Organ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, der Bundesvereinigung der Straßenbau- und Verkehrsingenieure und der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße · Schiene · Verkehr

Straße und Autobahn

67. Jahrgang Oktober 2016

10

www.strasse-und-autobahn.de

KIRSCH BAUM

Bitumen
Bewertung des Ermüdungsverhaltens von Straßenbaubitumen

Forschung
Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Winterdienst

Winterdienst
Entwicklung zum präventiven Winterdienst

Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Winterdienst

Bernhard Hofko, Daniel Steiner, Markus Hoffmann und Josef Neuhold

Für die in Österreich eingesetzten auftauenden Streumittel, Natriumchlorid und in Sonderfällen auch Calciumchlorid und Magnesiumchlorid, bestehen langjährige Erfahrungen zur Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit. Für viele neu auf den Markt kommende Produkte ist dies hingegen nicht der Fall. Nachdem der Markt an auftauenden Streumitteln in den letzten Jahren vielfältiger geworden ist, entsteht die Notwendigkeit, auftauende Streumittel standardisiert zu prüfen und zu bewerten, um auch in Zukunft einen verkehrssicheren und wirtschaftlich effizienten Winterdienst auf Straßen sicherzustellen. In einem kürzlich abgeschlossenen Forschungsprojekt wurden standardisierte Prüfungen entwickelt, mit denen die technische Eignung von festen und flüssigen auftauenden Streumitteln unter Laborbedingungen ermittelt werden kann. Diese Prüfungen umfassen die Ermittlung des Gefrierpunktverlaufs, der Tauleistung und der Rieselfähigkeit. Durch Bestimmung dieser Kennwerte an häufig eingesetzten auftauenden Streumitteln konnte ein Bewertungssystem geschaffen werden. Mit diesem ist es möglich, sowohl bestehende als auch neu auf den Markt kommende Streumittel in Bezug auf ihre technische Eignung zu begutachten. Zudem wurden Grundlagen geschaffen, die eine Beschreibung der Wirtschaftlichkeit von Streumitteln auf Basis der entwickelten Laborprüfungen ermöglichen.

In Austria, sodium chloride, calcium chloride and magnesium chloride are widely used de-icing agents for road winter maintenance. For these materials, extensive experience in terms of de-icing performance and economic efficiency has been acquired over the last decades. However, with numerous new products entering the market in recent years, there is neither practical experience nor have there been consistent decision criteria. For this reason, standardized test methods are necessary in order to evaluate established and emerging products, thus ensuring economic, efficient and safe winter road maintenance in the future. In a recently completed research project, standardized test methods have been developed. The technical performance of liquid and solid de-icing agents can be determined under laboratory conditions. Tests for determining freezing point, de-icing performance (mass of melted ice per unit of time) and pourability are carried out. On the basis of the test results it was possible to define an assessment background. New products can be classified by employing this tool. Further, a framework for the economic evaluation of de-icing agents was created.

Verfasseranschriften:
Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. B. Hofko, bernhard.hofko@tuwien.ac.at;
Ass. Prof. Dipl.-Ing. D. Steiner, daniel.steiner@tuwien.ac.at,
Institut für Verkehrswissenschaften, Technische Universität Wien;
Univ.-Lektor Dipl.-Ing. Dr. M. Hoffmann, markus.hoffmann@gmx.at, Sachverständiger für das Bauwesen, A-1040 Wien;
wHR Dipl.-Ing. J. Neuhold, josef.neuhold@noel.gv.at, Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Abteilung Straßenbetrieb, A-3100 St. Pölten

1 Einleitung

Zielsetzung des Forschungsprojektes war es, allgemeingültige, objektive und anwendbare praktisch relevante Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Winterdienst zu schaffen. Diese Eignungskriterien sollen dazu dienen, die technische Eignung in Bezug auf Tauleistung bzw. Rieselfähigkeit zu bewerten wie auch Umweltauswirkungen und Wirtschaftlichkeit zu berücksichtigen.

Während für die heute üblicherweise eingesetzten auftauenden Streumittel, Natriumchlorid und in Sonderfällen auch Calciumchlorid und Magnesiumchlorid, langjährige Erfahrungen zur Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit bestehen, ist dies für viele neu auf den Markt kommende Produkte nicht der Fall. Nachdem der Markt an auftauenden Streumitteln in den letzten Jahren vielfältiger geworden ist, besteht die Notwendigkeit, auftauende Streumittel standardisiert zu prüfen und zu bewerten, um auch in Zukunft einen verkehrssicheren und wirtschaftlich effizienten Winterdienst auf Straßen sicherzustellen.

Daher wurden im vorliegenden Forschungsprojekt standardisierte Prüfungen entwickelt, mit denen die technische Eignung von festen und flüssigen auftauenden Streumitteln unter Laborbedingungen ermittelt werden kann. Diese Prüfungen erlauben u. a. eine zuverlässige Bestimmung von Gefrierpunktverlauf, Tauleistung und Rieselfähigkeit. Zudem wurde mit der Bestimmung von Referenzwerten für Natriumchlorid, Calciumchlorid und Magnesiumchlorid ein Bewertungshintergrund für Bewertung und Entscheidung geschaffen. Mit diesem können sowohl bewährte Streumittel unterschiedlicher Anbieter als auch neu auf den Markt kommende Streumittel in Bezug auf ihre technische Eignung begutachtet werden. Zudem wurden in einer umfangreichen Literaturstudie Grundlagen zur möglichen Bewertung von Umweltauswirkungen gelegt und Kennwerte geschaffen, die eine Beschreibung der Wirtschaftlichkeit von Streumitteln auf Basis der entwickelten Laborprüfungen ermöglichen. In dieser Publikation liegt der Schwerpunkt auf den Versuchen zur Bestimmung der Tauleistung fester und flüssiger Taumittel sowie den Grundlagen zur Ermittlung der Rieselfähigkeit und Bewertung der Wirtschaftlichkeit von auftauenden Streumitteln.

2 Tauleistung fester Taumittel

2.1 Hintergrund

Um auftauende Streumittel in Bezug auf die potenzielle Tauleistung, in der Form, in der das Mittel auch in der Praxis aufgebracht wird, untersuchen zu können, wurden stan-

Taumittel	Korn-klasse	Prüftemperatur [°C]				Prüfungen je Taumittel	zeitliche Bestim-mungen je Test	Bestim-mungen je Taumittel
		-2,5	-5	-7,5	-10			
NaCl	0,125|1,0	4	4	4	4	16	9	144
NaCl	1,0|3,15	4	4	4	4	16	9	144
NaCl	3,15|5,0	4	4	4	4	16	9	144
		SUMME				48		432

Tabelle 1: Übersicht Prüfmatrix Natriumchlorid NaCl mit Anzahl der Prüfungen

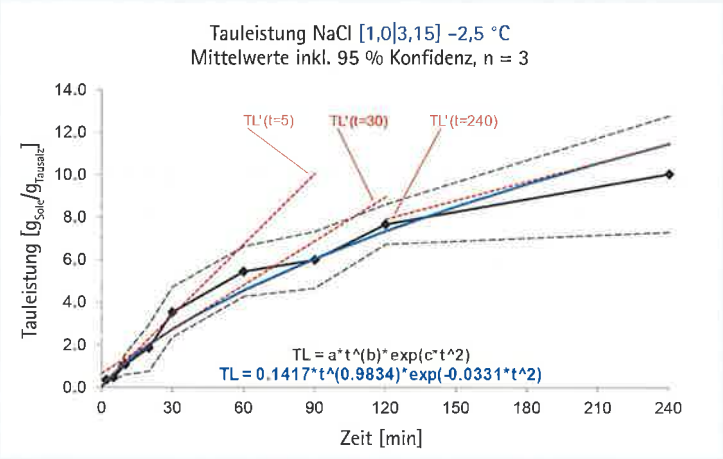


Bild 1: Methode zur Auswertung für die Tauleistung und Taurate fester Taumittel

dardisierte Versuche entwickelt (Nutz 2015; Hofko, Steiner, Hoffmann 2015; Hoffmann, Blab, Nutz 2012). Diese erlauben es, die Tauleistung der Taumittel in fester Form zu bestimmen und somit einen Zusammenhang mit dem Streuvorgang im angewandten Winterdienst herzustellen. Damit wird ein praxisrelevanter Bewertungshintergrund aufgebaut, mit dem verschiedene Produkte untereinander verglichen werden können.

Um die Tauleistung feststellen zu können, wird im Labor in Schalen mit definierten Abmessungen ein definiertes Volumen an Wasser gefroren. Die so hergestellte Eisoberfläche wird bei verschiedenen Temperaturen mit einer definierten Masse an Taumittel bestreut und die Menge der abgetauten Sole nach bestimmten Zeiträumen bestimmt.

2.2 Materialien und Prüfmethoden

Für sämtliche Tauleistungsbestimmungen von festen Taumitteln wurde NaCl verwendet, das in Bezug auf die Herkunft als Siede- und Steinsalz zu bezeichnen ist.

Die angelieferten Salzproben wurden mittels einer Trockensiebung aufbereitet und analysiert und für die weitere Versuchsdurchführung in die Kornklassen [0,125|1,0], [1,0|3,15] und [3,15|5,0] unterteilt. Weitere Untersuchungen wurden an den angelieferten Proben ohne Aussieben durchgeführt, um beispielhafte Daten für Siede- und Steinsalz zu erhalten. Diese Daten sind im Abschnitt 5 dieser Publikation dargestellt. Detaillierte Informationen zum Prüfprozedere sind in (Hofko, Steiner, Hoffmann 2015) enthalten.

2.3 Prüfprogramm

Tabelle 1 zeigt den Umfang sämtlicher Bestimmungen der Tauleistung von festen Taumitteln. Dabei wurden mit den Kornklassen [0,125|1,0], [1,0|3,15] und [3,15|5,0] 3 verschiedene Taumittel bei 4 verschiedenen Temperaturen untersucht. Die Bestimmungen wurden jeweils bei 9 verschiedenen Einwirkdauern durchgeführt. Die Ergebnisse jeder Kornklasse sind auf Basis einer 4-fachen Bestimmung abgeleitet.

2.4 Prüfdurchführung und Auswertung

Bild 1 zeigt die Methode der Auswertung zur Bestimmung der Tauleistung bzw. Taurate fester Taumittel. Dabei ist die Tauleistung definiert als die gelöste Masseneinheit Sole g_{sole} je Masseneinheit des eingesetzten Taumittels $g_{tausalz}$. Der Mittelwert dieser Tauleistung inkl. 95-%-Konfidenz (1,96-fache Standardabweichung (Bücker 2003)) wird für jede Einwirkdauer dargestellt, und zusätzlich ein charakteristischer Verlauf mittels Regression bestimmt. Aufgrund der Steigung der resultierenden Funktion lassen sich aus der Ableitung der Regressionskurve Tauraten ermitteln, wie sie in Bild 1 gezeigt sind. Diese Tauraten geben die verbleibende Tauleistung pro Zeiteinheit zu einem bestimmten Zeitpunkt an. Die Regressionsformel ist nur bis zur längsten Testdauer (240 min) gültig. Eine Extrapolation darüber hinaus ist nicht zulässig.

Formel 1 und Formel 2 zeigen die Berechnung der Tauleistung und Taurate aus den im Versuch ermittelten Werten.

Formel 1: Massenbezogene Tauleistung fester Taumittel

$$TL_{M,fest}(t) = \frac{M_{Sole}(t)}{M_{TMfest}}$$

$TL_{M,fest}$ Massenbezogene Tauleistung fester Taumittel [g/g] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer t

M_{Sole} abgegossene (getaute) Sole [g] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer t

M_{TMfest} aufgebrachte Taumittelmenge [g]

Formel 2: Massenbezogene Taurate eines Taumittels

$$TR_{M,i}(t) = \frac{dTL_{M,i}(t)}{dt}$$

$TR_{M,i}$ Massenbezogene Taurate eines Taumittels in [g/(g*Zeiteinheit)]

$TL_{M,i}$ Massenbezogene Tauleistung eines Taumittels [g/g] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer

2.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die analytische Beschreibung der Tauleistung als auch die Ableitung von Tauraten erfolgreich war. Dadurch konnte für 3 untersuchte Kornklassen ein Bewertungshintergrund aufgebaut werden. Nachdem die Taurate aus der Ableitung der Regressionskurve der Tauleistungswerte ermittelt wird, werden die Diagramme der Tauraten ohne statistische Schwankungen dargestellt.

Tauleistung und Taurate bei verschiedenen Kornklassen

In Bild 2 sind die Ergebnisse der Tauleistungen aller Temperaturen und Kornklassen zusammengefasst. Dabei lässt sich erkennen,

dass die Abnahme der Tauleistung mit der Temperatur anhand der 2,5-°C-Sprünge nahezu konstant bleibt und sich relativ unabhängig in Bezug auf die Kornklasse darstellt, d. h., der Einfluss der Kornklasse auf die Tauleistung ist nicht signifikant, wenn die Streuung der Ergebnisse in Betracht gezogen wird.

Bild 3 stellt den Vergleich zwischen Taurate und Kornklasse dar. Dabei lässt sich erkennen, dass die grobe Körnung die stärkste Temperaturanfälligkeit in Bezug auf die kurz- und mittelfristigen Tauraten aufweist. Absolut gesehen zeigt die feine Körnung bei kurzfristiger Betrachtung (5 min Einwirkzeit) eine leicht höhere Taurate als die anderen beiden Körnungen, was auf die kornspezifisch größere Oberfläche zurückzuführen sein dürfte. Nach 30 min Einwirkzeit liegt die Taurate aller Körnungen auf vergleichbarem Niveau.

3 Tauleistung flüssiger Taumittel

3.1 Hintergrund

In diesem Abschnitt wird die alternative Ausbringform von Taumitteln in Form von Sole untersucht. Dazu wurden standardisierte Versuche entwickelt, die es erlauben, die Tauleistung der Taumittel in flüssiger Form zu bestimmen. Um die Tauleistung feststellen zu können, wird im Labor in Metallgefäßen mit definierten Abmessungen ein definiertes Volumen an Wasser gefroren. Diese Eiskörper, die eine definierte Einbuch-

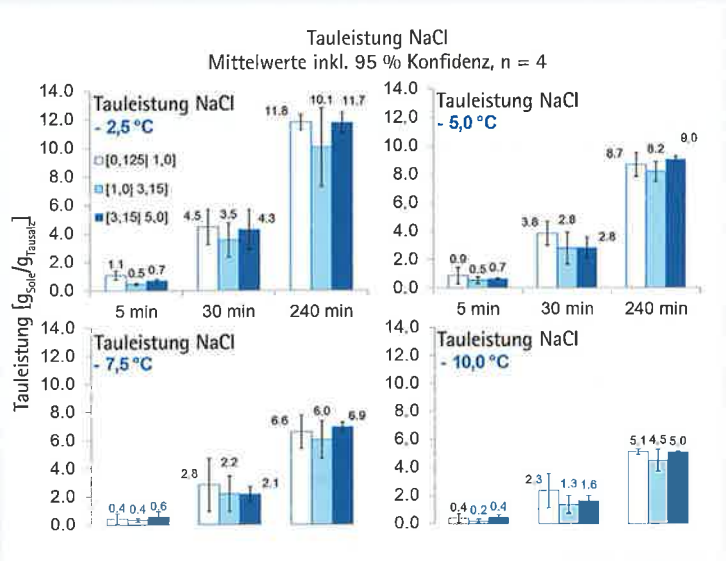


Bild 2: Vergleich Tauleistung – Kornklasse

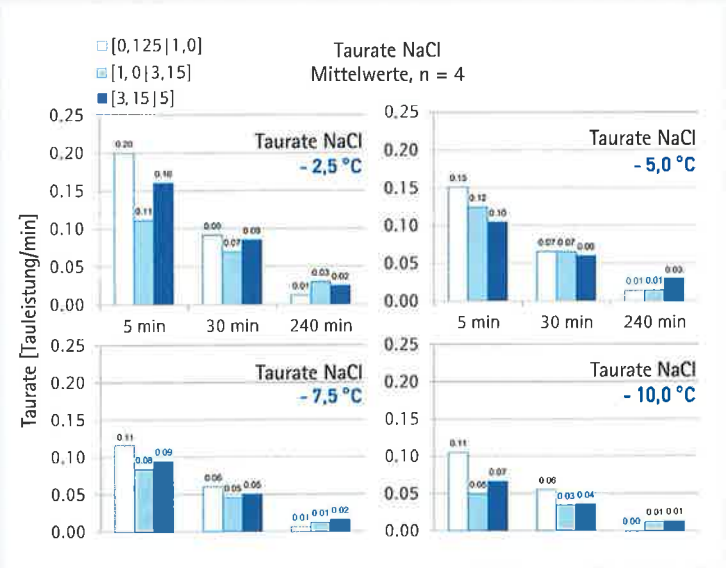


Bild 3: Vergleich Taurate – Kornklasse

Taumittel	Sole-Konzentration [M.-%]	Prüftemperatur [°C]			Prüfungen je Taumittel	zeitliche Bestimmungen je Test	Bestimmungen je Taumittel
		- 2,5	- 5	- 7,5			
NaCl	20	4	4	4	12	9	108
NaCl	24	4	4	4	12	9	108
$CaCl_2$	20	4	4	4	12	9	108
$CaCl_2$	30	4	4	4	12	9	108
		SUMME			48		432

Tabelle 2: Übersicht Prüfprogramm Tauleistung flüssiger Taumittel NaCl und $CaCl_2$

Bild 4: Tauleistung – Vergleich von NaCl-Sole und $CaCl_2$-Sole

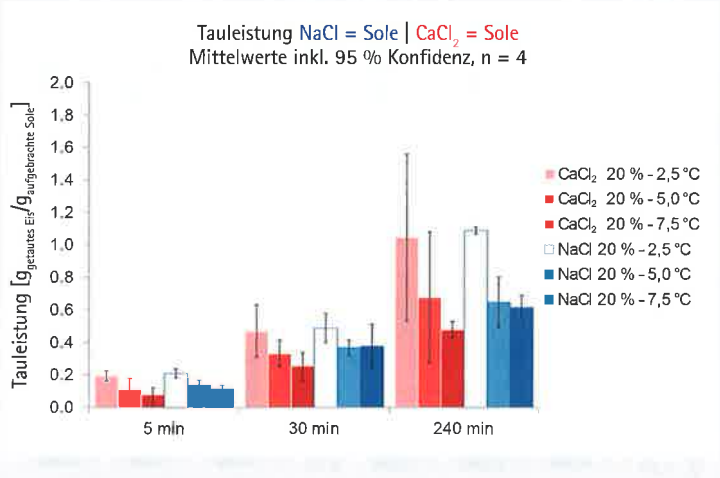
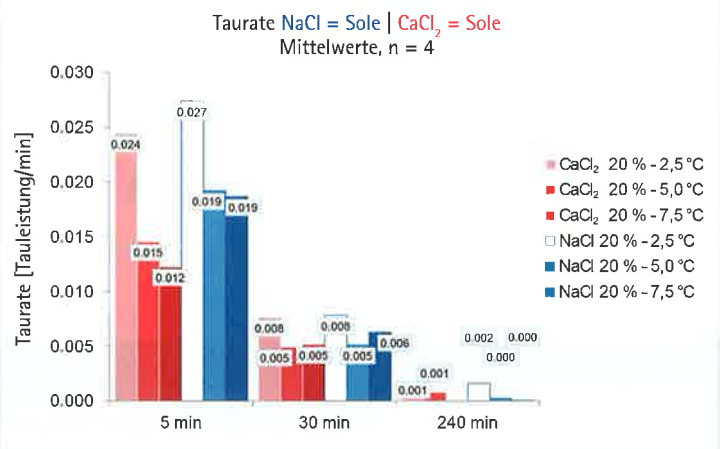


Bild 5: Taurate – Vergleich von NaCl-Sole und $CaCl_2$-Sole



tung an der Oberfläche aufweisen, werden bei verschiedenen Temperaturen mit definiertem Volumen des jeweiligen Taumittels begossen und nach bestimmten Zeiträumen die Menge der abgetauten Sole bestimmt. Detaillierte Informationen zum Prüfprozedere sind in (Nutz 2015; Hofko, Steiner, Hoffmann 2015) enthalten.

3.2 Materialien und Prüfmethoden

Für sämtliche Bestimmungen der Tauleistung von flüssigen Taumitteln wurde Natriumchlorid (NaCl) verwendet, das standardmäßig im Winterdienst eingesetzt wird. Zudem wurde Calciumchlorid ($CaCl_2$) verwendet. Das getrocknete und in Pulverform vorliegende Salz ist der Reinheitsklasse ≥ 98 % zuzuordnen und besitzt eine molare Masse von 110,99 g/mol.

3.3 Prüfprogramm

Tabelle 2 zeigt den Umfang sämtlicher Bestimmungen der Tauleistung von flüssigen Taumitteln. Dabei wurden mit den Taumitteln NaCl und $CaCl_2$ jeweils 2 verschiedene Solen hergestellt, bei denen die Konzentration variiert wurde. Diese 4 flüssigen Taumittel wurden bei 3 verschiedenen Temperaturen geprüft. Die Bestimmungen wurden jeweils bei 9 verschiedenen Einwirkdauern durchgeführt. Die Ergebnisse sind jeweils auf Basis einer 4-fachen Bestimmung abgeleitet.

3.4 Prüfdurchführung und Auswertung

Die Auswertung der Tauleistung erfolgt mithilfe der Formel 3. Dabei wird mit den Kennwerten M_{Sole} (abgegossene Sole) und $M_{TMfluid}$ (aufgebrachtes Taumittel) ermittelt. Der Zähler der Formel ergibt sich aus der Differenz von abgegossener Sole M_{Sole} und aufgebrachtem Taumittel $M_{TMfluid}$. Somit gibt dieser Wert die Menge des abgetauten Eises an, welche im Verhältnis zum aufgebrachten Taumittel $M_{TMfluid}$ die Tauleistung angibt.

Formel 3: Massenbezogene Tauleistung flüssiger Taumittel

$$TL_{M,fluid}(t) = \frac{M_{Sole}(t) - M_{TMfluid}}{M_{TMfluid}}$$

$TL_{M,fluid}$ Massenbezogene Tauleistung flüssiger Taumittel [g/g] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer t

M_{Sole} abgegossene Sole [g] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer t

$M_{TMfluid}$ aufgebrachte Taumittelmenge (aufgebrachte Sole) [g]

Formel 4: Massenbezogene Taurate eines Taumittels

$$TR_{M,i}(t) = \frac{dTL_{M,i}(t)}{dt}$$

$TR_{M,i}$ Massenbezogene Taurate eines Taumittels i in [g/(g · Zeiteinheit)]

$TL_{M,i}$ Massenbezogene Tauleistung eines Taumittels [g/g] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer

3.5 Ergebnisse

Bilder 4 und 5 stellen einen Vergleich der beiden Taumittel NaCl und $CaCl_2$ her. Dabei werden die 20-%-Konzentrationen dargestellt, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Bei NaCl-Solen zeigen höhere Konzentrationen (24 % zu 20 %) höhere Tauleistungen und Tauraten bei - 2,5 °C und - 5,0 °C. Dies kehrt sich jedoch bei - 7,5 °C um. Nachdem eine Konzentration von 24 % bei NaCl-Sole sehr nahe an der Sättigungsgrenze liegt, kann es bei tieferen Temperaturen zum Ausfall von Hydrohalit kommen. Dadurch

reduziert sich die Tauleistung, da das Kristall Hydrohalit keine Tauwirksamkeit aufweist. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass in der Praxis die Sole-Konzentration um einige Prozentpunkte unterhalb der Sättigungsgrenze liegt, das heißt im Fall von NaCl nicht über 20 bis 22 %.

Die Ergebnisse zeigen zudem, dass eine NaCl-Sole Streuung bis - 7,5 °C möglich ist, da auch bei dieser Temperatur noch Tauleistung im Laborversuch erkennbar ist. Tiefere Temperaturen wurden im Zuge dieses Forschungsprojektes nicht untersucht, weshalb die Grenze von - 7,5 °C als vorläufig zu betrachten ist. Tiefere Anwendungstemperaturen könnten bei entsprechendem Nachweis und ausreichender Solekonzentration möglich sein.

4 Rieselfähigkeit

4.1 Hintergrund

Durch die Anfeuchtung des Streusalzes kann es zu Klumpenbildung kommen, die sich negativ auf die Rieselfähigkeit in Lagersilos auswirkt. Dadurch werden die Befüllung der Streufahrzeuge und das Ausbringen erschwert. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden daher auch Untersuchungen durchgeführt, die klären sollen, welche möglichen Ursachen für Verklumpung infrage kommen. Dafür wurden folgende Analysen angestellt:

- Bestimmung des Mikroklimas im Salzsilo über mehrere Monate
- Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes zu verschiedenen Zeitpunkten der Logistikkette
- Entwicklung der Rieselfähigkeit im Verlauf einer Trocken-Feucht-Trocken-Periode.

Die Untersuchungen zu den ersten beiden Punkten führten zu keinen wesentlich neuen Ergebnissen. Beim Mikroklima im Salzsilo wurden Temperatur und Luftfeuchte während 4 Monaten im Sommer und Herbst 2014 kontinuierlich aufgezeichnet. Dies geschah in zwei baugleichen Holzsilos, wobei ein Silo teilweise befüllt war und ein weiteres kein Streusalz beinhaltete. Dabei wurde festgestellt, dass keine signifikanten Temperaturunterschiede auftreten. Weiters erkennt man am Luftfeuchtigkeitsverlauf, dass die Werte im befüllten Silo leicht geringere Schwankungen aufweisen. Dies kann mit einer Feuchtigkeitsaufnahme des Salzes und somit einer Pufferwirkung zu tun haben. Eine weitere, mögliche Ursache der größeren Schwankung könnte im größeren Luftvolumen des leeren Silos liegen.

Bei der Bestimmung des Feuchtegehalts zu verschiedenen Zeitpunkten der Logistikkette (Salzlagerhalle, Lkw vor dem Einblasen in das Silo, Silo nach dem Einblasen) zeigte sich keine signifikante Veränderung der Feuchte.

Bei der Entwicklung der Rieselfähigkeit im Verlauf einer Trocken-Feucht-Trocken-Periode konnten jedoch interessante Phänomene beobachtet werden, die im Weiteren näher behandelt werden sollen.

4.2 Materialien und Prüfmethoden

Zur Bewertung der Rieselfähigkeit wurden Versuche an der „Auslaufbox nach Sonntag" (Sonntag, Bosewitz; Gräbe, Woidasky, Gaul 2011; Sonntag) durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Quaderbox mit einer zu öffnenden Seitenfläche. Durch schlagartiges Öffnen der Seitenfläche läuft das zu prüfende Material solange aus der Box aus, bis sich eine stabile Ebene eingestellt hat. Dabei kann der Masseanteil des ausgeströmten Materials (Auslaufrate) und der Reibungswinkel der Ebene bestimmt wesrden.

4.3 Prüfprogramm

Tabelle 3 zeigt das Prüfprogramm der Rieselfähigkeitsversuche. Dabei wird die Veränderung der Rieselfähigkeit in einer Trocken-Feucht-Trocken-Periode ermittelt. Die Versuche wurden sowohl an Steinsalz als auch an Siedesalz durchgeführt.

Taumittel	Bestimmung der Rieselfähigkeit			Σ
	Feuchtigkeitszustand			
	trocken	feucht (0,5 M.-%)	getrocknet	
Steinsalz 0,125|1,0	4	4	4	12
Siedesalz 0,125|1,0	3	3	3	9
			SUMME	21

Tabelle 3: Prüfprogramm Rieselfähigkeit für Stein- und Siedesalz (NaCl)

4.4 Prüfdurchführung und Auswertung

Zur Bestimmung der Rieselfähigkeit wurde die zu prüfende Probe gesiebt und 12 Stunden bei 120 °C getrocknet. Um die durch die Trocknung entstandene Klumpenbildung zu beseitigen, wurde die Probe vor dem Einfüllen in die Auslaufbox nochmals gesiebt.

Die Auslaufbox wurde bis zum oberen Rand befüllt und mithilfe einer Wasserwage plan eingerichtet. Danach wurde der Öffnungsvorgang betätigt, womit ein Teil des befüllten Materials ausrieselt. Das Verhältnis der Masse des ausgelaufenen Materials in Bezug auf die Ausgangsmasse wird als Ausflussrate [M.-%] dargestellt. Zusätzlich kann der innere Reibungswinkel [°] bestimmt werden, der als Maß der Kohäsion gilt.

Um die Versuche der Trocken-Feucht-Trocken-Periode durchführen zu können, wurden die offengetrockneten und klumpenfreien Proben in einem großflächigen Gefäß verteilt und mit einer Sprühflasche mit Wasser benetzt. So konnte die gewünschte Feuchtigkeit (0,5 M.-%) exakt dosiert werden. Die Probe wurde in weiterer Folge gut durchmischt und anschließend auf Rieselfähigkeit geprüft. Um die Veränderung bei einer weiteren Trocknung der Probe untersuchen zu können, wurde die Auslaufbox nach dem Versuch wieder mit dem feuchten Material befüllt und bei 60 °C für 12 h getrocknet. So konnte der Trocknungsvorgang im Silo näherungsweise simuliert werden.

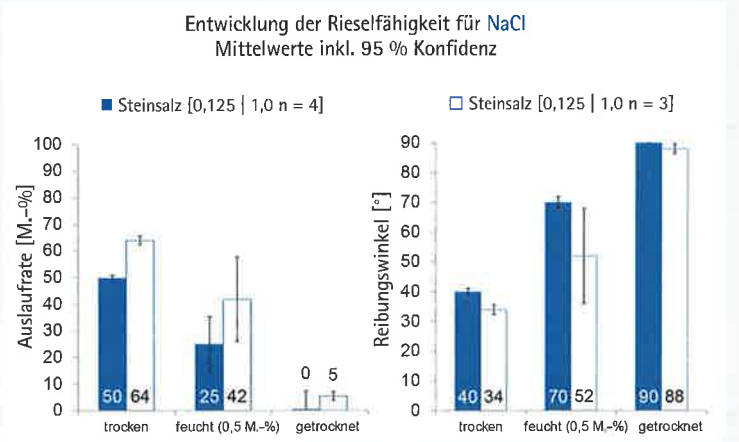


Bild 6: Entwicklung der Rieselfähigkeit im Verlauf einer Trocken-Feucht-Trocken-Periode

Bild 7: Auslaufbox, links: Siedesalz feucht mit 0,5 M.-% Wasser, rechts: Siedesalz in der Box getrocknet

4.5 Ergebnisse

Die Messungen der Rieselfähigkeit anhand der Trocken-Feucht-Trocken-Perioden zeigen, dass trockenes Salz eine Auslaufrate und somit Rieselfähigkeit von 50–64 M.-% zeigt. Bei feuchtem Salz (0,5 M.-%) sinkt die Rieselfähigkeit auf 25–42 M.-%. Eine wiederholte Trocknung des Salzes führt zu einer starken Verringerung der Rieselfähigkeit auf 0–5 M.-%. Details sind Bild 6 zu entnehmen. Eine hohe Auslaufrate und ein niedriger Reibungswinkel indizieren eine gute Rieselfähigkeit. Somit ist zu erkennen, dass sich die Werte (sinkende Auslaufrate/steigender Reibungswinkel) im Zuge der Trocken-Feucht-Trocken-Periode sukzessive und signifikant verschlechtern.

Bild 7 zeigt beispielhaft die Situation von feuchtem Salz (links) und rechts nach Trocknung in der Auslaufbox. Dabei kann man erkennen, dass es speziell nach erneuter Trocknung nahezu kein rieselfähiges Material gibt. Legt man diese Ergebnisse auf ein Salzsilo um, so wird deutlich, dass bei einer langfristigen Lagerung ohne Bewegung und zusätzlichem Austrocknen, selbst von einer geringen Anfangsfeuchte von 0,5 M.-% aus, eine sehr kompakte Lagerung bzw. praktisch kompletter Verlust der Rieselfähigkeit des Streuguts die Folge sein kann.

5 Wirtschaftliche Eignungskriterien auftauender Streumittel

5.1 Aspekte der technischen Bewertung und Eignung

Gemäß den gesetzlich definierten Grundsätzen der Sparsamkeit, Wirtschaftlichkeit und Zweckmäßigkeit ist für Beschaffungsvorgänge der öffentlichen Verwaltung eine rationale, nachvollziehbare Entscheidung ordnungsgemäß bzw. rechtmäßig (Art. 126b Abs. 5 B-VG). Ziel dieses Abschnitts ist es, die im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten bzw. dargestellten Eignungskriterien für auftauende Streumittel im Hinblick auf die technische Eignung sowie eine mögliche Entscheidungsfindung systematisch zusammenzufassen. Sie decken wesentliche Aspekte einer fundierten Entscheidung im üblichen Winterdiensteinsatz ab, erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit, zumal je nach Einsatzgebiet auch zusätzliche oder andere Kriterien (Ausbringbarkeit, Griffigkeit, Grenzwerte, Korrosion etc.) maßgebend sein können.

5.1.1 Rieselfähigkeit

Die Rieselfähigkeit kann als Maßstab für die Qualität bei der Anlieferung sowie der Lagerfähigkeit dienen und ist wesentlich von der Feuchtigkeit abhängig. Kommt es aufgrund ungünstiger Eigenschaften oder Lagerungsbedingungen zu Klumpenbildung, werden die Befüllung der Streufahrzeuge und das Ausbringen erheblich erschwert.

Die Bestimmung der Rieselfähigkeit kann für herkömmliche trockene Streumittel (z. B. Steinsalz/Siedesalz) auf Basis der Auslaufrate (Auslaufbox nach Sonntag) ermittelt werden.

Gemäß dem Stand der Erkenntnisse wird eine Auslaufrate von mindestens 40 % bei Lieferung unter Einhaltung eines Feuchtegehalts kleiner 0,5 % empfohlen.

Bei Einsatz von Antibackmitteln sind die entsprechenden Grenzwerte der geltenden Normen und Richtlinien einzuhalten.

5.1.2 Gefrierpunktverlauf

Der Gefrierpunktverlauf zeigt den charakteristischen Zusammenhang von (Sole-)Konzentration und zugehörigem Gefrierpunkt bis zum Eutektischen Punkt bzw. minimalen Gefrierpunkt für das auftauende Streumittel. Er gibt zudem Aufschluss über die grundsätzliche Eignung als Taumittel je nach Temperaturbereich sowie die (theoretisch) taubare Menge an Eis und Schnee bei langer Einwirkung. Für einen effizienten Winterdienst auf Straßen vor allem in Lagen über 500 m Seehöhe wird empfohlen, auftauende Streumittel mit einem minimalen Gefrierpunkt kleiner als - 15 °C bzw. darunter von zumindest kleiner - 10 °C zur Vermeidung technischer Probleme bei tiefen Temperaturen zu verwenden.

5.1.3 Tauleistung fest massebezogen

Die massebezogene Tauleistung fester Auftaumittel gibt vereinfacht an, welche Menge Eis bei konstanter Temperatur in einer festgelegten Zeit unter standardisierten Bedingungen getaut werden kann. Dieses Kriterium ist für die Einsatzpraxis insofern von entscheidender Bedeutung, als damit die Dauer bis zum vollständigen Eintritt der erwarteten Wirkung praxisnah beschrieben werden kann. Dazu wird in den Versuchen die Tauleistung nach 5 Minuten, 30 Minuten und 240 Minuten jeweils bei - 2,5 °C, - 5,0 °C, - 7,5 °C und - 10,0 °C vierfach bestimmt, wodurch das übliche Anwendungsspektrum im Winterdienst vollständig abbildbar ist. Für die Anwendungspraxis wird empfohlen, die nachstehend angeführten Mittelwerte von Stein- bzw. Siedesalz ohne spezifische Berücksichtigung der Korngröße als Refe-

renz und Bewertungshintergrund für Vergleiche zu verwenden.

5.1.4 Tauleistung flüssig massebezogen

Die massebezogene Tauleistung flüssiger Auftaumittel gibt vereinfacht an, welche Menge Eis mit einer Einheit eines flüssigen Taumittels bzw. einer Sole definierter Konzentration bei konstanter Temperatur in einer festgelegten Zeit unter standardisierten Bedingungen getaut werden kann. Dieses Kriterium gewinnt durch den verstärkten Einsatz von Streuungen mit erhöhtem Soleanteil sowie reiner Solestreuung stark an Bedeutung und erlaubt eine praxisnahe Beschreibung der sich ergebenden Wirkungen. Dazu wird in den Versuchen die Tauleistung nach 5 Minuten, 30 Minuten und 240 Minuten jeweils bei - 2,5 °C, - 5,0 °C und - 7,5 °C vierfach bestimmt, wodurch das übliche Anwendungsspektrum flüssiger Auftaumittel im Winterdienst gesichert abbildbar ist. Für die Anwendungspraxis wird empfohlen, die in Tabelle 5 angeführten Mittelwerte von einer NaCl-Sole mit 20 % Konzentration für den Standardfall sowie $CaCl_2$-Sole mit 30 % Konzentration bei erhöhten Anforderungen als Referenz und Bewertungshintergrund für Vergleiche zu verwenden.

Dauer/Temperatur	- 2,5 °C	- 5,0 °C	- 7,5 °C	- 10,0 °C
5 min	0,8	0,7	0,5	0,3
30 min	4,1	3,1	2,4	1,7
240 min	11,2	8,6	6,5	4,9
Theoretisch (∞)	28,9	14,2	9,5	7,2

Tabelle 4: Empfehlung mittlere Referenzwerte Tauleistung fest massebezogen [g/g] (Stein-/Siedesalz)

Dauer/ Temperatur	- 2,5 °C		- 5,0 °C		- 7,5 °C	
	NaCl	$CaCl_2$	NaCl	$CaCl_2$	NaCl	$CaCl_2$
5 min	0,2	0,4	0,1	0,3	0,1	0,3
30 min	0,5	0,9	0,4	0,8	0,3	0,7
240 min	1,1	1,6	0,6	1,4	0,5	1,2
Theoretisch (∞)	5,8		2,8		1,9	

Tabelle 5: Empfehlung mittlere Referenzwerte Tauleistung flüssig massebezogen [g/g] (20 % NaCl; 30 % $CaCl_2$)

5.2 Zuschlagskriterium monetäre Tauleistung und Taurate

5.2.1 Monetäre Tauleistung und Taurate – Allgemein

Zur Berücksichtigung der Kosten der Streumittel bei vergleichbarer Einwirkzeit und Umgebungstemperatur können die Tauleistung und Taurate in Relation zu den Einheitskosten des Taumittels gesetzt werden. Daraus ergeben sich die monetäre Tauleistung als vergleichbare Kosten um ein Gramm Eis nach einer bestimmten Einwirkzeit und Umgebungstemperatur tauen zu können. Die monetäre Taurate gibt im Verhältnis dazu an, welche Tauwirkung pro Minute nach einer bestimmten Zeit je investierten Euro erzielbar ist.

Formel 5: Monetäre Tauleistung fester Taumittel

$$TL_{€,fest}(t) = \frac{M_{Sole}(t)[g]}{M_{TMfest}[g] \cdot P_{TMfest}\left[\frac{€ct}{g}\right]}$$

$TL_{€,fest}$ Monetäre Tauleistung fester Taumittel [g/€ct] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer t

M_{Sole} abgegossene (getaute) Sole [g] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer t

M_{TMfest} aufgebrachte Taumittelmenge [g]

P_{TMfest} Einheitspreis des reinen Taumittels [€ct/g]

Formel 6: Monetäre Tauleistung allgemein

$$TL_{€,i}(t) = \frac{TL_{M,i}(t)}{P_{TM_i}}$$

$TL_{€,i}$ Monetäre Tauleistung eines Taumittels [g/€ct] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer t

$TL_{M,i}$ Massenbezogene Tauleistung eines Taumittels [g/g] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer

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

Formel 7: Monetäre Taurate eines Taumittels

$$TR_{€,i}(t) = \frac{dTL_{€,i}(t)}{dt}$$

$TR_{€,i}$ Monetäre Taurate eines Taumittels i in [g/(Geldeinheit · Zeiteinheit)]

$TL_{€,i}$ Monetäre Tauleistung eines Taumittels [g/€ct] in Abhängigkeit von der Einwirkdauer t

5.2.2 Beispiel monetäre Tauleistung und Taurate fester Taumittel

Zur Berechnung herangezogene Materialien

- **NaCl fest** (Probe Anbieter XY)
  - Angenommener Preis: 85 €/Tonne bzw. 0,0085 €ct/Gramm
  - Reinheit: 97 % (inkl. Feuchtegehalt ≤ 0,5 %)
  - Rieselfähigkeit bei Anlieferung: 46 % (Mittelwert 3 Versuche)
  - Eutektikum: - 22,5 °C bei 23,6 % Konzentration
  - Reine Streumittelkosten: 85,0/0,97 = 87,63 €/Tonne = 8.763 Cent/10^6 = **0,008763 Cent/g**
  - Monetäre Tauleistung fest: z. B. 8,6 g/g lt. Tabelle 4 bei – 5 °C nach 240 min → 8,6/0,008763 = **981,4 g Eis/Cent**

Bsp. mögliche Beurteilung: Das angebotene Streumittel erfüllt die Anforderungen hinsichtlich Reinheit und Feuchtigkeit bei Anlieferung und ist frei von unzulässigen Verunreinigungen. Die Rieselfähigkeit bei Anlieferung entspricht ebenfalls den Anforderungen.

Die Tauleistung nach 5 min, 30 min. und 240 min bei - 2,5 °C, - 5,0 °C, - 7,5 °C und – 10,0 °C entspricht den empfohlenen Werten für NaCl. Auf Basis des angebotenen Preises ergibt sich die monetäre Tauleistung gemäß Bild 8. Insgesamt entspricht das angebotene auftauende Streumittel den technischen Anforderungen und weist im Vergleich zu alternativen Angeboten eine günstigere/gleiche/ungünstigere Wirtschaftlichkeit auf.

5.2.3 Beispiel monetäre Tauleistung und Taurate flüssiger Taumittel

Zur Berechnung herangezogene Materialien

- **20 % NaCl – Sole flüssig** (Probe Anbieter XY)
  - Angenommener Preis: Für 20 % Sole fertig geliefert **22 €/1.000 l**

Bild 8: Bsp. monetäre Tauleistungen Siedesalz

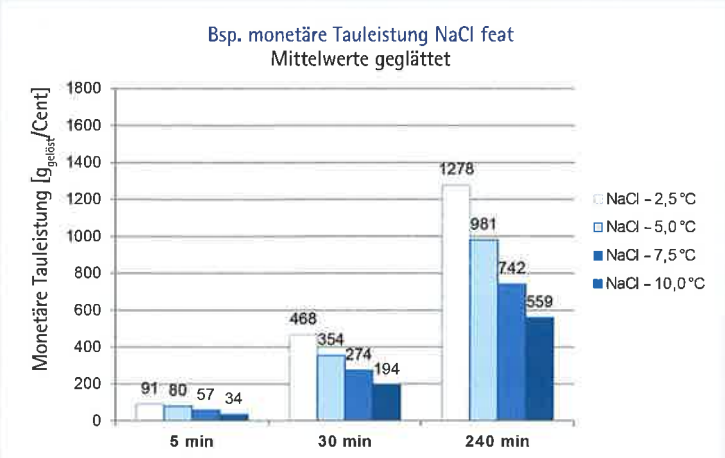
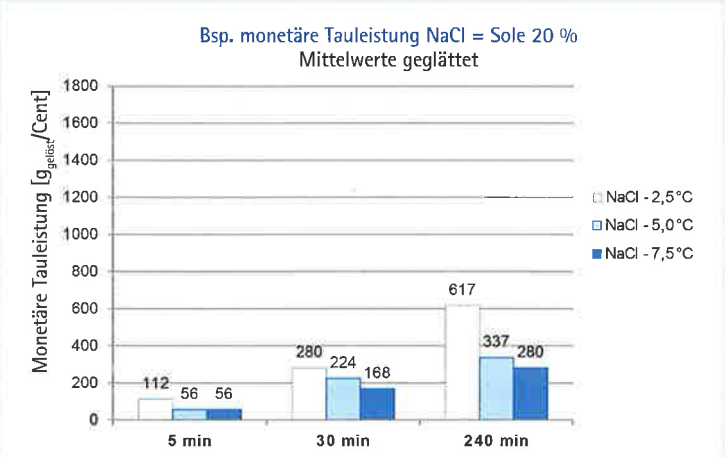


Bild 9: Bsp. Monetäre Tauleistungen 20 % Sole



- Kontrolle Dichte: 2,17 · 20 % + 1,00 · 80 % = **1,234 g/cm³**
- Einheitspreis: 2.200 Cent/(1.000 l · 1.000 cm³) = 0,0022 Cent/cm³ → 0,0022 [Cent/cm³]/1,234 [g/cm³] = **0,001783 Cent/g**
- Kontrolle Gefrierpunkt: - 0,00086 · 20^3 + 0,01548 · 20^2 - 0,76814 · 20 = **- 16,05 °C**
- Monetäre Tauleistung flüssig: z. B. 0,6 g lt. Tabelle 5 bei – 5 °C nach 240 min → 0,6 [g/g]/0,001783 [Cent/g] = **337 g/Cent**

Bsp. mögliche Beurteilung: Das angebotene Streumittel erfüllt die Anforderungen hinsichtlich Reinheit bei Anlieferung, weist die erforderliche Konzentration von 20 % auf und ist frei von unzulässigen Verunreinigungen.

Die Tauleistung nach 5 min, 30 min. und 240 min bei - 2,5 °C, - 5,0 °C, - 7,5 °C und - 10,0 °C entspricht den empfohlenen Werten für Natriumchlorid. Auf Basis des angebotenen Preises ergibt sich die monetäre Tauleistung flüssig gemäß Bild 9. Insgesamt entspricht das angebotene auftauende Streumittel den technischen Anforderungen und weist im Vergleich zu alternativen Angeboten eine günstigere/gleiche/ungünstigere Wirtschaftlichkeit auf.

6 Ausblick

Aus den Ergebnissen des vorliegenden Projekts lassen sich vor allem zwei Fragestellungen für zukünftige Forschungsprojekte ableiten:

- Bisher wurde die Tauleistung von festen und flüssigen Taumitteln in standardisierten Prüfungen ermittelt und ein Bewertungshintergrund aufgebaut. In der Praxis dominiert inzwischen die Feuchtsalzstreuung, also eine Kombination aus festen und flüssigen Taumitteln. Theoretisch kann aus gewichteter Mittelung der Tauleistung flüssiger und fester Taumittel die Tauleistung von Feuchtsalzstreuung ermittelt werden. Dies soll anhand von einzelnen Beispielen validiert werden, indem aus den bestehenden Verfahren ein Laborverfahren weiterentwickelt wird, das auch die Ermittlung der Tauleistung einer Feuchtsalzstreuung ermöglicht.
- Zudem wurden im Rahmen der Arbeit an der Rieselfähigkeit wesentliche Erkenntnisse zu Einflussfaktoren auf die Rieselfähigkeit gewonnen. Im nächsten Schritt könnten darauf aufbauend weitere Fragestellungen behandelt werden: Wo liegt der Grenzfeuchtegehalt, ab dem es bei Trocknung der Probe zu Verfestigung und damit Abnahme der Rieselfähigkeit kommt? Wie hoch ist der notwendige Energieaufwand, um verfestigte Proben wieder zu mobilisieren? Welchen Einfluss haben Temperatur- und Feuchteschwankungen auf die Rieselfähigkeit? Zudem können unterschiedliche Antibackmittel standardisiert geprüft und bewertet werden sowie mögliche Kosten der Lagerhaltung sowie Aufbereitung näher betrachtet werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich herzlich bei den Österreichischen Bundesländern, dem Österreichischen Verkehrssicherheitsfonds (VSF) des Bundeministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) und der ASFINAG für die Finanzierung des Forschungsprojekts.

Literaturverzeichnis

Bücker, R. 2003: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. München, Germany: Oldenbourg Wissenschaftsverlag

Gräbe, G.; Woidasky, J.; Gaul, T. 2011: Ressourcen- und energieoptimierte Baustoffe am Beispiel von Asphaltprodukten - „Recycling-Asphalt". Pfinztal, Germany: Fraunhofer Institut für Chemische Technologie

Hoffmann, M.; Blab, R.; Nutz, P. 2012: Optimierung der Feuchtsalzstreuung. In: Forschungsarbeiten des österreichischen Verkehrssicherheitsfonds. Wien: Technische Universität Wien

Hofko, B., Steiner, B.; Hoffmann, M. 2015: Eignungskriterien für auftauende Streumittel. In: Forschungsarbeiten des österreichischen Verkehrssicherheitsfonds. Wien: Technische Universität Wien

Nutz, P. 2015: „Entwicklung eines Straßenzustandsmodells beim Einsatz auftauender Streumittel im Winterdienst." Dissertation, Institut für Verkehrswissenschaften, Technische Universität Wien

Sonntag, A. „http://www.sonntag-kunststoffe.de/." Accessed 9.3.2016

Sonntag, A.; Bosewitz, S. „Die Bestimmung der Rieselfähigkeit von Agglomeraten mit einer Auslaufbox." www.recyclingportal.eu

Bundes-Verfassungsgesetz BGBl. 1930/1 i. d. F. BGBl. I 2009/106