sno-N-Ice ~ NaCl, Inhibitor #1 = Glucose)	40
Abbildung 19:	Mindestmenge Taumittel [g] für das Tauen von 1 kg Schnee/Eis bei -2,5°C auf Basis der Gefrierkurven (Taufvorgang bis zur Gleichgewichtskonzentration mit Umgebungstemperatur)	40
Abbildung 20:	Mindestmenge Taumittel [g] für das Tauen von 1 kg Schnee/Eis bei -5,0°C auf Basis der Gefrierkurven (Taufvorgang bis zur Gleichgewichtskonzentration mit Umgebungstemperatur)	41
Abbildung 21:	Mindestmenge Taumittel [g] für das Tauen von 1 kg Schnee/Eis bei -7,5°C auf Basis der Gefrierkurven (Taufvorgang bis zur Gleichgewichtskonzentration mit Umgebungstemperatur)	41
Abbildung 22:	Mindestmenge Taumittel [g] für das Tauen von 1 kg Schnee/Eis bei -10,0°C auf Basis der Gefrierkurven (Taufvorgang bis zur Gleichgewichtskonzentration mit Umgebungstemperatur)	42
Abbildung 23:	Einheitskosten der Taumittel [€/t] auf Basis der Marktuntersuchung zu Preisen 2020 – 2021 für hinreichend große Beschaffungsmengen auf dem internationalen Markt (nationale Preise können abweichen)	42
Abbildung 24:	Relative Kostenzunahme für Taumittel im Vergleich zu NaCl unter Berücksichtigung der Mindestmenge Taumittel und der Einheitskosten bei einer Referenztemperatur von -2,5°C	43
Abbildung 25:	Relative Kostenzunahme für Taumittel im Vergleich zu NaCl unter Berücksichtigung der Mindestmenge Taumittel und der Einheitskosten bei einer Referenztemperatur von -5,0°C	43
Abbildung 26:	Relative Kostenzunahme für Taumittel im Vergleich zu NaCl unter Berücksichtigung der Mindestmenge Taumittel und der Einheitskosten bei einer Referenztemperatur von -7,5°C	44
Abbildung 27:	Relative Kostenzunahme für Taumittel im Vergleich zu NaCl unter Berücksichtigung der Mindestmenge Taumittel und der Einheitskosten bei einer Referenztemperatur von -10,0°C	44
Abbildung 28:	Vergleich der Tauleistung ausgewählter Taumittel nach Einwirkdauer bei -5,0°C	46
Abbildung 29:	Generalisiertes Tauleistungsmodell für Natriumchlorid über einen Temperaturbereich von -21°C bis +5°C und einer Einwirkdauer von 0 bis 300 Minuten	47
Abbildung 30:	Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Tauleistung auf Eisplatte und mit Poxic für NaCl bei -5°C	48
Abbildung 31:	Darstellung des Poxic-Kryostat-Versuchs. A: Die Reaktionsplatte (in grün) wird in einem Kryostat ministat 240 der Firma Huber fixiert. Alle 35 Löcher der Platte sind mit einem definierten Volumen an Eis gefüllt und	

	mit Parafilm® abgedeckt. B: Vergrößerte Darstellung der Reaktionsplatte im Kryostaten von der Vogelperspektive. C: Schmelzvorgang nach Zugaben von Taumittel. D: Der Schmelzvorgang wird mit einer Kamera (CANON EOS 2000d) im Minutentakt verfolgt.	49
Abbildung 32:	Darstellung Tauraten auf Basis der Poxic-Kryostat-Versuche von festem (a) NaCl, (b) CaCl ₂ ·2 H ₂ O, (c) MgCl ₂ ·6 H ₂ O, (d) NaAc, (e) KAc, (f) NFO, (g) KFO, (h) KCO und (i) Sno-N-Ice bei einer Temperatur von -5°C. Die Tauleistungsdaten wurden mit einer Fitfunktion des Typs $yt = a \cdot (1 - bx)$ angepasst.	50
Abbildung 33:	Einfluss umweltverträglicher Inhibitoren auf die Taurate von NaCl bei -5,0°C. Reines NaCl (schwarz); NaCl+8 m% Glucose (rot), NaCl+8 m% Arabinose (blau), NaCl+8 m% Mannose (grün) und NaCl+8 m% Maltose (violett).	51
Abbildung 34:	Chemischer Korrosionsprozess von Stahl ohne/mit Taumittelangriff	52
Abbildung 35:	Freie Bildungsenthalpien von Eisen-Korrosionsprodukten, bezogen auf alpha-Fe ₂ O ₃	53
Abbildung 36:	Übersicht ausgewählte Klassen von Inhibitoren und Stoffen zur Reduktion der Korrosivität	54
Abbildung 37:	Entwickeltes Prüfgerät für Salzsprühnebeltest in WINTERLIFE	58
Abbildung 38:	Entwickeltes Prüfschema Immersionstests in WINTERLIFE	59
Abbildung 39:	Entwickeltes Prüfgerät für die Wechselltauchprüfung in WINTERLIFE - Frontansicht	60
Abbildung 40:	Entwickeltes Prüfgerät für die Wechselltauchprüfung in WINTERLIFE - Frontansicht	60
Abbildung 41:	Reinigung der Proben im Ultraschallbad zur Bestimmung des Gewichtsverlustes	61
Abbildung 42:	Vergleich der Korrosionsprüfmethoden (5 % NaCl-Lösung auf Fe)	63
Abbildung 43:	Drei Wechselltauchprüfungsstände (WT) im Klimacontainer (CT) von WINTERLIFE	63
Abbildung 44:	Relativer Vergleich der Korrosionsprüfmethoden (im Vergleich zur Referenz im Klimacontainer)	63
Abbildung 45:	Schematische Erklärung der Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie mit einem Beispielspektrum (Foto: Uni Wien, Fakultät f. Physik)	64
Abbildung 46:	Fotographische Abbildungen des XPS-Gerätes der TU Wien im Analytical Instrumentation Centre: Links: Halbkugelanalysator, Mitte: Probenschleuse, Rechts: Blick auf die eingeschleusten Proben	65
Abbildung 47:	Schematische Darstellung des Prinzips der Röntgen-Pulver-Diffraktion	68
Abbildung 48:	Prozentuelle Phasenzusammensetzung der Korrosionsprodukte ausgewählter Taumittel, die von der Oberfläche der korrodierten Proben mittels Ultraschalles entfernt wurden	68
Abbildung 49:	Lasertexturmessungen für eine korrodierte Eisenplatte (10x15cm). Der Messbereich betrug 1x4cm. Die Messposition wurde jeweils in der Mitte der Platte gewählt.	69
Abbildung 50:	Massenverlust der untersuchten 5 % Taumittelösungen (Grundtaumittel) auf Stahl	70
Abbildung 51:	Auf Mittelwert (14,26 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust	70
Abbildung 52:	Massenverlust der 5% NaCl-Lösung mit den untersuchten Inhibitoren auf Stahl	71
Abbildung 53:	Auf Mittelwert (14,26 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust auf Stahl	71
Abbildung 54:	Massenverlust ausgewählter Taumittel auf verzinkten Stahl Fe(Zn) und Kupfer Cu	72
Abbildung 55:	Auf Mittelwert (2,59 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust auf Fe(Zn)	72
Abbildung 56:	Auf Mittelwert (0,09 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust auf Cu	73
Abbildung 57:	Massenverlust ausgewählter Inhibitoren auf verzinkten Stahl Fe(Zn) und Kupfer Cu	73
Abbildung 58:	Auf Mittelwert (2,59 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust auf Fe(Zn)	74
Abbildung 59:	Auf Mittelwert (0,09 M%) der NaCl-Referenzlösung bezogener Massenverlust auf Cu	74
Abbildung 60:	Grundlagen, Annahmen und Lebenszyklusanalyse Taumittelverbrauch und Korrosionswirkung auf einem Referenzbahnhof mit Abschätzung erforderlicher Gewinn Lebensdauer für Amortisation Taumittelalternative	84
Abbildung 61:	Grundlagen, Annahmen und Lebenszyklusanalyse Taumittelverbrauch und Korrosionswirkung für die ÖBB-INFRA mit Abschätzung erforderlicher Gewinn Lebensdauer für Amortisation Taumittelalternative	85
Abbildung 62:	Zusammenfassung der Lebenszyklusanalyse mit Abschätzung Taumittelverbrauch, Mehrkosten mit sowie Abschätzung des erforderlichen Gewinns an Lebensdauer infolge reduzierter Korrosion mit alternativen Taumitteln für eine Amortisation für den Referenzbahnhof und die ÖBB-INFRA	87

Abbildung 63:	Zusammenfassung Ergebnisse mittlerer Taumittelbedarf Referenzbahnhof für einen Ø Winter [t]	88
Abbildung 64:	Mittlere Taumittelkosten Referenzbahnhof für einen Ø Winter [1.000 €]	88
Abbildung 65:	Zusammenfassung mittlerer Taumittelbedarf Winterdienst ÖBB für einen Ø Winter [1.000 t]	89
Abbildung 66:	Zusammenfassung mittlere Taumittelkosten Winterdienst ÖBB für einen Ø Winter [Mio. €]	89
Abbildung 67:	Zusammenfassung Mehrkosten alternative Taumittel WD Bahnhof im Lebenszyklus [Mio. €]	90
Abbildung 68:	Zusammenfassung Gewinn Lebensdauer erforderlich für Ausgleich Mehrkosten WD Bahnhof [a]	90
Abbildung 69:	Zusammenfassung Mehrkosten alternative Taumittel WD ÖBB im Lebenszyklus [Mio. €]	91
Abbildung 70:	Zusammenfassung Gewinn Lebensdauer erforderlich für Ausgleich Mehrkosten WD ÖBB [a]	91
Abbildung 71:	XPS survey spectra of all Cu sample positions. The regions used for quantification are shown in green as stated above in accordance with the data in the attached Excel sheet. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 100eV, Step: 0.5eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 10)	107
Abbildung 72:	XPS survey spectra of all Fe sample positions. The regions used for quantification are shown in green as stated above in accordance with the data in the attached Excel sheet. All spectra have been normalized to their strongest signals. (PE: 100eV, Step: 0.5eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 10)	107
Abbildung 73:	XPS survey spectra of all FeZn sample positions. The regions used for quantification are shown in green as stated above in accordance with the data in the attached Excel sheet. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 100eV, Step: 0.5eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 10)	108
Abbildung 74:	Cu2p(a) and CuLMM (b) detail XP spectra of all Cu sample positions. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.05eV/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 50/100)	108
Abbildung 75:	C1s (a) and O1s (b) detail XP spectra of all Cu sample positions. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 30/30)	109
Abbildung 76:	Wagner plot showing the Cu 2p3/2 binding energy and the Cu LMM Auger kinetic energy of all Cu samples compared to literature values. (PE: 30eV, Step: 0.05eV, Dwell: 0.05/0.1s, Scan-n°: 50/100)	109
Abbildung 77:	Fe 2p (a) and O1s (b) detail XP spectra of all Fe sample positions. All spectra have been normalized to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.05/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 100/30)	110
Abbildung 78:	Fe 2p (a) and O1s (b) detail XP spectra of all FeZn sample positions. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.05/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 100/30)	110
Abbildung 79:	Zn2p (a) and ZnLMM (b) detail XP spectra of all FeZn sample positions. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.05/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 50/100)	111
Abbildung 80:	Wagner plot showing the Zn 2p3/2 binding energy and the Zn LMM Auger kinetic energy of all FeZn samples compared to literature values. (PE: 30eV, Step: 0.05/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 50/100)	111
Abbildung 81:	All measurement positions on the Cu, Fe and FeZn samples	112
Abbildung 82:	XPS survey spectra of all Fe sample positions after annealing at 415°C for 1h. The regions used for quantification are shown in green as stated above in accordance with the data in the attached Excel sheet. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 100eV, Step: 0.5eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 10)	112
Abbildung 83:	Fe 2p (a) and O1s (b) detail XP spectra of all Fe sample positions after annealing at 415°C for 1h. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.05/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 100/50)	113
Abbildung 84:	Optischer Vergleich der Korrosionsprüfmethoden (5 % NaCl-Lösung auf Fe)	114
Abbildung 85:	Optischer Vergleich der Grundtaumittel auf Stahl (Fe)	120
Abbildung 86:	Optischer Vergleich der zu NaCl gemischten inhibierenden Taumittel auf Fe	120
Abbildung 87:	Optischer Vergleich der Inhibitoren auf Stahl (Fe)	123
Abbildung 88:	Optischer Vergleich der Grundtaumittel bzw. NaCl + Inhibitoren auf Fe(Zn)	126
Abbildung 89:	Optischer Vergleich der Grundtaumittel auf Cu	127
Abbildung 90:	Optischer Vergleich der Inhibitoren auf Cu	128

5.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Rieselfähigkeiten ausgewählter Taumittel	34
Tabelle 2:	Prüfprogramm der Tauleistung für eine Referenztemperatur von -5°C	46
Tabelle 3:	Prüfprogramm Tauleistung POXIC mit Vergleich der Tauraten der untersuchten Taumittel bei -5°C nach 30, 60 bzw. 100 min.	50
Tabelle 4:	Löslichkeit von ausgewählten Inhibitoren bei Raumtemperatur [g/100g]	55
Tabelle 5:	In WINTERLIFE mit Korrosionsversuchen getestete Grundtaumittel	56
Tabelle 6:	In WINTERLIFE mit Korrosionsversuchen getestete Grundtaumittel + Inhibitoren	57
Tabelle 7:	Rahmenbedingungen der Methoden zur Prüfung der Korrosivität	62
Tabelle 8:	Massenverlust und Oberflächenrauigkeit für Eisenbleche, die mit verschiedenen Taumitteln und einen Inhibitor (8% Glukose) bewettet wurden.	69

5.4 Publikationen und Papers

Hoffmann, M. et al. (2022); WINTERLIFE – Effective, sustainable and non-corrosive de-icing agents in winter maintenance, accepted paper PIARC Conference, Calgary 2022

Gruber, M. et al. (2022); WINTERLIFE – Minimizing Corrosion effects of de-icing agents in winter maintenance, accepted paper PIARC Conference, Calgary 2022

Hoffmann, M. & Gruber, M. et al. (2021); Forschungsprojekt WINTERLIFE – Tauwirksame, korrosionsarme und effiziente Streumittel; ASTRAD Konferenz, Wels 09/2021

Hoffmann, M., Gruber, M., Leubolt, J., Grothe, H. Koyun, A. N., Seifried, T., Stinglmayr, D., Hofko, B. (2021), WINTERLIFE - WINTERdienst mit effektiven, nachhaltigen und nicht aggressiven Taumitteln sowie optimalen LIFE Cycle Costs der Bahn; Endbericht VIF2018-Verkehrsinfrastrukturforschung, Wien

Weitere Veröffentlichungen in Journalen mit Peer-Review sind in Planung nach Projektabschluss

5.5 Daten und Materialien

5.5.1 Sicherheitsdatenblätter

Taumittel/Zusatz	Gefahrenbeurteilung	Quelle
Natriumchlorid	DNEL 2.069 mg/m ³ Mensch, inhalativ Arbeitnehmer (Industrie) chronisch - systemische Wirkungen. DNEL 2.069 mg/m ³ Mensch, inhalativ Arbeitnehmer (Industrie) akut - systemische Wirkungen. DNEL 295,5 mg/kg KG/Tag Mensch, dermal Arbeitnehmer (Industrie) chronisch - systemische Wirkungen DNEL 295,5 mg/kg KG/Tag Mensch, dermal Arbeitnehmer (Industrie) akut - systemische Wirkungen. Ist nicht als akut toxisch einzustufen. Toxizität: Oral LD50 3.000 mg/kg Ratte; dermal LD50 >10.000 mg/kg Kaninchen.	Freiwillige Sicherheitsinformation in Anlehnung an das Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Natriumchlorid ≥99,5 %, p.a., ACS, ISO Artikelnummer: 3957 Version: 2.0 de Ersetzt Fassung vom: 03.02.2021
Calciumdichlorid	Schwere Augenschädigung/Augenreizung Kategorie 2 H319; GHS07; Ist nicht als akut toxisch einzustufen. Toxizität: Oral LD50 2.120 mg/kg Ratte ECHA dermal LD50 >5.000 mg/kg Kaninchen	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Calciumchlorid ≥94 %, entwässert Artikelnummer: A119 Version: 4.1 de Ersetzt Fassung vom: 22.05.2020
Magnesiumchlorid	Symptome im Zusammenhang mit den physikalischen, chemischen und toxikologischen Eigenschaften: Bei Einatmen verursacht leichte bis mäßige Reizwirkung. Wichtigste akute und verzögert auftretende Symptome und Wirkungen: Reizende Wirkungen, Übelkeit, Erbrechen, Herzrhythmusstörungen, Kreislaufkollaps, Atembeschwerden, Durchfall. Gefährliche Verbrennungsprodukte: Im Brandfall können entstehen: Chlorwasserstoff (HCl) ist nicht als akut toxisch einzustufen. Toxizität: Oral LD50 2.800 mg/kg Ratte dermal LD50 >2.000 mg/kg Ratte	Freiwillige Sicherheitsinformation in Anlehnung an das Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Magnesiumchlorid ≥ 98,5%, wasserfrei Artikelnummer: KK36 Version: 2.0 de Ersetzt Fassung
Lithiumchlorid	Akute Toxizität (oral) Kategorie 4 H302 Ätz-/Reizwirkung auf die Haut Kategorie 2 H315. Schwere Augenschädigung/Augenreizung Kategorie 2 H319; GHS07. Akute Toxizität: Gesundheitsschädlich bei Verschlucken. Toxizität: Oral LD50 526 mg/kg Ratte	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Lithiumchlorid ≥99 %, p.a., Ultra-Qualität Artikelnummer: 3739 Version: 3.0 de Ersetzt Fassung vom: 16.03.2018
Natriumacetat	Ist nicht als akut toxisch einzustufen. Toxizität:oral LD50 2.700 mg/kg Ratte; inhalativ: Staub/ Nebel LC50 >5,6 mg/l /4h Ratte; dermal LD50 >20.000 mg/kg Kaninchen.	Sicherheitsinformation in Anlehnung an das Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Natriumacetat ≥ 98,5%, wasserfrei, reinst Artikelnummer: X891 Version: 4.0 de Ersetzt Fassung vom: 08.07.2019 Version: (3)
Kaliumacetat	Für die menschliche Gesundheit maßgebliche Werte Relevante DNEL- und andere Schwellenwerte Endpunkt Schwellenwert Schutzziel, Expositionsweg Verwendung in Expositionsdauer. DNEL 1.266 mg/m ³ Mensch, inhalativ Arbeitnehmer (Industrie) chronisch - systemische Wirkungen. DNEL 1.266 mg/m ³ Mensch, inhalativ Arbeitnehmer (Industrie) akut - systemische Wirkungen. DNEL 14,36 mg/kg KG/Tag Mensch, dermal Arbeitnehmer (Industrie) chronisch - systemische Wirkungen. DNEL 86,14 mg/kg KG/Tag Mensch, dermal Arbeitnehmer (Industrie) akut - systemische Wirkungen	Freiwillige Sicherheitsinformation in Anlehnung an das Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Kaliumacetat ≥99 %, p.a. Artikelnummer: T874 Version: 1.1 de Ersetzt Fassung vom: 31.05.2016
Natriummetasilikat Pentahydrat	GHS05, GHS07. H314 Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden (Kategorie 1B). H335 Kann die Atemwege reizen. Spezifische Zielorgan-Toxizität - einmalige Exposition (Reizung der Atemwege) (Kategorie 3)	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH)

Taumittel/Zusatz	Gefahrenbeurteilung	Quelle
Calciumnitrit und Calciumnitrat	GHS03 (brandfördernd), GHS06 (giftig), GHS07 (gesundheitsschädlich). H272 Kann Brand verstärken; Oxidationsmittel. H302 Gesundheitsschädlich bei Verschlucken. H318 Verursacht schwere Augenschäden. Für Nitrite/Nitrate allgemein gilt: Nach Resorption großer Mengen Methämoglobinämie.	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006
Kalziummagnesiumacetat	Das Produkt ist nicht akut toxisch. Besondere Eigenschaften: Reizung von Haut, Augen und Atemwegen. Toxizität: LC50 Inhalation Rat > 4600 mg/m ³ (Exposure time: 4 h)	EG-Sicherheitsdatenblatt (1907/2006/EG) ICE & DUST-AWAY Taumittel auf Basis einer Calcium-Magnesium-Acetat Lösung. Handelsname ICE & DUST-AWAY REACH Registrierung Zubereitung gemäß REACH-Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 Verwendung Taumittel auf Basis einer Calciummagnesiumacetat Lösung.
Natriumformiat	Verwendungen, von denen abgeraten wird: Nicht für Produkte verwenden, die für Kontakt mit Lebensmitteln bestimmt sind. Nicht für private Zwecke (Haushalt) verwenden. DNEL. 35,26 mg/m ³ Mensch, inhalativ Arbeitnehmer (Industrie) chronisch - systemische Wirkungen. DNEL 10 mg/kg KG/ Tag Mensch, dermal Arbeitnehmer (Industrie) chronisch - systemische Wirkungen. Ist nicht als akut toxisch einzustufen. Toxizität: dermal LD50 >2.000 mg/kg Ratte	Freiwillige Sicherheitsinformation in Anlehnung an das Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Natriumformiat ≥99 %, p.a., ACS Artikelnummer: 4404 Version: 4.0 de Ersetzt Fassung vom: 10.02.2020
Kaliumformiat	Wichtigste akute und verzögert auftretende Symptome und Wirkungen: Reizende Wirkungen. Ist nicht als akut toxisch einzustufen. Oral LD50 5.500 mg/kg Maus.	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), geändert mit 2015/830/EU Kaliumformiat ≥ 98%, zur Synthese Artikelnummer: 0980
Ethylalkohol	Entzündbare Flüssigkeiten Kategorie 2 H225, Schwere Augenschädigung/Augenreizung Kategorie 2 H319, GHS02, GHS07; Wichtigste akute und verzögert auftretende Symptome und Wirkungen: Reizung, Übelkeit, Erbrechen, Bauchschmerzen, Atembeschwerden, Schwindel, Schläfrigkeit, Narkosewirkung, Verlust des Stellreflexes und Ataxie (Störungen Koordination)	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Ethanol 96%, Ph.Eur., reinst Artikelnummer: P075 Version: 6.0 de Ersetzt Fassung vom: 11.03.2021
Ethylenglykol	Akute Toxizität (oral) (Kategorie 4) H302, spezifische Zielorgan-Toxizität (wiederholte Exposition) (Kategorie STOT RE 2) H373, GHS07, GHS08; Beim Verschlucken dämpft Ethylenglykol das zentrale Nervensystem und kann schon in kleinen Mengen für den Menschen tödlich sein.	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), geändert mit 2015/830/EU Ethylenglykol ≥ 99%, zur Synthese Artikelnummer: 9516 Version: 4.0 de Ersetzt Fassung vom: 10.08.2018
Propylenglykol	Für die menschliche Gesundheit maßgebliche Werte: DNEL 98 mg/m ³ Mensch, inhalativ Arbeitnehmer (Industrie) chronisch - systemische Wirkungen. DNEL 13,9 mg/kg KG/ Tag Mensch, dermal Arbeitnehmer (Industrie) chronisch - systemische Wirkungen. Reaktivität Bei Erwärmung: Dämpfe können mit Luft explosionsfähige Gemische bilden. Toxizität: Oral LD50 >2.000 mg/kg Ratte. Dermal LD50 >2.000 mg/kg Kaninchen	Freiwillige Sicherheitsinformation in Anlehnung an das Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Polypropylenglykol 2000, für die Biochemie Artikelnummer: 3611
Kaliumcarbonat	GHS07 Ätz-/Reizwirkung auf die Haut (Kategorie 2) H315. Schwere Augenschädigung/Augenreizung (Kategorie 2) H319 Spezifische Zielorgan-Toxizität - einmalige Exposition (Reizung der Atemwege) (Kategorie 3) H335	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Kaliumcarbonat ≥98 % Artikelnummer: 7956

Taumittel/Zusatz	Gefahrenbeurteilung	Quelle
Glyzerin	Wichtigste akute und verzögert auftretende Symptome und Wirkungen: Benommenheit, Kopfschmerzen, Magen-Darm-Beschwerden, Durchfall, Erbrechen. Besondere vom Stoff oder Gemisch ausgehende Gefahren Brennbar. Dämpfe sind schwerer als Luft, breiten sich am Boden aus und bilden mit Luft ein explosionsfähiges Gemisch. Ist nicht als akut toxisch einzustufen. Dermal LD50 >10.000 mg/kg Kaninchen. Toxizität: Oral LD50 12.600 mg/kg Ratte. Symptome im Zusammenhang mit den physikalischen, chemischen und toxikologischen Eigenschaften. Bei Verschlucken Durchfall, Erbrechen, Magen-Darm-Beschwerden. Bei Kontakt mit den Augen leicht reizend, aber nicht einstufigsrelevant. Bei Einatmen Benommenheit, Kopfschmerzen, leicht reizend, aber nicht einstufigsrelevant. Bei Berührung mit der Haut - Häufiger und andauernder Hautkontakt kann zu Hautreizungen führen.	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) Glycerin ROTIPURAN® ≥99,5 %, p.a., wasserfrei Artikelnummer: 3783 Version: 4.0 de Ersetzt Fassung vom: 25.04.2019
Glucose	Angaben zu den Gefahrenklassen im Sinne der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 Einstufung gemäß GHS (1272/2008/EG, CLP) Dieser Stoff erfüllt nicht die Kriterien für die Einstufung gemäß der Verordnung Nr. 1272/2008/EG. Ist nicht als akut toxisch einzustufen. Toxizität: LD50 oral: 25.800 mg/kg für Ratten. Es liegen keine weiteren gesundheitlichen Bedenken für Menschen vor.	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) D(+)-Glucose CELLPURE® ≥ 98% wasserfrei Artikelnummer: HN06 Version: 4.0 de Ersetzt Fassung vom: 20.11.2019 Version: (3)
Mannose	Es liegen keine weiteren gesundheitlichen Bedenken für Menschen vor. Ist nicht als akut toxisch einzustufen.	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), geändert mit 2015/830/EU D(+)-Mannose ≥99,5 %, für die Biochemie Artikelnummer: 4220 Version: 2.0 de Ersetzt Fassung vom: 06.07.2015 Version: (1.0)
Maltose	Grenzwerte für die berufsbedingte Exposition (Arbeitsplatzgrenzwerte):DE Staub AGW 10 SMW [mg/m³] 20 KZW [mg/m³]	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH), geändert mit 2015/830/EU D(+)-Maltose Monohydrat ≥95 %, für die Biochemie Artikelnummer: 8951 Version: 1.1 de Ersetzt Fassung vom: 06.07.2015
Arabinose	Grenzwerte für die berufsbedingte Exposition (Arbeitsplatzgrenzwerte in DE): Allgemeiner Staubgrenzwert, Alveolengängige Fraktion 1,25 SMW [mg/m³] 2,5 KZW [mg/m³]. Allgemeiner Staubgrenzwert, Einatembare Fraktion 10 SMW [mg/m³] 20 KZW [mg/m³]. KZW Kurzzeitwert (Grenzwert für Kurzzeiteexposition): Grenzwert der nicht überschritten werden soll, auf eine Dauer von 15 Minuten bezogen (soweit nicht anders angegeben). Schichtmittelwert (SMW) (Grenzwert für Langzeiteexposition): Zeitlich gewichteter Mittelwert, gemessen oder berechnet für einen Bezugszeitraum von acht Stunden (soweit nicht anders angegeben). Ist nicht als akut toxisch einzustufen. Toxizität: Oral LD50 >2.000 mg/kg Ratte	Sicherheitsdatenblatt gemäß Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 (REACH) L(+)-Arabinose ≥99 %, für die Biochemie Artikelnummer: 5118 Version: 2.0 de Ersetzt Fassung vom: 11.05.2017

5.5.2 XPS – Untersuchungen

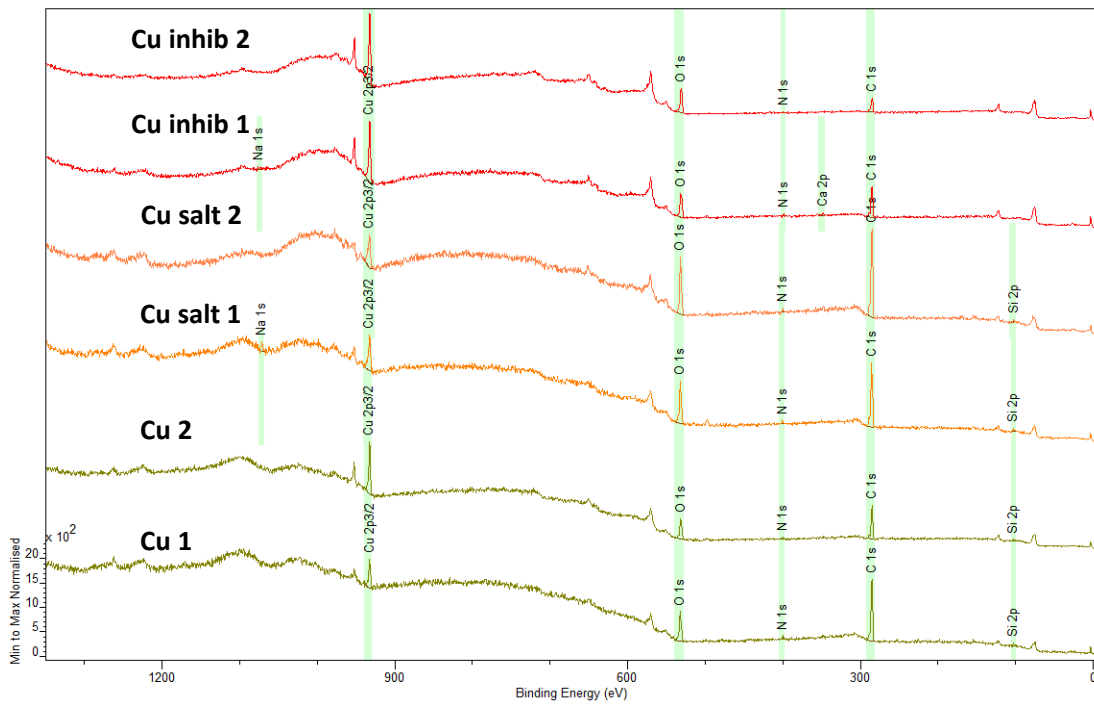


Abbildung 71: XPS survey spectra of all Cu sample positions. The regions used for quantification are shown in green as stated above in accordance with the data in the attached Excel sheet. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 100eV, Step: 0.5eV, Dwell: 0.1s, Scan-n^o: 10)

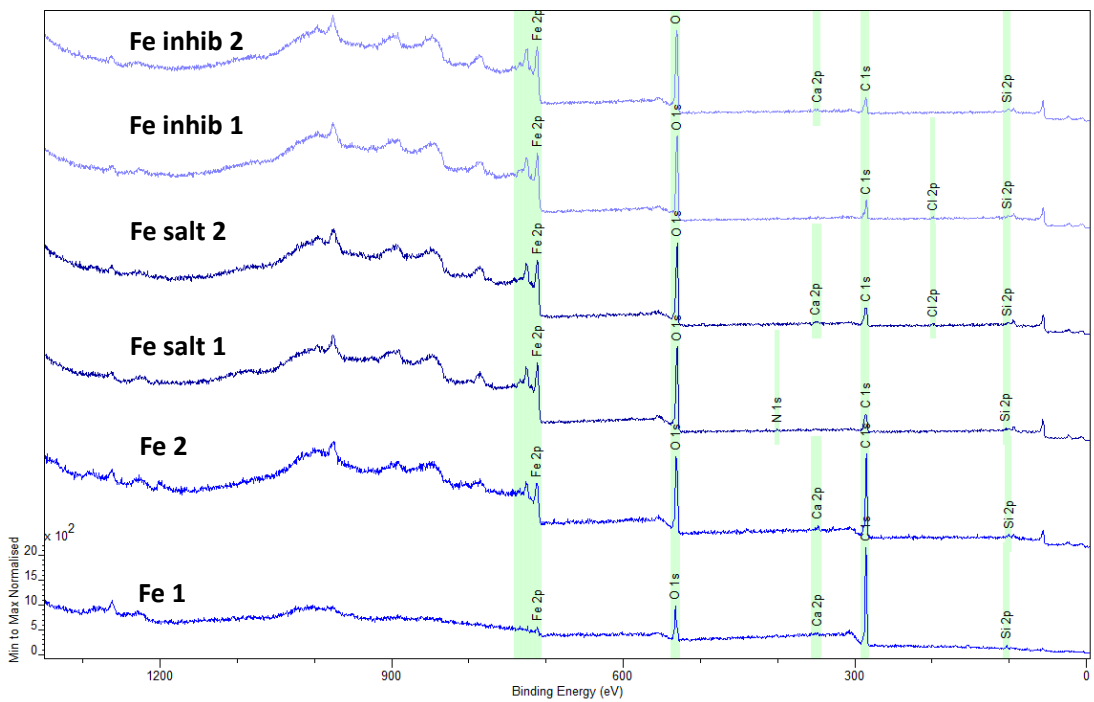


Abbildung 72: XPS survey spectra of all Fe sample positions. The regions used for quantification are shown in green as stated above in accordance with the data in the attached Excel sheet. All spectra have been normalized to their strongest signals. (PE: 100eV, Step: 0.5eV, Dwell: 0.1s, Scan-n^o: 10)

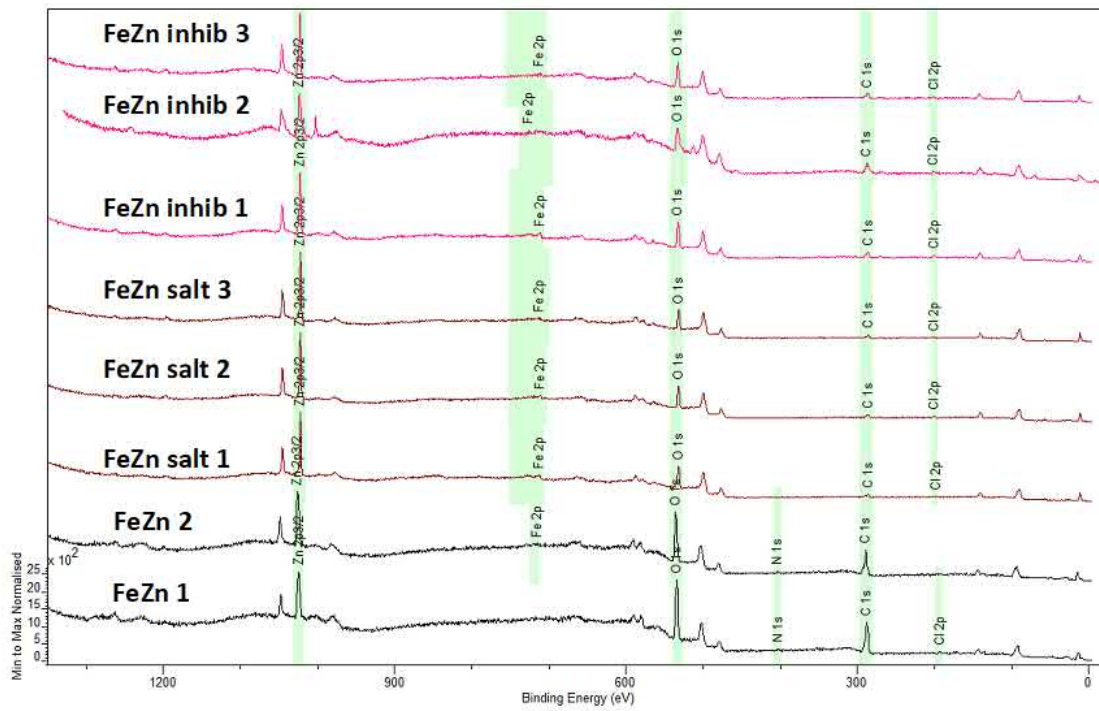


Abbildung 73: XPS survey spectra of all FeZn sample positions. The regions used for quantification are shown in green as stated above in accordance with the data in the attached Excel sheet. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 100eV, Step: 0.5eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 10)

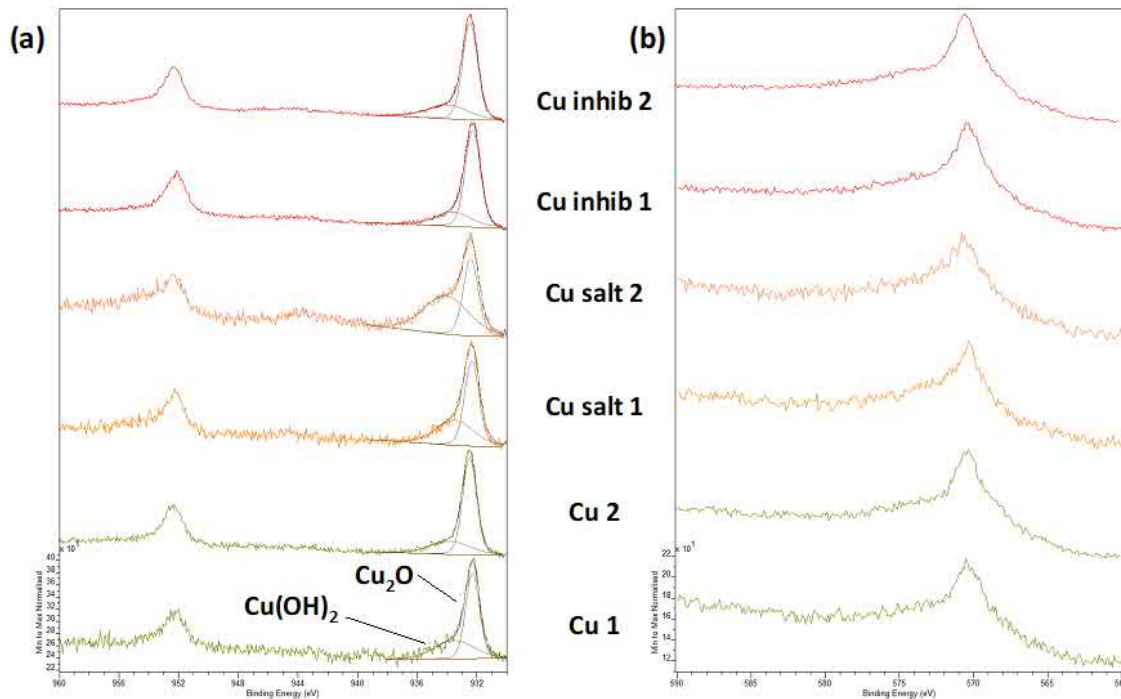


Abbildung 74: Cu2p(a) and CuLMM (b) detail XP spectra of all Cu sample positions. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.05eV/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 50/100)

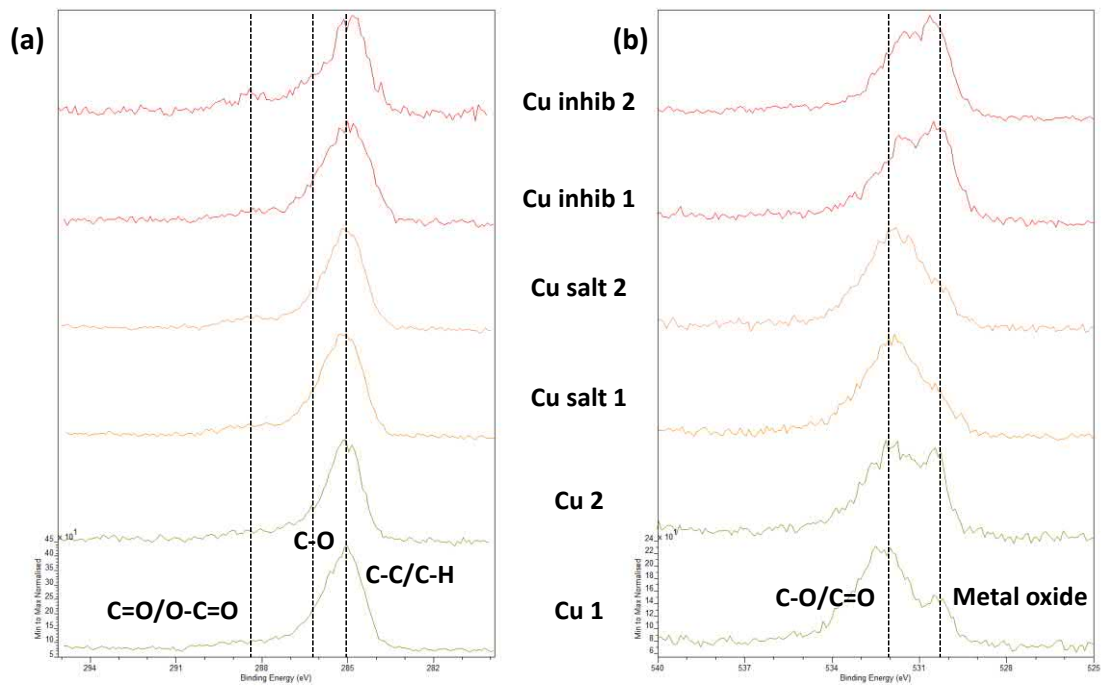


Abbildung 75: C1s (a) and O1s (b) detail XP spectra of all Cu sample positions. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 30/30)

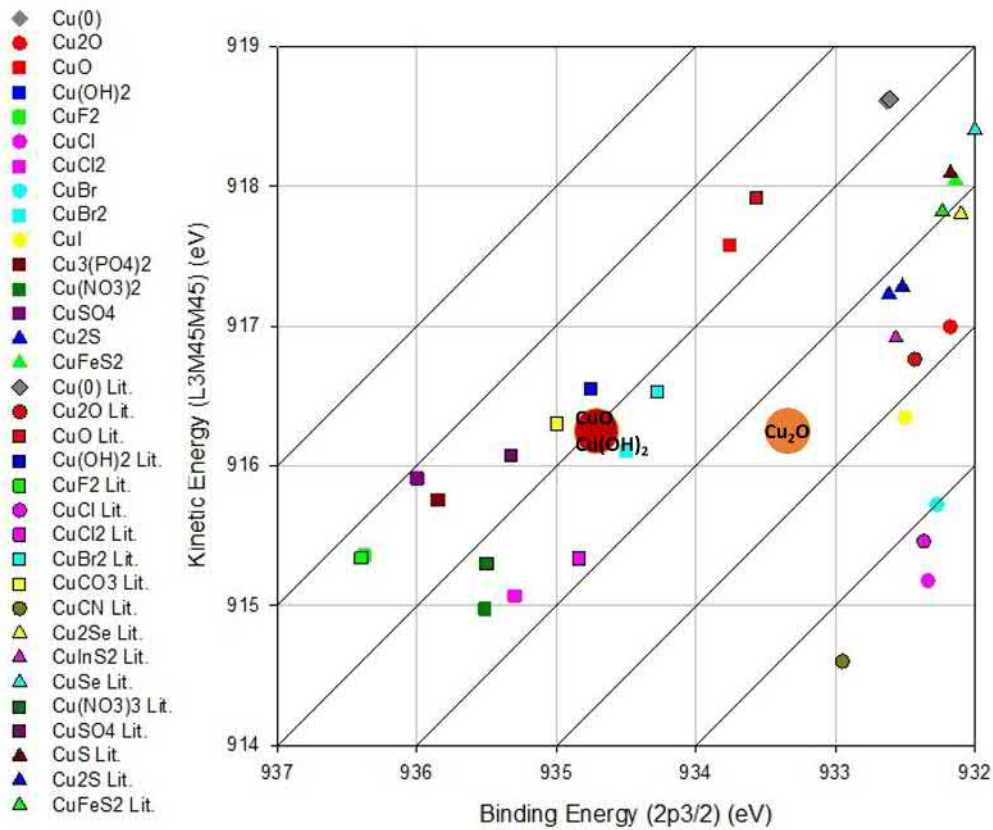


Abbildung 76: Wagner plot showing the Cu 2p3/2 binding energy and the Cu LMM Auger kinetic energy of all Cu samples compared to literature values. (PE: 30eV, Step: 0.05eV, Dwell: 0.05/0.1s, Scan-n°: 50/100)

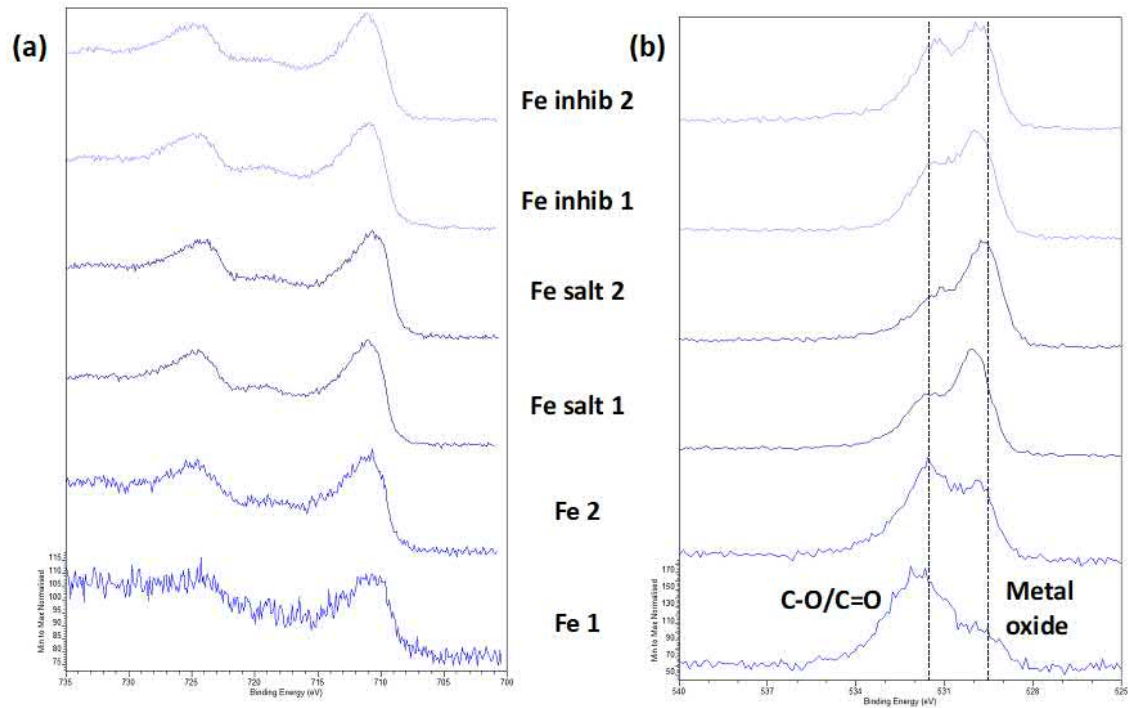


Abbildung 77: Fe 2p (a) and O1s (b) detail XP spectra of all Fe sample positions. All spectra have been normalized to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.05/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 100/30)

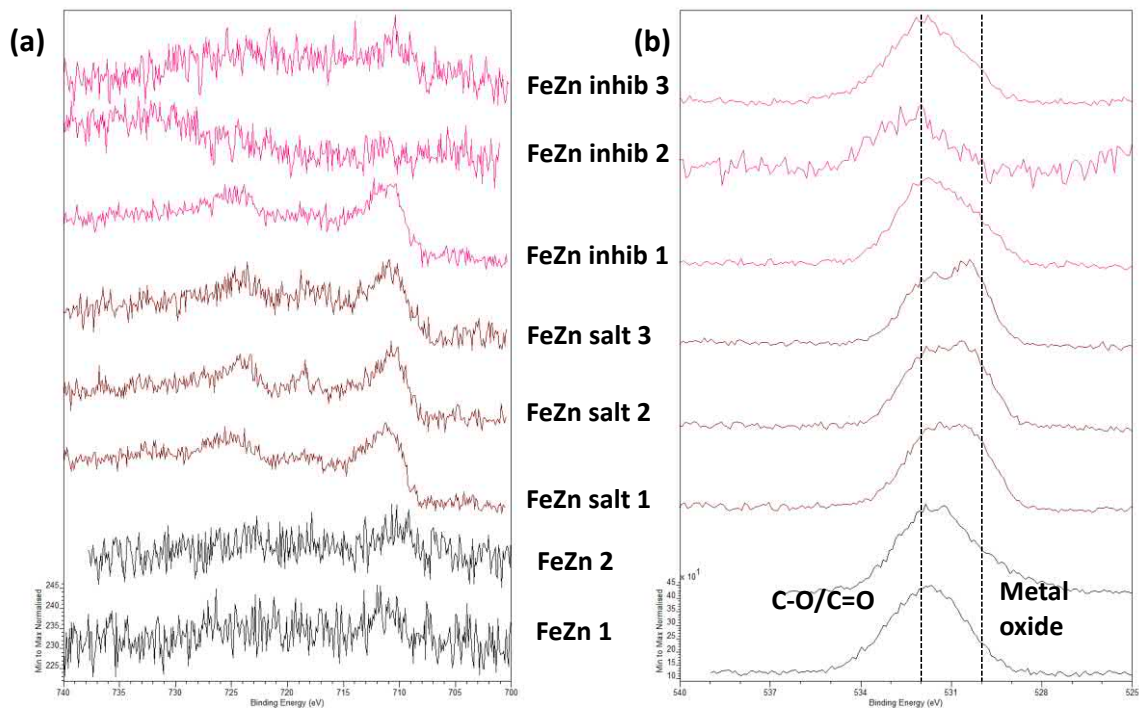


Abbildung 78: Fe 2p (a) and O1s (b) detail XP spectra of all FeZn sample positions. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.05/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 100/30)

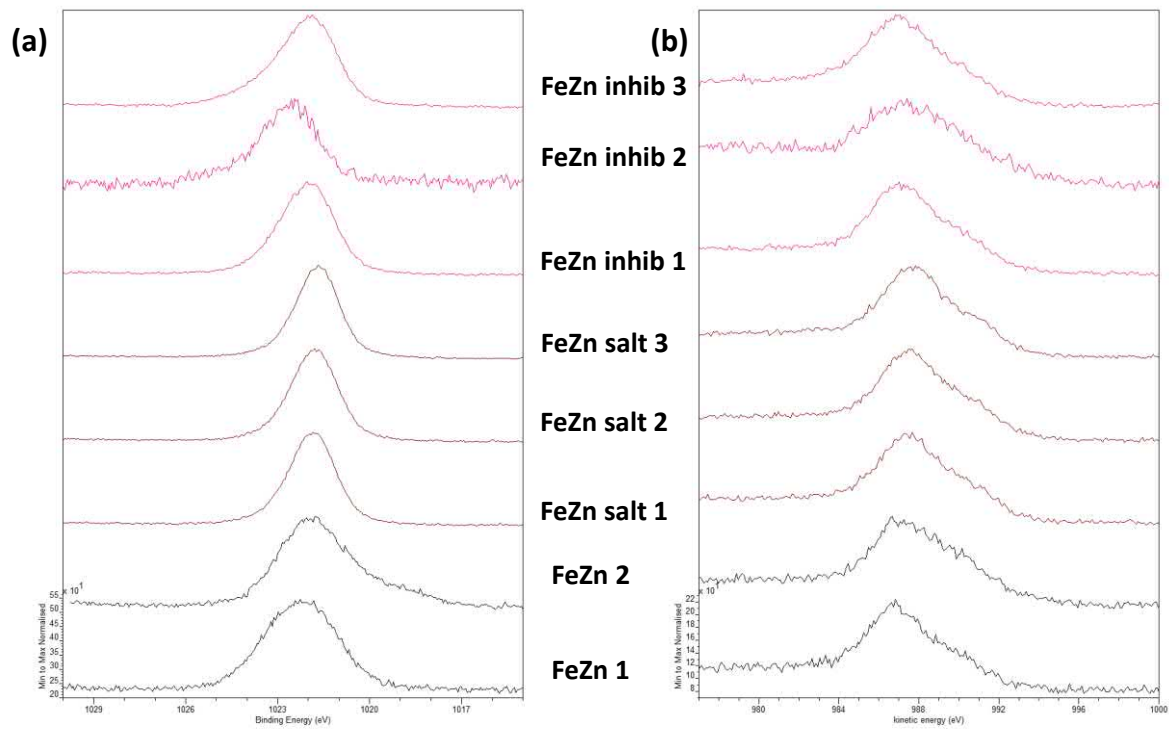


Abbildung 79: Zn2p (a) and ZnLMM (b) detail XP spectra of all FeZn sample positions. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.05/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 50/100)

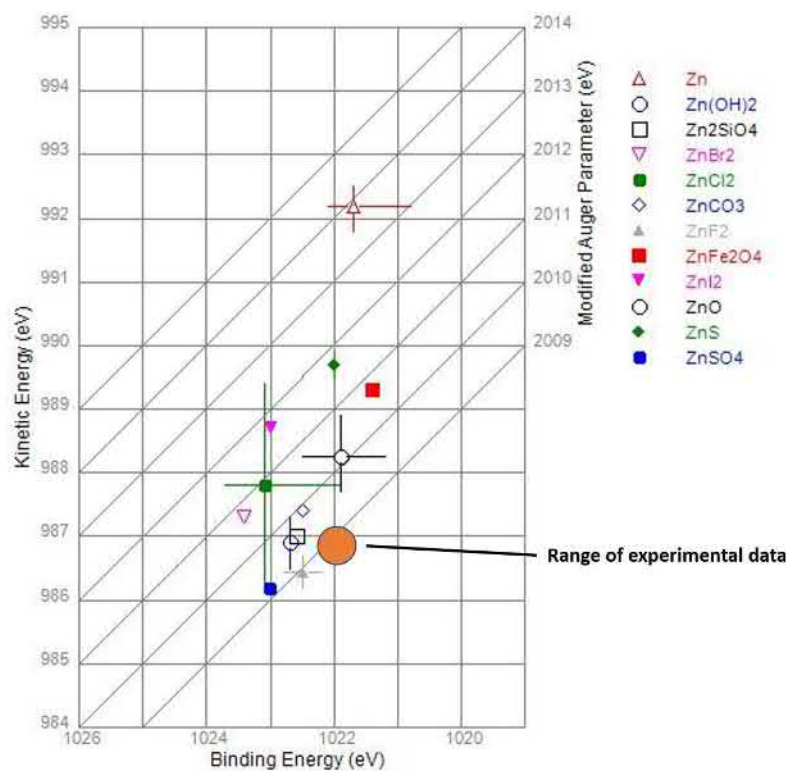


Abbildung 80: Wagner plot showing the Zn 2p_{3/2} binding energy and the Zn LMM Auger kinetic energy of all FeZn samples compared to literature values. (PE: 30eV, Step: 0.05/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 50/100)

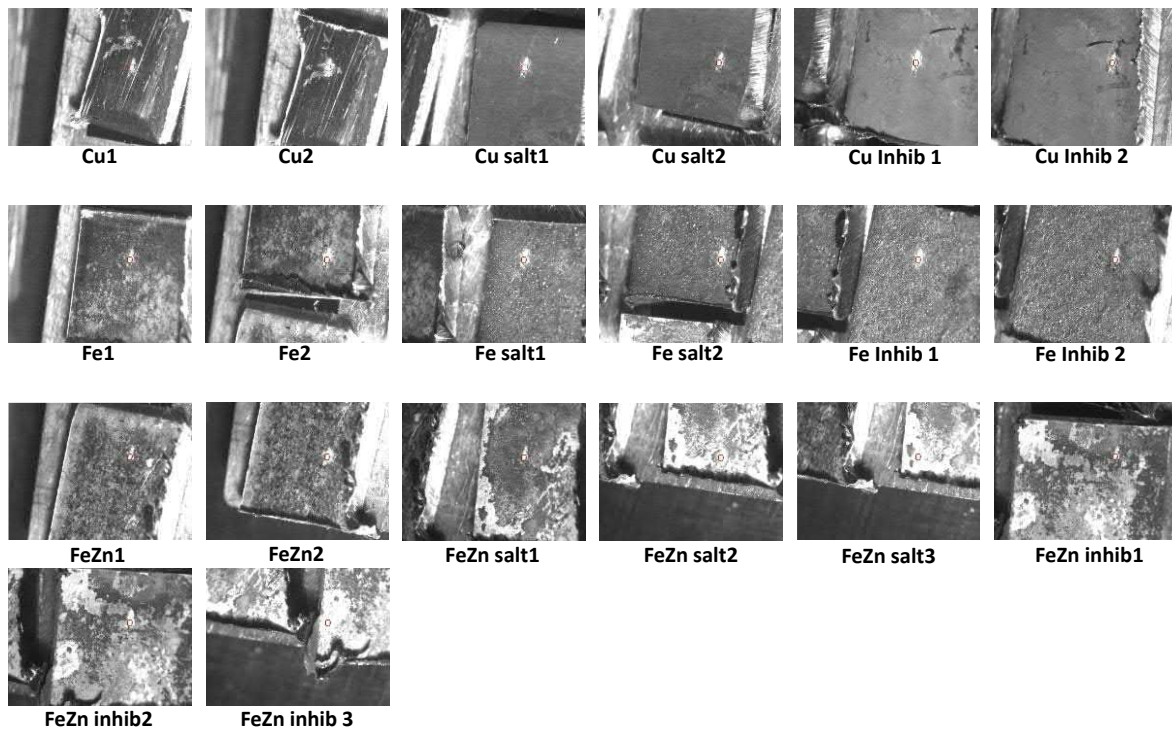


Abbildung 81: All measurement positions on the Cu, Fe and FeZn samples

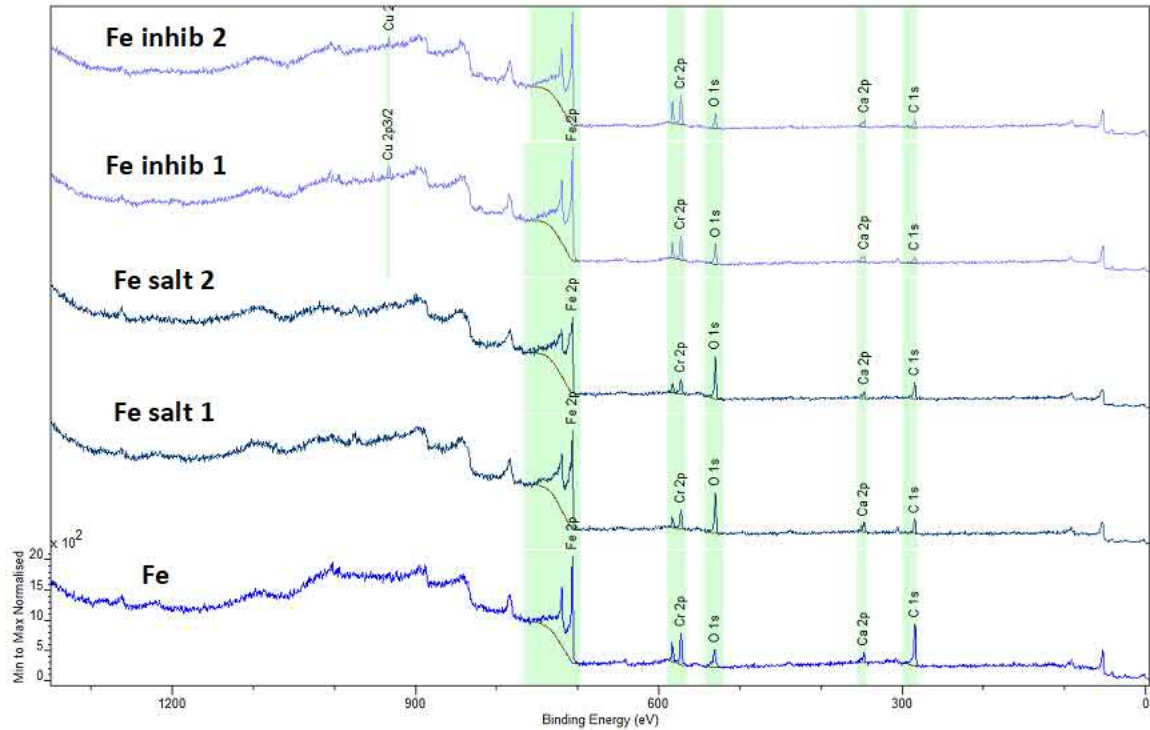


Abbildung 82: XPS survey spectra of all Fe sample positions after annealing at 415°C for 1h. The regions used for quantification are shown in green as stated above in accordance with the data in the attached Excel sheet. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 100eV, Step: 0.5eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 10)

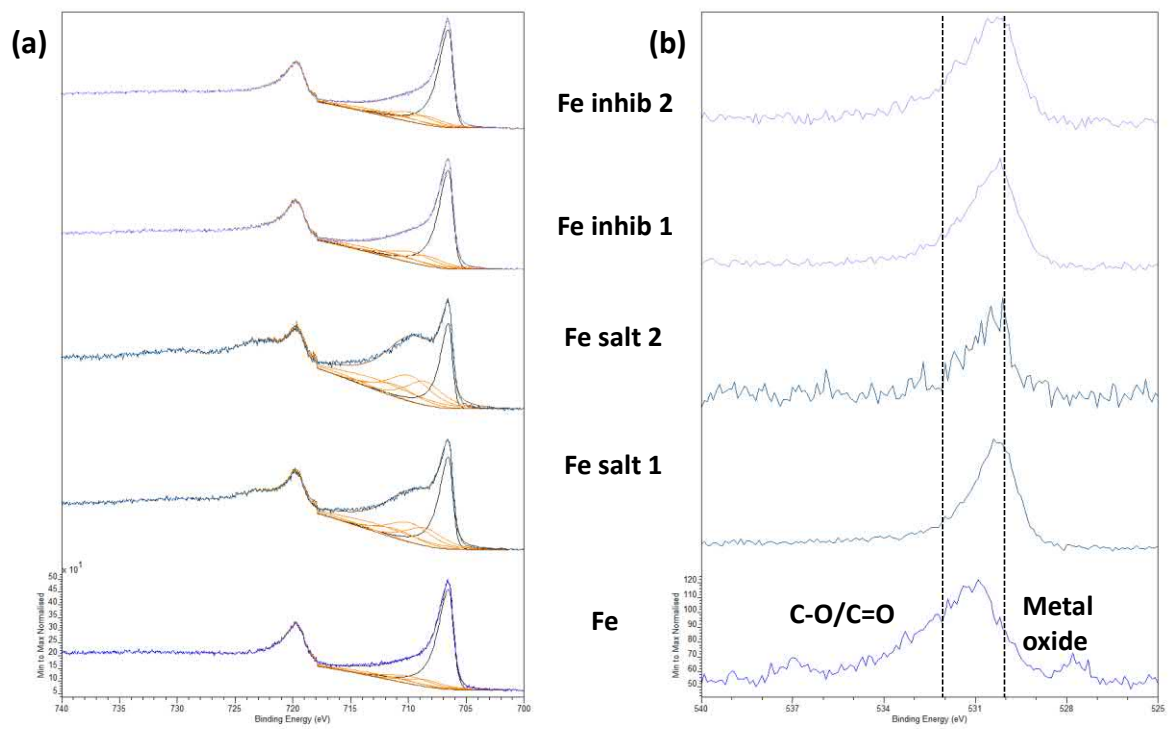


Abbildung 83: Fe 2p (a) and O1s (b) detail XP spectra of all Fe sample positions after annealing at 415°C for 1h. All spectra have been normalised to their strongest signals. (PE: 30eV, Step: 0.05/0.1eV, Dwell: 0.1s, Scan-n°: 100/50)

5.5.3 Korrosionsprüfungen

Ein optischer Vergleich der Proben vor und nach der Prüfung sowie nach der Reinigung (Spalten) für alle Prüfmethode(n) (Zeilen) ist in Abbildung 84 zu sehen. Wie die Ergebnisse in Abbildung 42 zeigen, sind die Unterschiede zwischen der hohen Korrosionswirkung der Wechseltauchprüfung bei hoher Temperatur, der mittleren Wirkung der Wechseltauchprüfung bei Raumtemperatur und der geringen Wirkung der anderen Methoden zu erkennen. Die höheren Korrosionseffekte bei der Wechseltauchprüfung im Container im Vergleich zur Klimakammer lassen sich mit der höheren relativen Luftfeuchtigkeit im Container erklären.

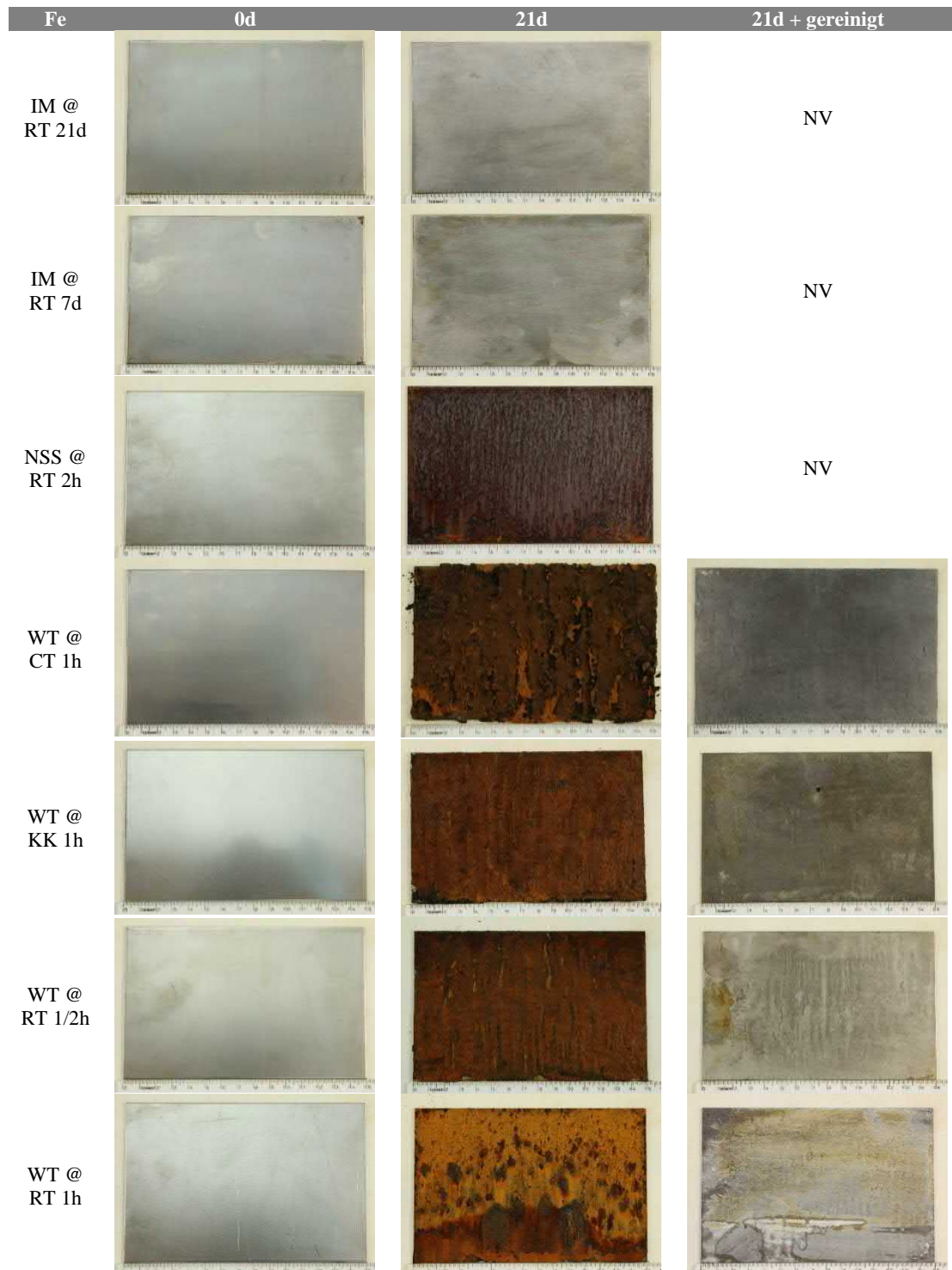
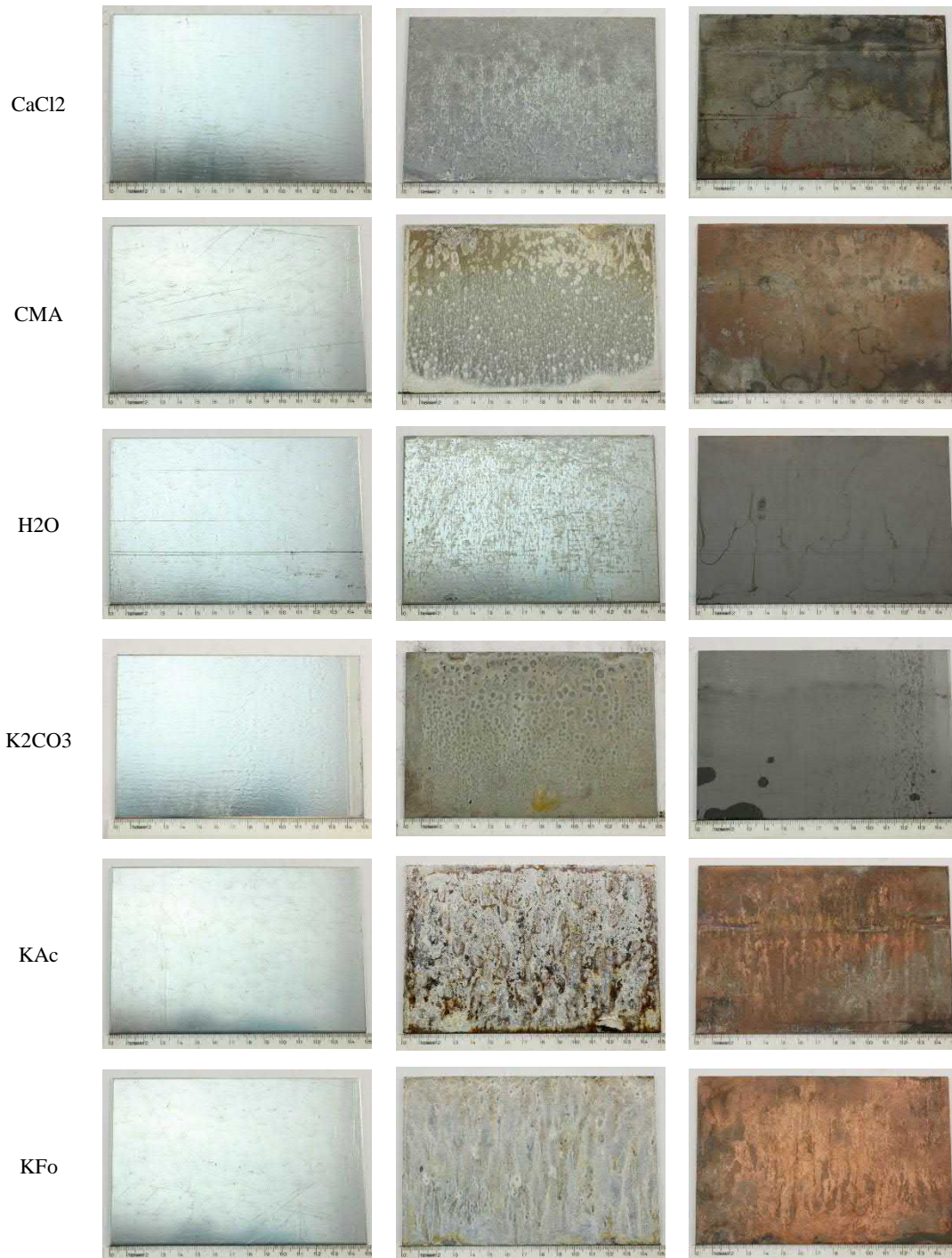
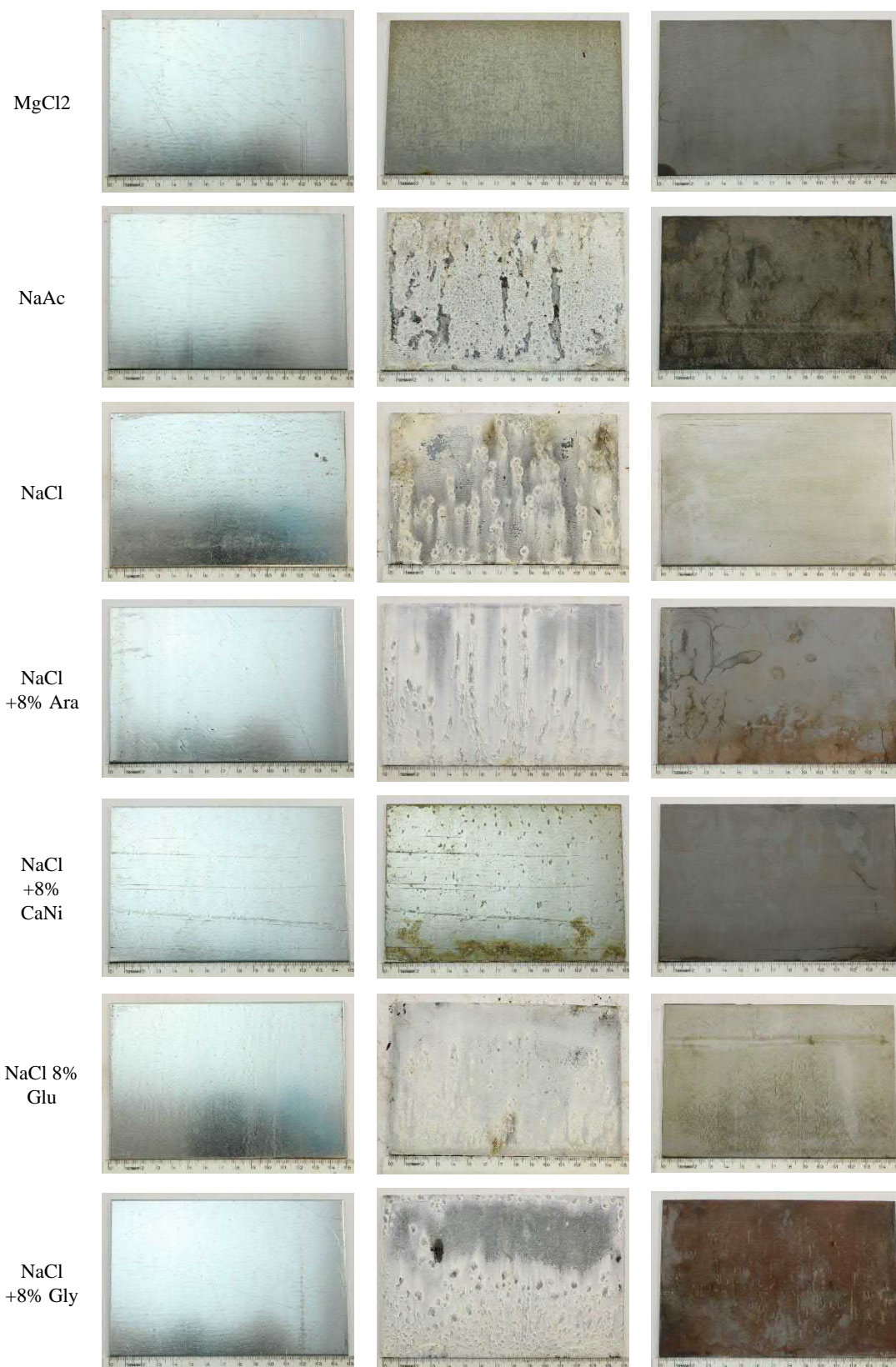


Abbildung 84: Optischer Vergleich der Korrosionsprüfmethode(n) (5 % NaCl-Lösung auf Fe)

Optischer Vergleich der Korrosionseffekte im Klimacontainer:

Analog zum optischen Vergleich der Korrosionsergebnisse der unterschiedlichen Prüfmethode, ist im Folgenden ein Vergleich aller zum Zeitpunkt des Verfassens verfügbare Prüfungen dokumentiert. Versuche auf Stahl Fe sind für Grundtaumittel in Abbildung 85, für der NaCl-Lösung zugemischten inhibierende Taumitteln in Abbildung 86, für Inhibitoren in Abbildung 87 ersichtlich. Versuche auf verzinktem Stahl Fe(Zn) sind für Grundtaumittel in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und für Inhibitoren in





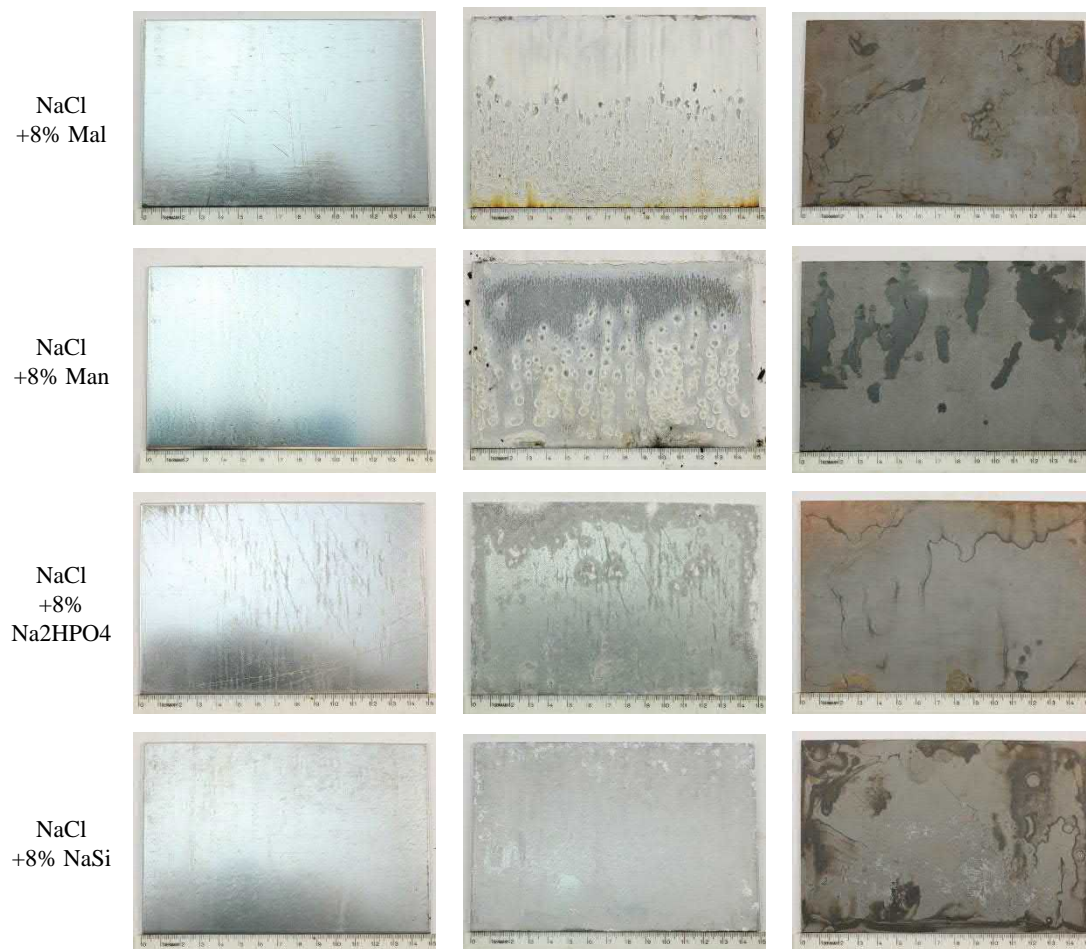
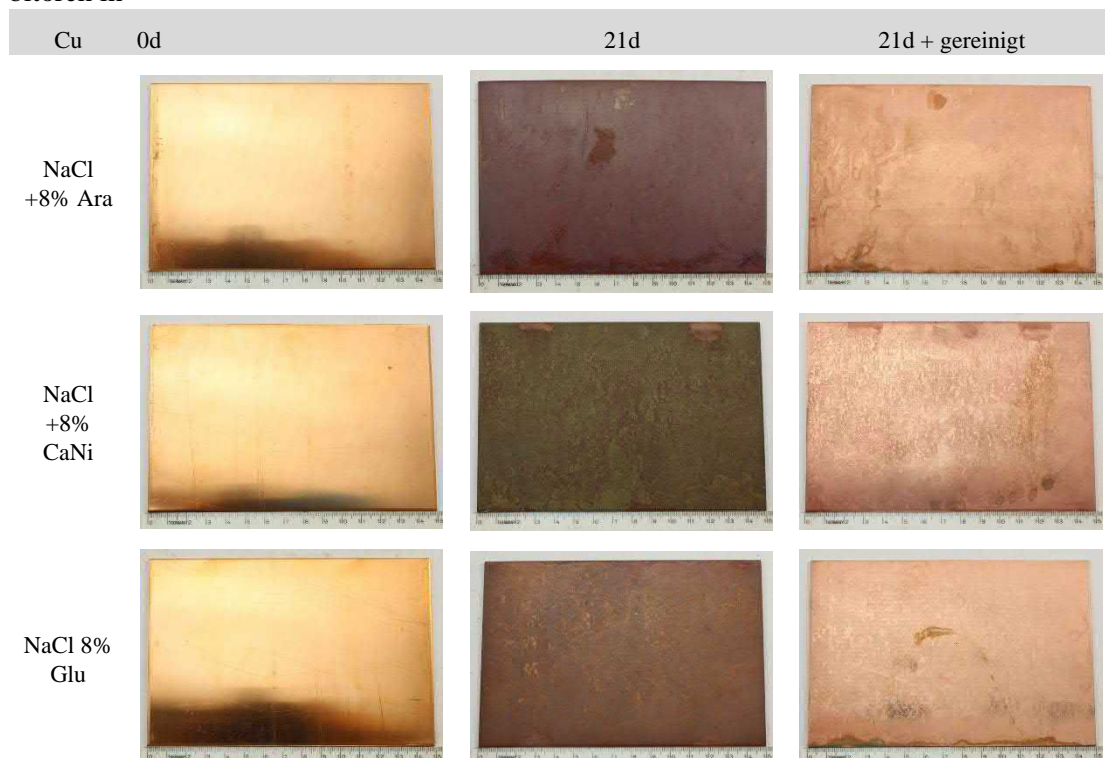


Abbildung 88 abgebildet. Versuche auf Kupfer Cu sind für Grundtaumittel in Abbildung 89 und für Inhibitoren in



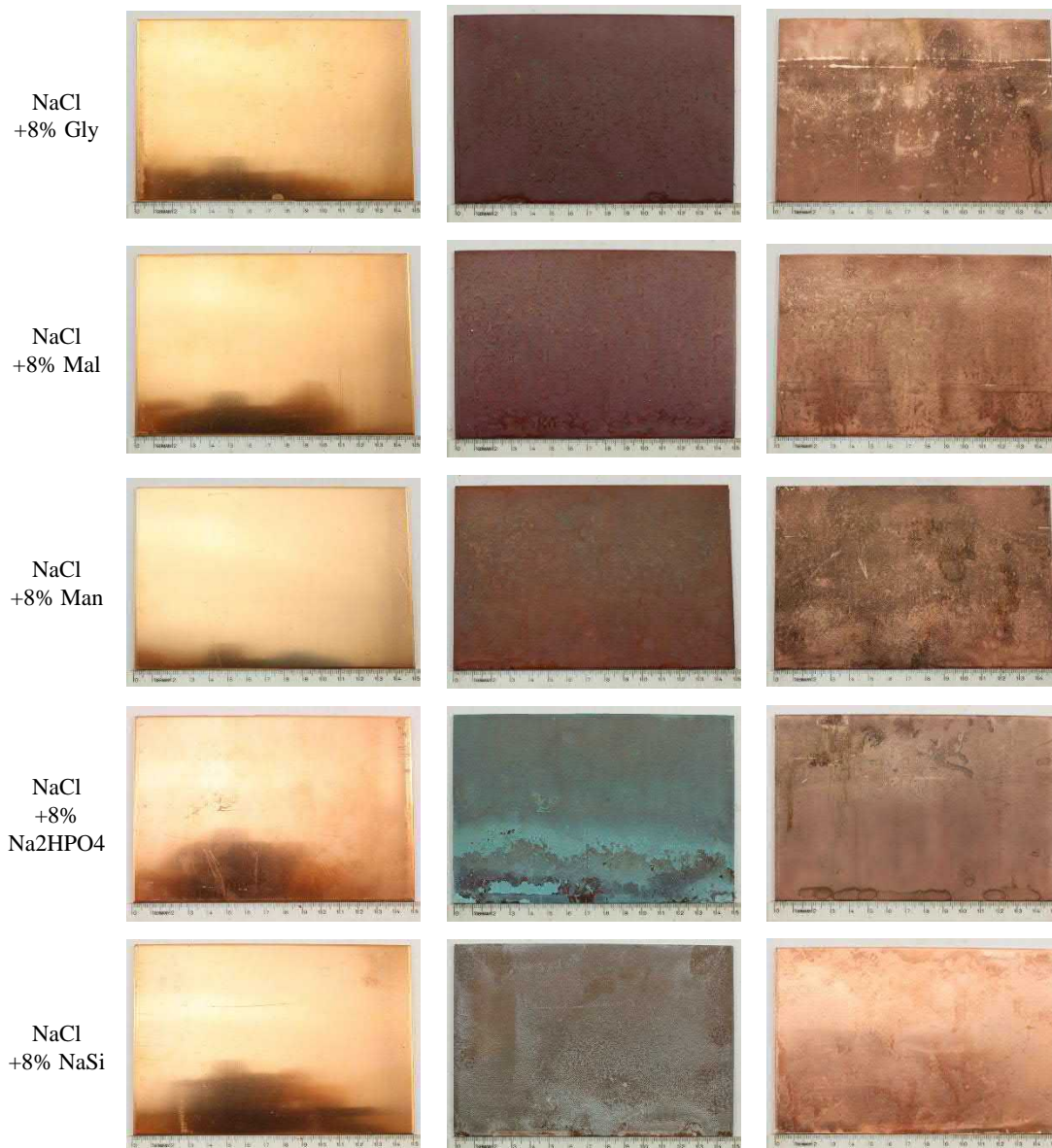
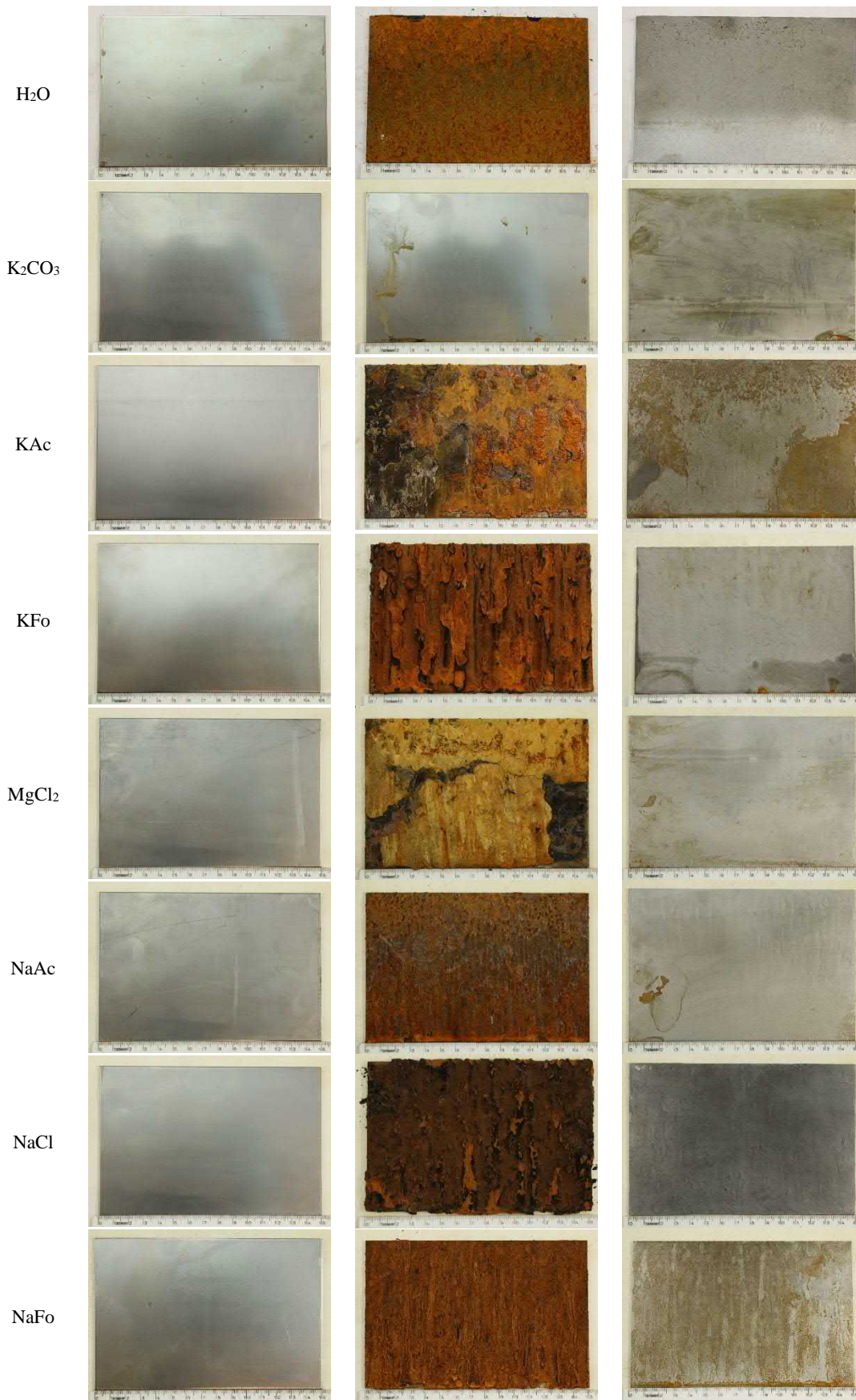


Abbildung 90 zu sehen.

Grundtaumittel auf Stahl (Fe):





SNI



Abbildung 85: Optischer Vergleich der Grundtaumittel auf Stahl (Fe)

NaCl mit ausgewählten Grundtaumitteln als Inhibitoren auf Stahl (Fe):

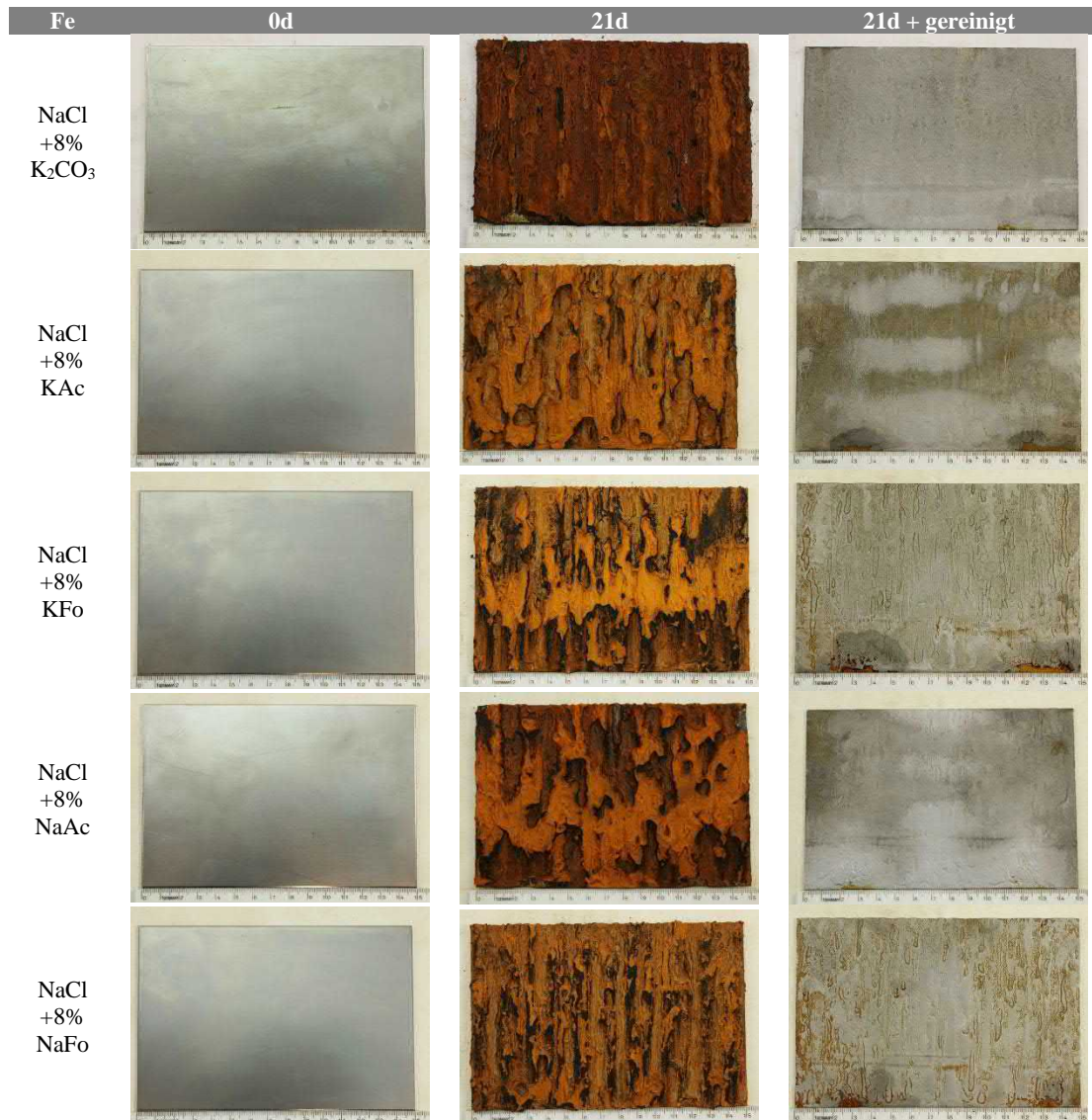









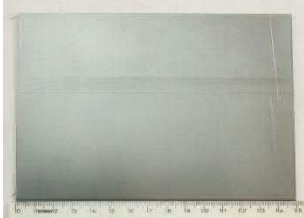













Abbildung 86: Optischer Vergleich der zu NaCl gemischten inhibierenden Taumittel auf Fe

NaCl mit Inhibitoren auf Stahl (Fe):

Fe	0d	21d	21d + gereinigt
NaCl +4% Ara			
NaCl +8% Ara			
NaCl +4% CaNi			
NaCl +8% CaNi			
NaCl 2% Glu			
NaCl 4% Glu			
NaCl 6% Glu			

NaCl 8%
Glu



NaCl +4%
Gly



NaCl +8%
Gly



NaCl +4%
Mal



NaCl +8%
Mal



NaCl +4%
Man



NaCl +8%
Man



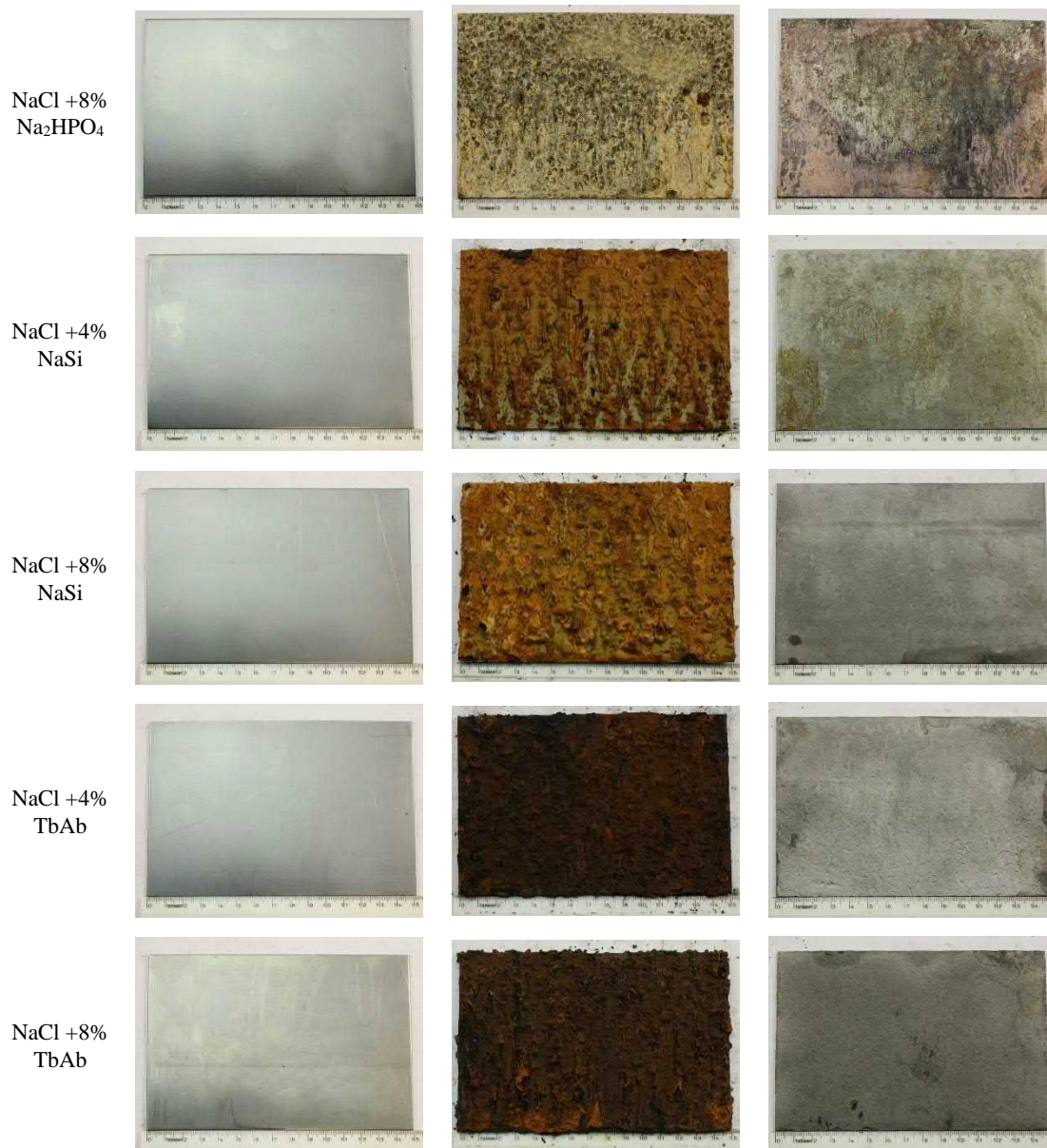
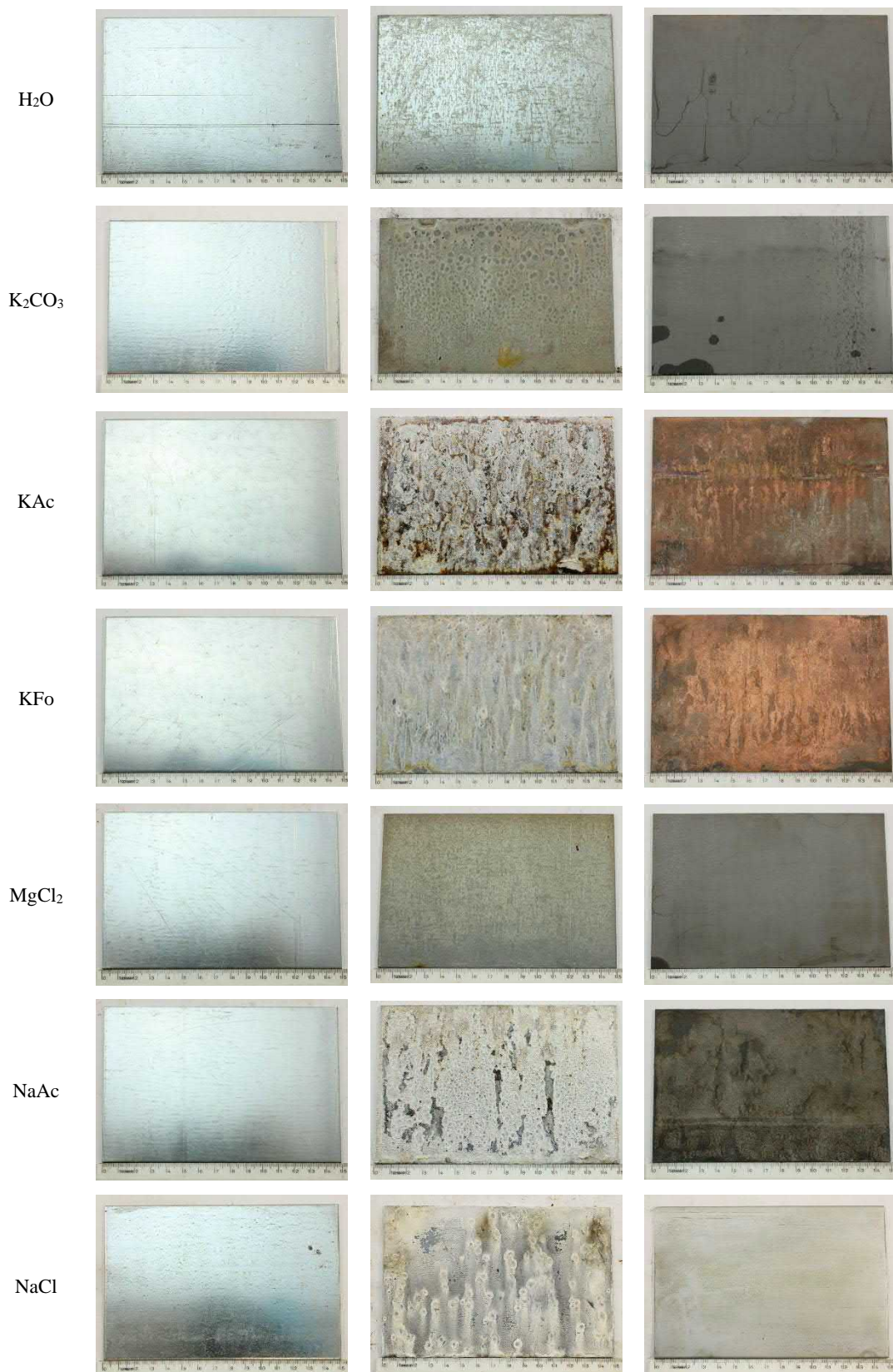


Abbildung 87: Optischer Vergleich der Inhibitoren auf Stahl (Fe)

Grundtaumittel bzw. NaCl mit Inhibitoren auf Stahl verzinkt:

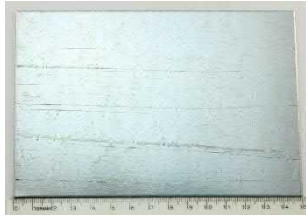




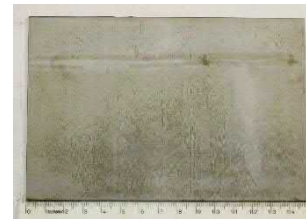
NaCl
+8% Ara



NaCl
+8%
CaNi



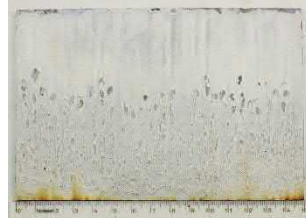
NaCl 8%
Glu



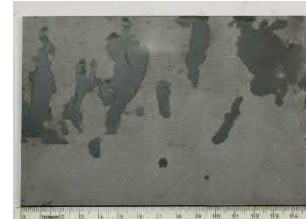
NaCl
+8% Gly



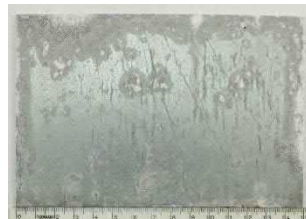
NaCl
+8% Mal



NaCl
+8% Man



NaCl
+8%
Na₂HPO₄



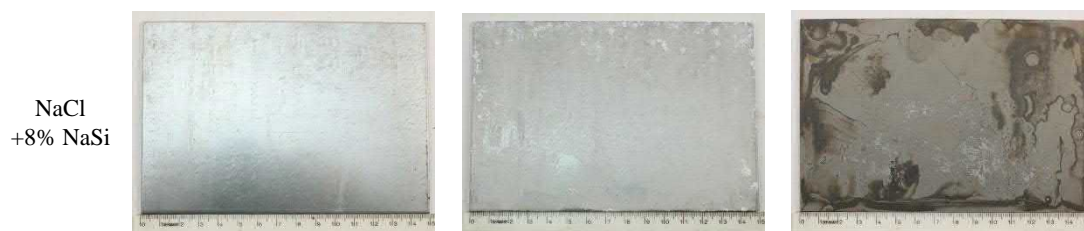
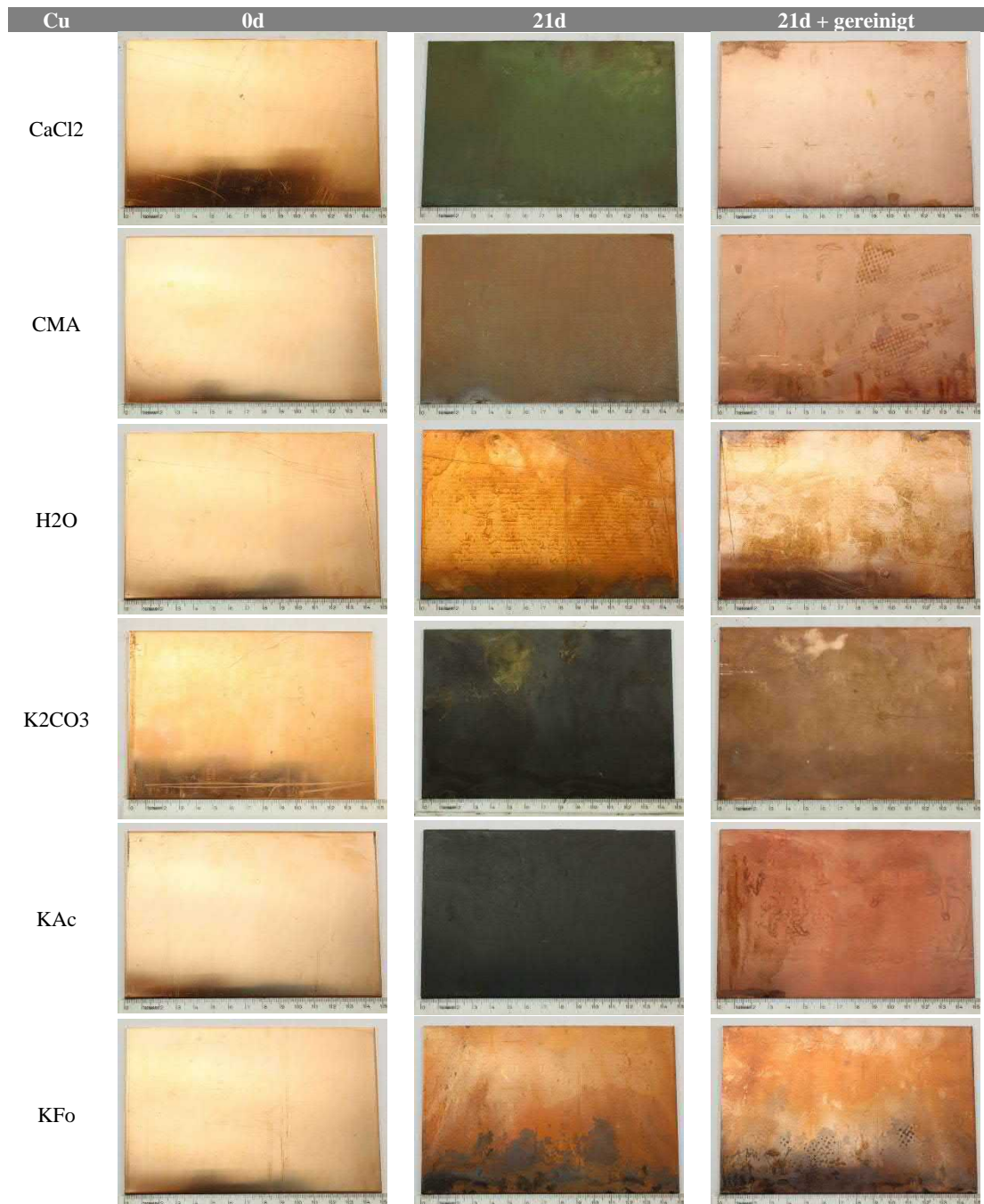


Abbildung 88: Optischer Vergleich der Grundtaumittel bzw. NaCl + Inhibitoren auf Fe(Zn)

Grundtaumittel auf Kupfer (Cu):



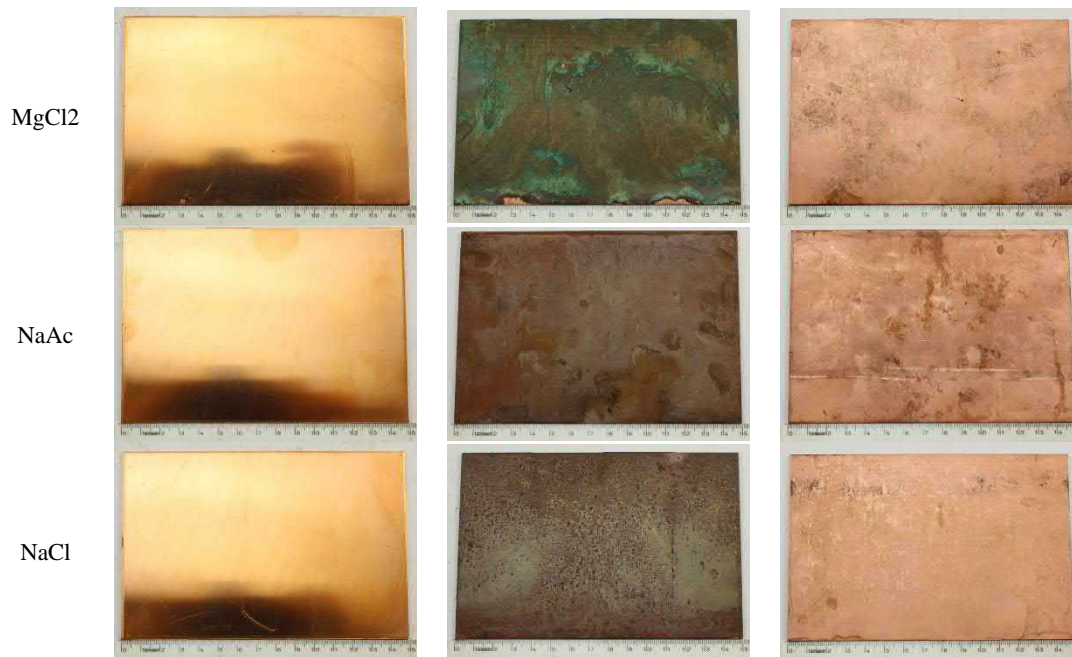
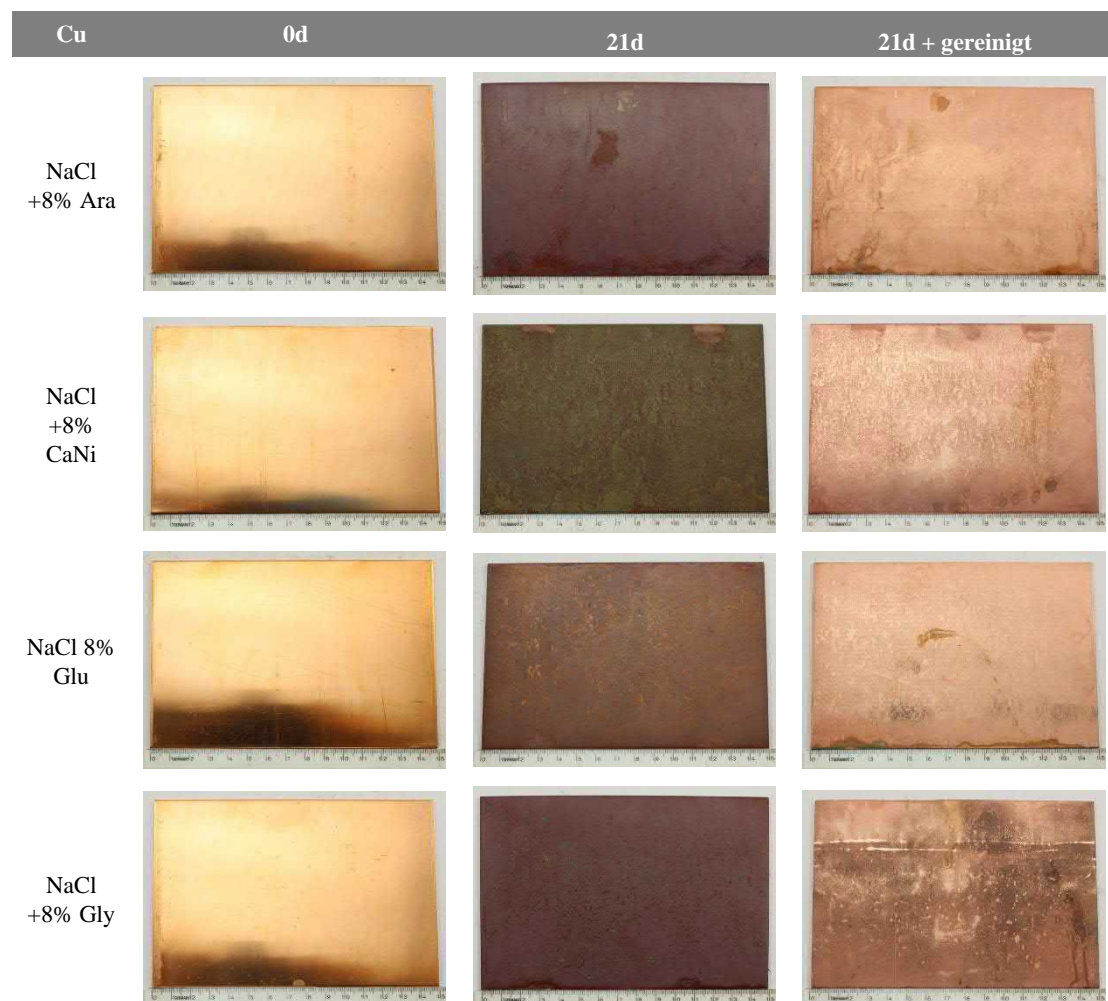


Abbildung 89: Optischer Vergleich der Grundtaumittel auf Cu

NaCl mit Inhibitoren auf Kupfer (Cu):



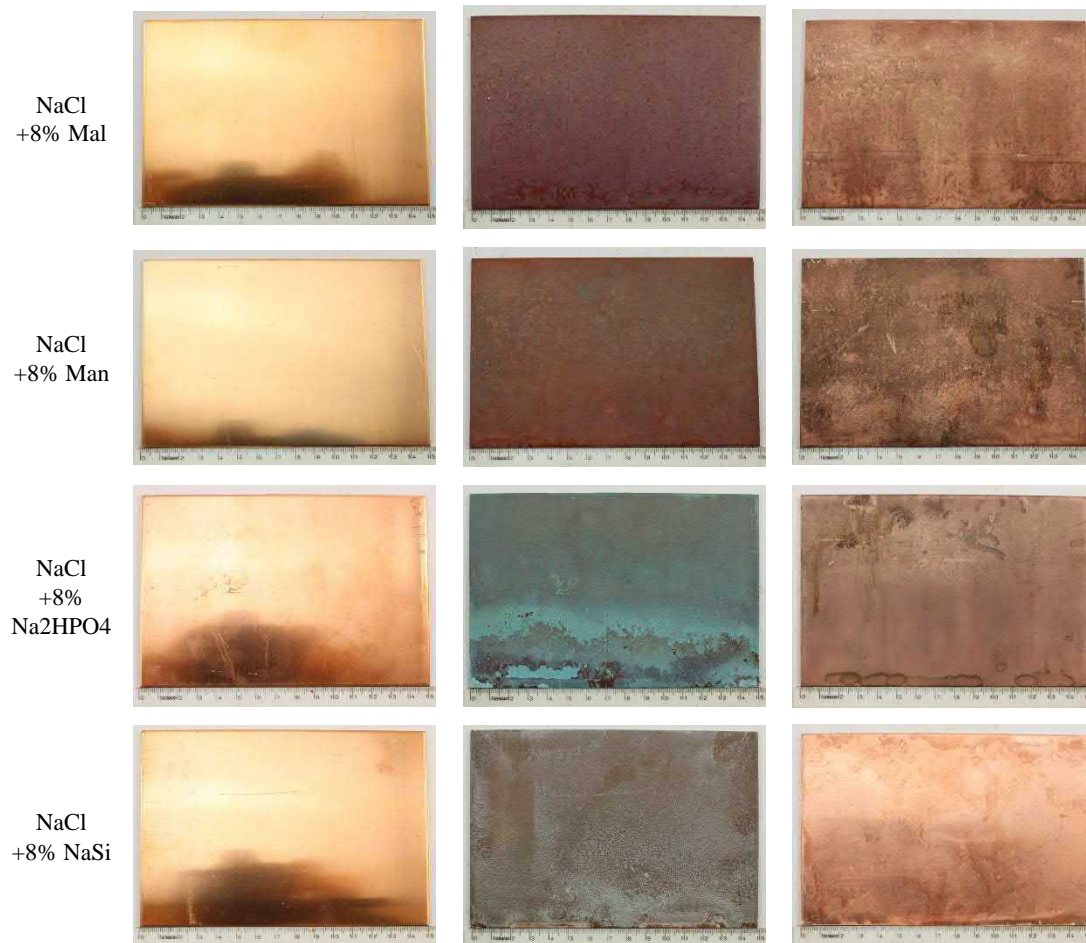


Abbildung 90: Optischer Vergleich der Inhibitoren auf Cu

5.6 Projektteam WINTERLIFE

5.6.1 Projektteam ÖBB - INFRA



OEBB Infrastruktur AG
A-1020 Wien, Praterstern 3
<https://infrastruktur.oebb.at/de/>

Projektleitung AG:

DI. Andreas Schön (Andreas.Schoen2@oebb.at; mobil: +43 664 8140058)

Winterdienstprozess:

DI. Dr. Heinz Kietaibl (heinz.kietaibl@oebb.at);
Ing. Gerhard Loos (gerhard.loos@oebb.at);
Dr. Ewelina Klein (Ewelina.Klein@oebb.at);

5.6.2 Projektteam Hoffmann-Consult



Transport Infrastructure Asset Management

Priv.-Doz. DI. Dr. techn. Markus Hoffmann
Ing. Dr. Johannes Leubolt

A-1230 Wien, Fürst-Liechtenstein-Straße 13
Tel. +43 1 9971255; Mobil: +43 650 9730604
office@hoffmann-consult.at; www.hoffmann-consult.at

5.6.3 Projektteam TU Wien



Institut für Materialchemie
A-1060 Wien, Getreidemarkt 9/165
<https://www.imc.tuwien.ac.at/home/>

Univ. Prof. Dipl. Chem. Dr. Hinrich Grothe (mobil: +43 664 605886522)
Dr.rer.nat Ayse Nur-Koyun, Dr.rer.nat Teresa Seifried, David Stinglmayr BSc.
(alle TU Wien - Materialchemie)



Institut für Verkehrswissenschaften
A-1040 Wien, Gusshausstraße 28
<https://www.imc.tuwien.ac.at/home/>

Assoc. Prof. DI. Dr. Bernhard. Hofko (mobil: +43 664 610 4988)
Univ. Ass. DI. Michael. Gruber (mobil: ++43 1 58801 23311)
(alle TU Wien - Verkehrswissenschaften)