



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen

La physique entre sel, neige et pneu

The physics between salt, snow and tyre

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
Dr. Martin Schneebeli
Dr. Sabine Leisinger

Forschungsprojekt VSS 2012/601 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

April 2015

1511

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen

La physique entre sel, neige et pneu

The physics between salt, snow and tyre

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
Dr. Martin Schneebeli
Dr. Sabine Leisinger

Forschungsprojekt VSS 2012/601 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

April 2015

1511

Impressum

Projektleitung

Dr. Martin Schneebeil

Mitglieder

Dr. Sabine Leisinger

Matthias Jaggi

Jan Osterwalder

Federführende Fachkommission

Fachkommission 6: Umwelt und Unterhalt

Begleitkommission**Präsident**

Martin Rösti

Mitglieder

Duri Deflorin

Reto Knuchel

Dr. Matthias Schärli

Jeannot Wagner

Martin Wyss

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	6
	Résumé	9
	Summary	11
1	Einleitung	13
2	Grundlagen	15
2.1	Das Material Schnee	15
2.2	Schneelumwandlung auf der Strasse	15
3	Experimente und Methoden	17
3.1	Experiment 1 – Schnee - Solemischungen.....	19
3.2	Experiment 2 – Schnee-kristallines Salz.....	21
4	Resultate und Diskussion	23
4.1	Experiment 1 – Test-Studie 1 und Studie 2	23
4.2	Experiment 2 - Studie 3.....	28
4.3	Experiment 2 – Studie 4	31
	Anhänge	33
	Literaturverzeichnis	38
	Abbildungsverzeichnis.....	40
	Projektabschluss	43
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	46

Zusammenfassung

Jährlich werden grosse Mengen an Salz im Winter auf die Strassen gestreut. Durch das Salzen wird verhindert, dass sich eine kompakte festgepresste Schneeschicht auf der Fahrbahn bildet, welche einen niedrigen Reibungskoeffizienten aufweist und somit für die Fahrzeuglenker gefährlich ist. Das Salzen ist jedoch für die Umwelt schädlich, da dieses als Schmelzwasser von der Strasse weg fliesst und die Gewässer belastet. Dazu kommt, dass das Salz an Fahrzeugen und Strassen zu verstärkter Korrosion führt. Nicht zuletzt muss auch der finanzielle Aufwand für das Salzen in Betracht gezogen werden.

In diesem Zusammenhang wird klar, dass es von grossem Nutzen wäre, wenn das System Salz, Schnee und Reifen grundlegend und systematisch auf die ablaufenden thermomechanischen Prozesse hin untersucht und verstanden wird. Mit diesem Wissen könnte vermutlich der Winterunterhalt der Strassen sowohl von der Wirtschaftlichkeit als auch von der Ökologie her optimiert werden.

Dieses Projekt untersucht die physikalischen Eigenschaften von Salz-Schnee-Gemischen. Dabei spielen die wenig bekannten thermodynamischen Prozesse beim Schmelzen des Salzkorns im Schnee und die Verteilung der Sole zwischen den Eiskörnern eine grosse Rolle. Unklar ist auch der Einfluss des Verkehrs durch die Interaktion Schnee-Reifen auf die mechanischen Schneeeigenschaften. Für die Untersuchung der Proben im Kältelabor wurde mit einem Schneereibungsmessgerät und einem Schneepenetrometer gearbeitet, die Struktur des Schnee wurde mit dem micro-Computertomografen analysiert.

Es wurden zwei Arten von Experimenten durchgeführt. Experiment 1 untersuchte zweilagige Schneeproben mit unterschiedlichem Solegehalt auf die Mikrostruktur, die Reibungskoeffizienten und auf die Schneehärte. Die Schneeproben bestanden aus einer hartgepressten salzlosen unteren Schneeschicht und einer zweiten oberen Schicht aus einem Sole-Schnee-Gemisch mit unterschiedlicher Salzkonzentration. Diese Experimente wurden bei -3°C , -6°C und -12°C durchgeführt. Es zeigte sich, dass bereits sehr niedrige Salzkonzentrationen einen grossen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften sowie auf die Reibungskoeffizienten haben. Bei hohen Temperaturen (in den Experimenten bei -3°C) zeigte sich, dass die Salzkonzentration wenig Einfluss auf die Reibungskoeffizienten hat. Inwiefern sich dieses Resultat auf den Reibungskoeffizienten von Fahrzeugen übertragen lässt, müssten weitere Experimente zeigen.

In Experiment 2 wurde die Wirkung von kristallinem Salz im Schnee beziehungsweise im Eis untersucht. Studie 3 beobachtete den Schmelzvorgang eines Salzkorns auf einer Eisoberfläche. Die Schmelzzeit, das Schmelzvolumen und die Schmelzform wurden dabei analysiert. Es zeigte sich, dass ein schmelzendes Salzkorn nicht eine Solelache auf der Eisoberfläche bildet, sondern dass sich das Salz beim Schmelzen in das Eis einfrisst und ein mit Sole gefülltes Loch bildet. Dieser Prozess läuft rasch ab; die mittlere Eindringgeschwindigkeit eines Salzkorns beträgt 0.65 mm/min bei -15°C . Das bedeutet, dass das gestreute Salzkorn auf den Strassen innert weniger Minuten sich durch den Schnee geschmolzen hat und vermutlich als Schmelzwasser von der Strasse fliesst. Die Verweildauer des Salzes im Schnee ist gemäss unseren Untersuchungen sehr kurz, was teilweise im Widerspruch zu anderen Untersuchungen steht.

Diese Beobachtungen wurden in Studie 4 erhärtet. Schneeproben des vergangenen Winters wurden von der Strasse gesammelt und mit dem micro-CT analysiert. Ein Teil der Probe wurde geschmolzen und die Leitfähigkeit gemessen. Aus diesen Daten konnte die in der Strassenschneeprobe enthaltene Salzkonzentration ermittelt werden. Zusammen mit den Rapporten zur gestreuten Salzmenge an den spezifischen Lokalitäten und Zeiten zeigte sich, dass rund 90% des gestreuten Salzes sich nicht mehr im Strassenschnee befindet.

Dieses Projekt zeigt klar, dass auf dem Gebiet des Strassenunterhalts im Winter Handlungsbedarf im Sinne einer effizienteren und umweltfreundlicheren Methode ohne Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit besteht.

Résumé

Chaque hiver, des quantités importantes de sel sont réparties sur les routes pour leur maintenance. Sans cela, une route enneigée se transforme rapidement en une route verglacée, sur laquelle la conduite est très dangereuse. Le salage empêche donc la formation de couche de neige compacte et/ou de glace sur les routes mais maintient également le coefficient de frottement à une valeur raisonnable. Cependant, l'utilisation du sel comme agent anti-compaction implique certaines conséquences néfastes pour l'environnement. En particulier, la qualité de l'eau potable et les sols sont affectés par le taux élevé de sel dans l'eau de fonte. D'autre part, les solutions salées sont très agressives et peuvent engendrer la corrosion de véhicules et des aménagements routiers de bord de route. Enfin, un autre point important est le coût financier qu'implique le salage en grande quantité des routes.

Dans ce contexte, il semble crucial d'étudier le système sel-neige-pneu de façon systématique en fonction des processus thermodynamiques et mécaniques qui se produisent au sein de ce système. Les retombés de cette étude pourraient être directement applicable à une maintenance plus efficace et écologique des routes enneigées.

Ce projet a pour but l'étude des propriétés physiques de la neige mélangée à du sel. Les processus thermodynamiques sont principalement impliqués dans le phénomène de fonte d'un grain de sel dans la neige. Les propriétés mécaniques de la neige salée sont également importantes pour l'étude de l'interaction neige-pneu mais varient largement en fonction de la circulation. Jusqu'à aujourd'hui, ces aspects n'ont pas du tout été étudiés. Dans ce projet, nous avons donc analysé les propriétés d'échantillons de neige salée par micro-tomographie, testeur de frottement et pénétromètre à haute résolution.

Deux types d'expériences ont été menés. Dans l'expérience 1, nous avons analysé des échantillons constitués de deux couches de neige dont la concentration en solution salée varie. Le but était d'étudier l'influence de la concentration sur la microstructure, le coefficient de frottement et la dureté de la neige. Les échantillons de neige consistent en une première couche de neige très compactée sans sel à la base, et une seconde couche de neige dont le contenu en sel augmente au sommet. Les expériences ont été réalisées à -3°C , -6°C and -12°C . Dans l'ensemble, les résultats montrent que la présence d'une solution salée, même en très faible quantité, influe fortement sur les propriétés mécaniques de la neige ainsi que sur les coefficients de frottement. A des températures élevées, il apparaît clairement que la concentration en sel n'a qu'une faible influence sur le coefficient de frottement. L'application de ces résultats pour la conduite de véhicules nécessite des études supplémentaires.

Dans l'expérience 2, l'effet du sel cristallin sur la glace et la neige a été étudié. Dans l'étude 3, nous avons observé le processus de fonte d'un grain de sel posé à la surface d'un bloc de glace. Le temps de fonte, le volume de fonte et la morphologie de fonte ont été déterminés. De manière surprenante, les résultats montrent qu'un grain de sel fondu ne forme pas une flaque d'eau salée à la surface de la glace, mais forme plutôt un conduit rempli d'eau salée. Ce processus est très rapide ; la vitesse moyenne de fonte d'un grain de sel sur la surface de glace est de $0,65\text{mm/min}$. Cela signifie que le sel distribué sur les routes fond très rapidement dans la neige et s'écoule, probablement, hors de la route, comme le fait l'eau de fonte. En d'autre terme, le temps de résidence du sel dans la neige sur la route est très court.

Ces observations et conclusions sont étayées dans l'étude 4. Des échantillons de neige prélevés lors de l'hiver dernier ont été analysés par micro-tomographie. Une partie de l'échantillon a été fondue afin de déterminer sa conductivité électrique et, ainsi, en déduire la concentration de sel dans la neige. Les résultats ont été comparés à la quantité de sel effectivement répandu sur les routes en des endroits donnés. Nous avons trouvé qu'environ 90% du sel répandu n'est plus contenu dans la neige sur la route. Ce projet montre clairement la nécessité d'agir dans le domaine de la maintenance des routes en

hiver, pour aller vers une méthode de salage plus efficace et plus écologique, sans pour autant négliger la sécurité routière.

Summary

Large quantities of salt are distributed on the roads for winter road maintenance during the winter season. Without chemicals a snowy road would quickly turn into a hard crust of ice creating dangerous driving conditions. The salting prevents the formation of such a compact snow layer on the roads and keeps friction coefficients at a reasonable value. However, the use of salt for anti-compaction involves a couple of disadvantageous consequences concerning the environment. Especially the fresh water quality and soils are affected by the high dosage of salt in the melt water. Furthermore, salt solutions are highly aggressive and induce corrosion on vehicles and on roadside structures. An additional important point is the cost that arises by the efforts to distribute large salt quantities on the roads.

Summarized, it is crucial to investigate the system salt, snow and tyre systematically regarding the thermodynamic and mechanic processes occurring in such a system. The benefit of such studies could then be directly applicable to a more efficient and environmentally friendly winter road maintenance.

This project investigates the physical properties of the snow mixed with salt. When a salt grain melts in snow there are mainly thermodynamic processes going on. Equally important are the mechanical properties of salted snow created by the interaction of traffic. Until now, this aspect has not yet been investigated at all. In this project we snow analyzed the properties of salted snow samples by micro-computertomography (micro-CT), friction tester and high-resolution penetrometer.

There were two sets of experiments carried out. Experiment 1 analyzed two-layered snow samples with varying salt solution content on its microstructure, friction coefficient and snow hardness. The snow samples consisted of a hard-pressed snow layer without salt at the bottom and a second snow layer with increasing salt content at the top. The experiments were carried out at -3°C , -6°C and -12°C . Generally, the results showed that already a very low content of salt solution influenced the mechanical properties strongly as well as the friction coefficients. At high temperatures, it became clear that the salt concentration had a small influence on the friction coefficient. How these results can be applied to driving vehicles can only be answered by additional studies.

In experiment 2 the effect of crystalline salt was investigated in snow and ice. Study 3 observed the melting process of a salt grain laying at the surface of an ice block. Melting time, melt volume and melt morphology were determined. Surprisingly, the results showed that a melted salt grain does not form a pool of salted melt water at the ice surface, but instead the melting salt grain forms a tube filled with salt solution. This process is very quick. The average melting velocity of a salt grain on ice is 0.65 mm/min . This means that the salt on roads melts within very short time through the snow and probably flows off the road as melt water shortly afterwards. The residence time of the salt on the road is very short, which is in contradiction to other studies.

These observations and conclusions were substantiated in study 4. Snow samples collected in the past winter were analyzed by micro-CT. A part of the sample was melted and the electrical conductivity was determined in order to determine the salt concentration in the snow. The results were then compared to the effectively spread salt amount at certain locations. We found that about 90% of the distributed salt is not anymore in the snow on the road. This project shows clearly that there is need of action in the area of winter road maintenance in the sense of a more efficient and environmentally friendly method without neglecting the driving safety.

1 Einleitung

Der Winterdienst des Bundes ist verantwortlich für das Räumen des rund 1890 km grossen Nationalstrassennetzes während den Monaten Oktober bis April. Gestreut wird hauptsächlich mit Salz (Natriumchlorid) und untergeordnet auch mit Sole (Salz-Wasserlösung). Zu Beginn der Wintersaison lagern die Salzlager in der Schweiz 64'000 t Salz und 1900 t Sole. Die pro Durchgang gestreute Salzmenge variiert zwischen 5-20 g/m² und basiert auf Erfahrungswerten (1). Bis zum Ende der Wintersaison werden so 8-40 t Salz pro Strassenkilometer gestreut. Die gestreuten Salzmenngen belasten die Umwelt, insbesondere Pflanzen und Böden (2) (3). Auch das Grundwasser kann durch das hochkonzentrierte, von der Strasse abfliessende Schmelzwasser beeinträchtigt werden. Nebst negativen Umwelteinflüssen verursacht das Salz auf den Strassen Korrosionsschäden an den Fahrzeugen. Bis heute wurde jedoch noch kein Salzersatz gefunden, welcher dieselben Eigenschaften bezüglich Schmelzeffizienz aufweist, und Kosten und Umweltverträglichkeit massiv verbessern könnte. Deshalb wird Salz, mit wenigen Ausnahmen, als Standardstreumittel verwendet.

Es ist wohlbekannt, dass das Salz den Gefrierpunkt von Schnee reduziert. Die dahinter stehende Thermodynamik von Schnee-Salzmischungen, das Sintern von gesalztem Schnee und dessen mechanische Eigenschaften wurden bis heute weder systematisch untersucht noch beschrieben. Vermutlich spielen nicht nur rein chemisch-physikalische Prozesse eine Rolle, sondern auch die mechanische Zerstörung der Schneestruktur durch die Reifen. Es ist jedoch unklar, weshalb Salz die Befahrbarkeit verbessert. Gerade durch die Komplexität des Systems Schnee-Salz ist es entscheidend Grundlagen zu schaffen, und so die Salzstreuung zu optimieren. Längerfristig sollte es das Ziel sein, die Strassen im Winter in Bezug auf Wirksamkeit, Verkehrssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Ökologie effizienter und umweltschonender zu unterhalten.

Bis heute gibt es nur sehr wenige theoretische und experimentelle Untersuchungen, welche die Änderung der Schneestruktur und deren Eigenschaften auf gesalzten Strassen untersucht. Empirisch gesammelte Daten bilden den Stand der Forschung. Diese Daten sind jedoch kaum vergleichbar und können die physikalischen Prozesse nicht erklären (4) (5) (6). Die Studie "Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen" von Lindenmann et al. (2010) (1) zeigt, wie komplex bereits das System Schnee-Reifen ohne Berücksichtigung des Salzes ist. In dieser Studie wurde die Griffigkeit von Autos auf Schnee auf unterschiedlichen Fahrbahnen gemessen, wobei die Temperatur in 2 Gruppen unterteilt wurde (kalt = <0°C, warm = > 0°C). Leider wurden die schneemechanischen Eigenschaften bei diesem Projekt nicht nachvollziehbar dokumentiert. Die erhaltenen Griffigkeitswerte bei kalten Temperaturen waren vergleichbar mit publizierten Werten aus Schweden und Finnland. Die Daten der Messreihen bei warmen Temperaturen schwankten stark. Dies zeigt, dass sich der Schnee bei erhöhten Temperaturen und unter mechanischer Einwirkung der Räder sehr schnell ändert.

In Norwegen wird seit wenigen Jahren systematisch an den Grundlagen des Schnee-Salzgemisches geforscht (7) (8). Was bereits gezeigt werden konnte ist, dass das Salz neben der bekannten Gefrierpunktniedrigung auch die mechanischen Eigenschaften des Schnees verändert. Salz enthaltende Eisplatten brachen unter einer geringeren mechanischen Belastung als in reinem Eis. Dies zeigt, dass unter der Berücksichtigung der Änderung der mechanischen Eigenschaften möglicherweise weniger Salz gestreut werden muss. Eine neuere Studie (8) zeigt, dass bereits kleine Mengen an NaCl (< 5 g/m²) die Schneehärte auf die Hälfte verringert im Vergleich zum trockenen Schnee. Dies wird durch die Anlagerung der Salzlösung an den Korngrenzen erreicht. Die Kornbindungen werden geschwächt und eine weichere Schnee-Salzmischung entsteht.

Dieses Projekt hat zum Ziel, das System Schnee-Salz zusammen mit mechanischen Wirkungen zu untersuchen. Die thermodynamischen sowie die mechanischen Prozesse in Abhängigkeit von Temperatur und Salzkonzentration werden untersucht. Mit dieser ersten Basis an Grundlagenwissen könnten dann spezifische Feldversuche durchgeführt werden. Unterschiedliche Schmelzmittel könnten damit schneller und gezielter verglichen

werden. Inwiefern diese Resultate schon für die Optimierung der ausgebrachten Salzmengen verwendet werden können, ist ohne intensive Diskussionen und Umsetzung noch offen, ebenso die Weiterentwicklung zu einer VSS-Norm.

Der Aufbau des Projektes besteht hauptsächlich aus zwei Experimentserien (Abb.1), welche sich dadurch unterscheiden, dass in Experiment 1 mit Sole gearbeitet wurde und in Experiment 2 kristallines Salz verwendet wurde.

In Experiment 1 wurde der Reibungskoeffizient auf standardisiertem, mit Sole unterschiedlicher Konzentration versetztem Schnee untersucht. Der Schnee wurde mit Sole zwischen 0 und 5 Gewichtsprozent gemischt und auf Reibung, Struktur und Härte untersucht. Diese Experimente fanden bei drei Temperaturen: -12°C , -6°C und -3°C statt. Im Voraus wurde eine Vorstudie (Teststudie 1) mit einlagigen Schneeproben und mit höheren Salzkonzentrationen (bis 10 Gewichtsprozent) durchgeführt. Die ersten Experimente zeigten, dass die entscheidenden Prozesse bei tieferen Salzkonzentrationen stattfinden und dass zweilagige Schneeproben der Wirklichkeit näher kommen. Deshalb wurden die Hauptexperimente mit zweilagigen Schneeproben durchgeführt, und die Konzentration bis zu 5 Gewichtsprozent in kleinen Schritten erhöht (Studie 2).

In Experiment 2 wurden der Effekt von kristallinem Salz auf Schnee und Eis sowohl im Labor als auch auf der Strasse untersucht. In Studie 3 wurde das Schmelzverhalten eines Salzkorns auf der Oberfläche eines Eisstücks beobachtet und gemessen. In Studie 4 wurden Schneeproben von der Strasse gesammelt. Diese wurden mit dem micro-CT analysiert und die Salzkonzentration wurde über Leitfähigkeitsmessungen bestimmt. Die im Strassenschnee gemessene Konzentration wurde danach mit den gestreuten Salzmengen verglichen.

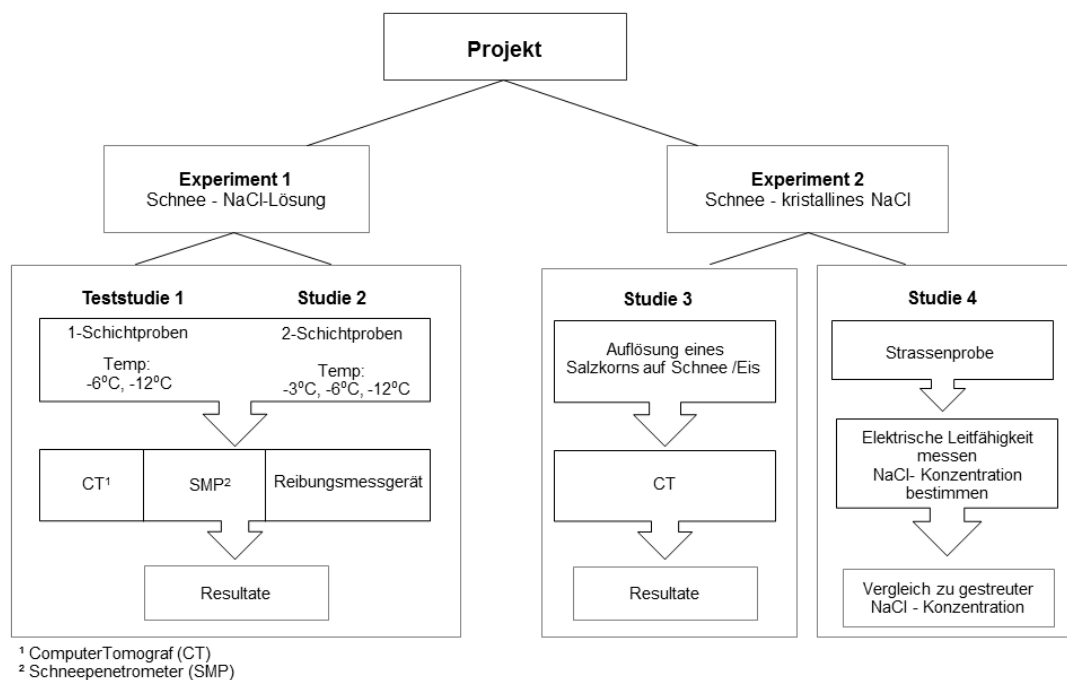


Abb.1 Schematischer Aufbau des Projekts mit den beiden Hauptexperimenten 1 und 2 und den darin aufgeführten Studien 1-4.

Die Schneeproben wurden mit dem Mikro-Computertomograph (CT) auf ihre Mikrostruktur, Korngrösse und dessen Verteilung untersucht. Zusammen mit Schneepenetrometermessungen und Reibungsmessungen erhielt man Informationen über die zeitabhängigen Strukturen und die sich ändernden mechanischen Eigenschaften auf unterschiedlichen Skalen.

2 Grundlagen

2.1 Das Material Schnee

Schnee ist ein poröses Material aus Eis und Luft. Schnee ist also nichts anderes als ein Material, welches aus feinen Eisstrukturen besteht und von unterschiedlich viel Luft umgeben ist. Schnee auf der Strasse wird innerhalb sehr kurzer Zeit auf eine Dichte zwischen $400\text{-}600\text{ kg m}^{-3}$ zusammengedrückt, enthält dann aber immer noch ca. 45-65% Luft.

Wenn Schneeflocken vom Himmel fallen und sich am Boden eine Schneeschicht aufbaut, dann ändert sich diese Schneedecke dauernd. Der Schnee verändert sich stets entsprechend den Umgebungsbedingungen, wie Temperatur, Wind und Strahlung. Schnee ist ein Hochtemperatur-Material. So wird ein Stoff beschrieben, wenn er sich sehr nahe seiner Schmelztemperatur befindet. Bei -50°C ist Schnee ziemlich inaktiv, doch nahe am Schmelzpunkt "altert" der Schnee rasch. Aus feinstem luftigen Neuschnee wird innerhalb von Tagen oder sogar Stunden ein Schnee mit kugeliger Struktur. Diese Schneemetamorphose (Schneeeumwandlung) hat zur Folge, dass die Bindungen zwischen den Eisstrukturen wachsen. In der Fachliteratur wird dies als Sintern bezeichnet. Das Sintern ist dasselbe wie in der Metallurgie: Metallische Körnern werden durch Erhitzen „zusammengeschweisst“ oder eben gesintert. Die treibende Energie für die Schneemetamorphose sind grosse Oberflächen - Volumen Verhältnisse wie sie in den feinsten Neuschneekristallen vorkommen. Dieses Verhältnis ist energetisch unvorteilhaft, was sich darin zeigt, dass sich diese komplizierten Strukturen zu einfacheren kugeligen Formen mit tieferem Energiegehalt umwandeln. Die Geschwindigkeit des Ablaufs der Schneemetamorphose hängt einerseits von der Temperatur ab (je tiefer die Temperatur umso langsamer die Umwandlung) und andererseits von der Schneestruktur und dessen Energieverhältnissen (je grösser das Oberflächen-Volumen Verhältnis, desto schneller die Umwandlung).

Schlüsselbegriffe:

Schneemetamorphose: Die Schneemetamorphose ist der Überbegriff für die beobachteten Veränderungen in einer Schneedecke über die Zeit. Darin verpackt sind alle physikalischen Prozesse.

Sintern: Bildet sich bei Schneefall auf dem Boden eine Schneedecke, formen sich an den Berührungspunkten der einzelnen Schneekörner Bindungen. Sie kleben zusammen. Je mehr Berührungspunkte (Nachbarn) ein Schneekorn hat, desto besser hält die Schneedecke zusammen.

2.2 Schneeeumwandlung auf der Strasse

Um die unterschiedlichen Situationen auf Strassen im Winter besser vorstellen zu können, werden im folgenden Abschnitt vier verschiedene Szenarien unterschieden.

Szenario 1 - Schnee bei sehr tiefen Temperaturen (um die -20°C): Bei tiefen Temperaturen läuft die Schneemetamorphose langsam ab. Der Schnee bleibt locker und feinkörnig, und bleibt als Pulver auf der Strasse liegen. Fährt ein Auto über den Schnee, so brechen die Schneekristalle auseinander und es bilden sich feinkörnige lose Splitter. Dieses sandartige Material hat einen hohen Reibungskoeffizienten.

Szenario 2 - Schnee bei wärmeren Temperaturen (ca. -3°C bis -6°C): Bei wärmeren Temperaturen werden die durch den Verkehr gebrochenen Schneekristalle in Bruchteilen einer Sekunde miteinander gesintert (9), und es bildet sich eine kompakte Kruste auf der Strasse. Die Reibungskoeffizienten sind sehr viel niedriger als in Szenario 1. Bei die-

sen Bedingungen kommt der Winterreifen zum Tragen. Durch seine Struktur kann er die Kruste lokal aufbrechen und die Reibung erhöhen.

Szenario 3 - Schnee um die 0 °C: Ist der von den Fahrzeugen und der Strasse erzeugte Wärmefluss gross genug, bildet sich Schneematsch. Bei Schneematsch sind die Eiskristalle nicht mehr zusammenhängend, sondern nur noch von Wasser umhüllt. Sofern die Reifen bis auf den Belag durchdrücken können, bleibt die Reibung genügend. Beginnt der Matsch zu gefrieren, sinkt die Reibung auf sehr kleine Werte.

Szenario 4 – gesalzene Strassen: Was geschieht wenn Salz gestreut wird? Das Salz schmilzt einen Teil des Eises und die Salzlösung gelangt an die Kornbindungen. Diese werden dadurch geschwächt. Der Verkehr bricht diese Kornbindungen auf und ein loser Salz-Schnee-Matsch bleibt auf der Strasse liegen. Bereits kleine Mengen an ausgetragener Sole bewirken eine beachtliche Verringerung der Schneehärte und zusammen mit der mechanischen Interaktion des Verkehrs erreicht man bereits den gewünschten Effekt einer losen Schneeschicht und löst die kompakte festgepresste Kruste auf. Da Sole sich besser als Salz auf den Eisstrukturen verteilen kann, wird für den gleichen Effekt mengenmässig weniger Sole als Salz benötigt.

3 Experimente und Methoden

Für die Experimente wurde natürlicher Schnee verwendet und im Kältelabor bei einer Temperatur von -25°C in einer Kartonkiste gelagert. Für sämtliche Experimente wurde Kochsalz (Natriumchlorid) verwendet. Die Schneeproben wurden mit dem Mikro-Computertomografen, dem Reibungsmessgerät und dem Schneepenetrrometer (SMP) analysiert.

Nachfolgend beschreiben wir die für die Untersuchung von Strassenschnee neuartigen Instrumente näher.

Mikro-Computertomograf (micro-CT): Mit dem micro-CT können die drei Phasen Luft, Eis und Salzlösung dank ihren unterschiedlichen Adsorptionskoeffizienten als schwarz (Luft), dunkelgrau (Schnee) und hellgrau (Salzlösung) erkannt werden (10) (11) (12). Die microCT-Bilder geben Informationen zu Mikrostruktur, Korngrößen und deren Verteilungen. Des weiteren können Korngrenzen identifiziert werden und Bindungsstärken der Schneekörner berechnet werden. Die gewonnenen Daten des micro-CTs werden ausgewertet nach Korngrößen, Korngrößenverteilung, Zusammenhalt der Korngrenzen, Kornbindungsstärken und Salzlösungsverteilung. In Abb. 2 ist das micro-CT im Kältelabor zu sehen, zusammen mit einem Bildbeispiel wie die Schnee-Salzlösungsmischung auf einem Graustufenbild zu erkennen ist.

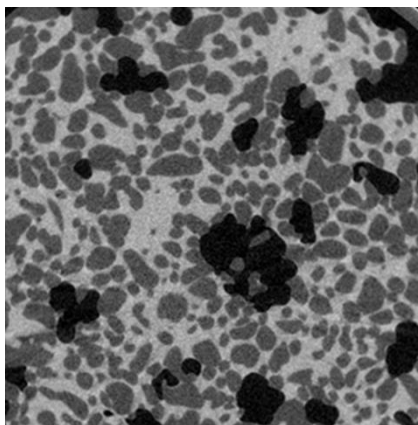


Abb. 2 Das μCT ist in einer Kältekammer in welcher die Temperatur geregelt werden kann (oben). Ein Graustufenbild mit den drei Phasen Luft, Schnee und Salzlösung kann sehr gut unterschieden werden

Reibungsmessgerät: Um die Reibung zwischen Reifen und Schnee messen zu können, wurden die Proben mit dem Reibungsmessgerät (FrictionTester) gemessen (Abb. 3). Das Gerät wurde in Zusammenarbeit mit einem Pneuhersteller am SLF spezifisch für die Entwicklung von Winterreifen gebaut. Der Aufbau des Gerätes ist in der Literatur dokumentiert (13). Die Fahrgeschwindigkeit in x-Richtung, die Fahrzeit sowie die Normalkraft (F_z) können frei gewählt werden. Die Horizontalkraft F_x wird gleichfalls gemessen. Der Reibungskoeffizient μ resultiert aus dem Verhältnis von F_x/F_z . Aus der Horizontalkraft ist das statische- sowie das dynamische Reibungsregime erkennbar (Abb. 4). Am Reibungs-

messgerät wurde eine Pneuprobe ohne Profil mit einer Fläche von $2 \times 4 \text{ cm}$ angebracht. Das Messprogramm wurde so konfiguriert, dass die Probe mit einer konstanten Kraft in z-Richtung (vertikal) von 50 N belastet wurde. Der Druck auf die 4.4 cm^2 grosse Fläche der Gummiprobe auf den Schnee ist somit 104 kPa oder rund 1 bar . Dies ist im Vergleich zum Druck eines Autoreifens auf den Schnee mit rund 2 bar tiefer.

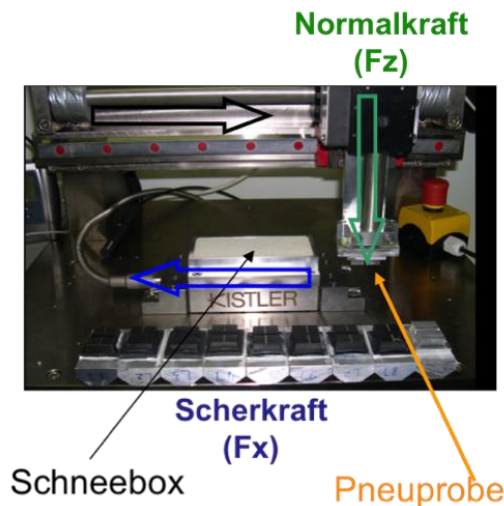


Abb. 3 Reibungsmessgerät mit der aufgeschraubten Schneebox. Die Kräfte F_z senkrecht zur Fahrtrichtung X sowie die Scherkraft (F_x) sind eingezeichnet.

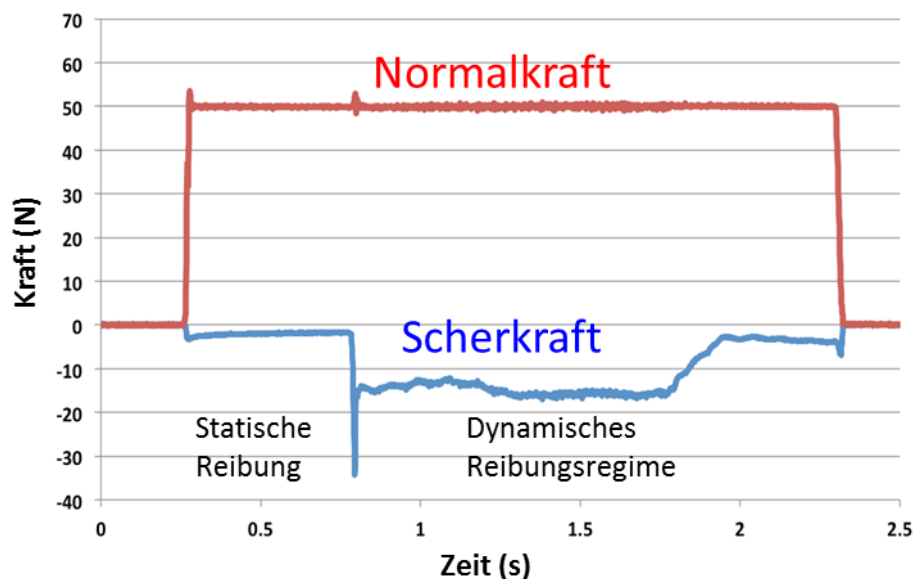


Abb. 4 Beispiel einer Reibungsmessung mit den beiden aufgezeichneten Normal- (rot) und Scherkraft (blau). Im Verlauf der Scherkraft ist das statische sowie das dynamische Reibungsregime erkennbar.

Schneepenetrorometer (SMP): Das Schneepenetrorometer erlaubt den Zusammenhang zwischen Eindringkraft und Tiefe mit einer Auflösung von $4 \mu\text{m}$ zu messen. Dadurch werden alle bis zu 1 mm dünnen Schichten erfasst. Die Daten werden direkt digital aufgezeichnet. Diese Untersuchung gibt einen Einblick auf die ablaufende Metamorphose des Schnees unter der Einwirkung des verwendeten Schmelzmittels (12).

Das Phasendiagramm zwischen NaCl und Wasser: In diesem Diagramm (Abb. 5) wird die Zusammensetzung der Phasen Eis, Sole und festes Salz bei unterschiedlichen Temperaturen im Systemgleichgewicht dargestellt.

Reines Wasser gefriert bei 0°C. Mischt man in das reine Wasser bei einer Temperatur von 10°C Salz, so löst sich dieses bis ein Salzgehalt von circa 27 % erreicht ist (Punkt 1). Kühlt die Salzlösung ab (weisser Pfeil von Punkt 1 zu Punkt 2), so kristallisiert aus der Lösung festes Salz aus und bei -21°C gefriert die Lösung. Bei Temperaturen unter -21°C findet man nur noch festes Eis und Salzkristalle. Wenn nun eine rund 10%- Salzlösung (Punkt 3) von 10 °C heruntergekühlt wird, kristallisieren aus der Lösung Eiskristalle sobald Punkt 4 erreicht ist. Hier, bei rund -7 °C ist das System Eis und Salzlösung im Gleichgewicht. Es wird kein Eis geschmolzen und kein weiteres Eis kristallisiert aus der Salzlösung. Wenn aber die Temperatur weiter sinkt, dann gefriert weiterhin Wasser aus der Lösung und die verbleibende Salzlösung wird konzentrierter. Bei Punkt 5 gefriert das ganze System wiederum mit voneinander separierten Eis- und Salzkristallen.

Anhand von diesem Diagramm wurden in den Experimenten die Salzkonzentrationen so gemischt, dass das System bei einer bestimmten Temperatur im Gleichgewicht ist und es zu keinem weiteren Schmelzen oder Auskristallisieren kommt.

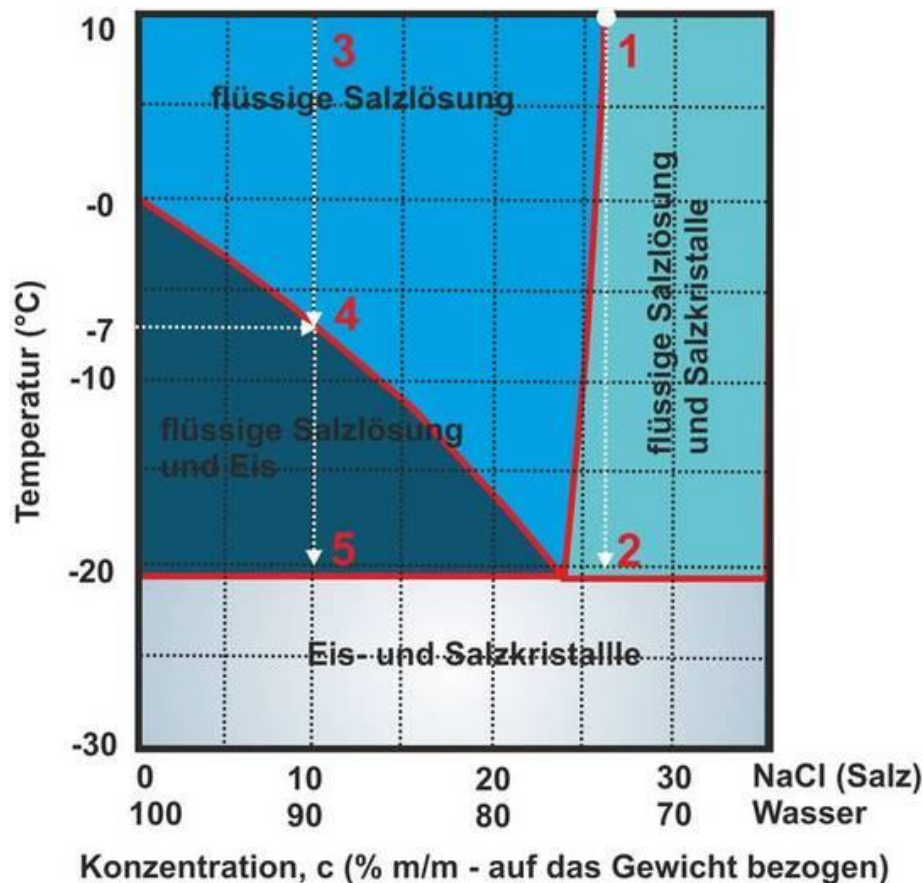


Abb. 5 Phasendiagramm von NaCl und Wasser in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur (Grafik aus www.meereisportal.de / Alfred Wegener Institut).

3.1 Experiment 1 – Schnee - Solemischungen

Die Reibungsexperimente wurden in drei Serien bei Temperaturen von -3 °C, -6 °C, und -12 °C durchgeführt. Die für die Experimente benutzten Schneeproben und Mischungen

wurden bei der jeweiligen Temperatur im Kältelabor vorbereitet und äquilibriert. Für die drei verschiedenen Temperaturen wurden NaCl-Konzentrationen so gemischt, dass diese im Gleichgewicht mit dem Schnee sind (siehe Abb. 5). Die Menge Salz sowie der Anteil Wasser wurden bei Raumtemperatur eingewogen, gemischt und danach bei der entsprechenden Temperatur gelagert. Das bedeutet, dass bei $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Lösung $6.5\text{ m\%}$ bei $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ $10.5\text{ m\%}$ und bei $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ $16.5\text{ m\%}$ NaCl beinhaltet.

In der Teststudie 1 und in Studie 2 wurde der Schneeprobenaufbau in der Schneebox des Reibungsmessgerätes unterschiedlich gewählt. Nachdem in der Teststudie 1 die Schneeproben mit nur einer Schicht aus Schnee und Sole hergestellt wurden, so erschien es realistischer die Proben in der Haupt-Studie 2 mit zwei Schichten zu präparieren. Damit wird die Situation simuliert, wenn eine Strasse zwar gesalzen ist, aber unter der gesalzenen Schicht eine kompakte, salzlose Schneeschicht zu finden ist (Abb. 7).

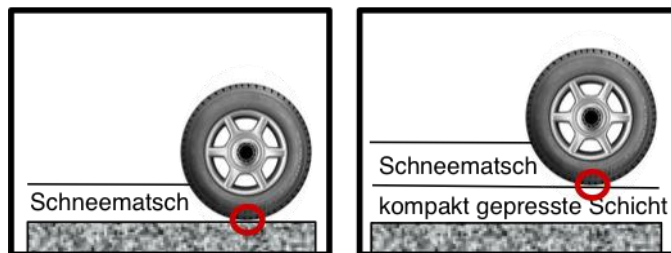


Abb. 6 Einschichtige Schneeprobe aus der Teststudie 1 und die zweischichtige Schneeprobe in der Studie 2.

Eine untere Schicht wurde mit feingeraffelmtem Eis gesiebt ($<1000\text{ }\mu\text{m}$ Korngrösse) und anschliessend mit einer Pressmaschine mit steigender Kraft bis 20 kN komprimiert. So konnte eine Dichte für die untere Schicht zwischen $500\text{--}600\text{ kg/m}^3$ erreicht werden. Darüber wurde eine Schnee-Sole Mischung aufgebracht. Diese Schicht wurde ebenfalls leicht komprimiert um eine Dichte zwischen $400\text{--}450\text{ kg/m}^3$ zu erreichen. Der Schnee wurde zuerst in einen Plastikbehälter abgefüllt und eingewogen (Abb. 7a). Danach wurde die benötigte Menge Sole zugefügt (Abb. 7b) und mit dem Stabmixer jeweils in kurzen Intervallen gemixt (Abb. 7c). Nach dem Mixen wurde als Kontrolle die Temperatur gemessen (Abb. 7d). Danach wurde die Schnee-Sole Mischung mit einem grobkörnigen Sieb gesiebt (Abb. 7e) und anschliessend mit der Pressmaschine gepresst.

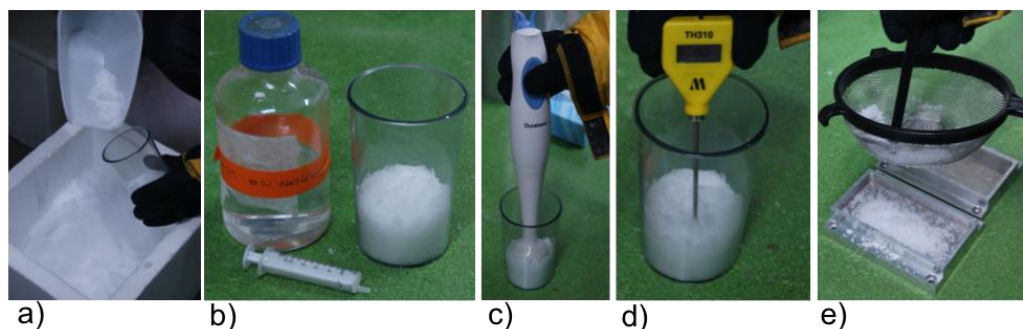


Abb. 7 Herstellung der Schneeproben für die Experimente mit dem Reibungsmessgerät

Vorsicht war beim Mixen mit dem Stabmixer geboten. Es durfte nur in sehr kurzen Intervallen gemixt werden, da der Mixstab Wärme entwickelt und so den Schnee zum Schmelzen bringen kann. Das Mixen des Schnees hat den Vorteil, dass die Sole möglichst homogen unter den Schnee gemischt wird und der Schnee danach morphologisch dem Schnee auf der Strasse sehr ähnlich ist (Abb. 8).

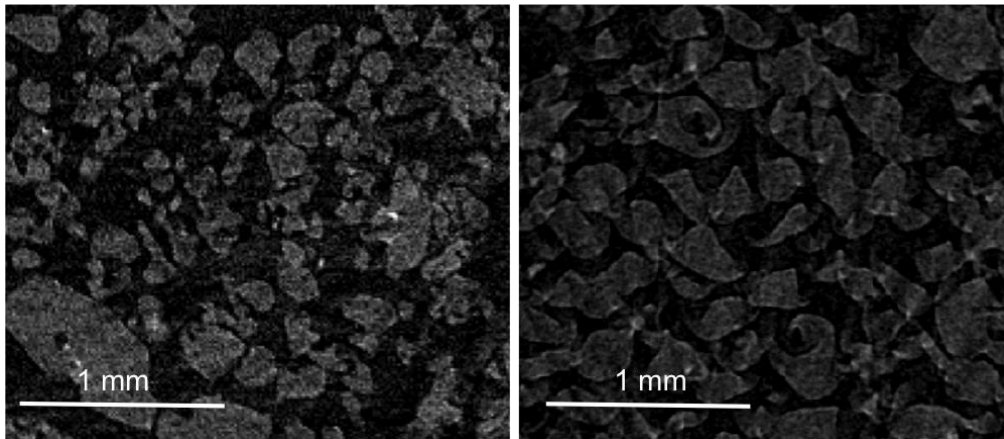


Abb. 8 Schneekörner einer Strassenprobe (links) im Vergleich mit Schneekörner einer Laborprobe (rechts).

Es wurden 9 Proben mit steigender NaCl-Konzentration für jede Temperatur hergestellt (Tab. 1). Jede Probe wurde in 4-facher Ausführung gemessen um die Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Für die drei geprüften Temperaturen ergibt dies ein Total von 108 Proben.

Tab. 1 Die Schneeproben mit unterschiedlichem Solegehalt in [m%] und umgerechnet auf [g/m²] für verschiedene Temperaturen

Probe [m%]	bei -3°C	bei -6°C	bei -12°C
0	0	0	0
0.5	0.71	1.2	1.8
0.75	1.1	1.7	2.7
1	1.4	2.3	3.6
1.5	2.1	3.5	5.4
2	2.9	4.6	7.3
2.5	3.6	5.8	9.1
3	4.3	6.9	10.9
5	7.1	11.5	18.1

Die vorbereiteten Schneeproben wurden direkt analysiert. Bei Messverzögerungen aufgrund von technischen Problemen mit den Geräten konnte es vorkommen, dass eine Probe vor der Analyse bis zu rund 2 h gelagert wurde.

3.2 Experiment 2 – Schnee-kristallines Salz

In Studie 3 wurde das Schmelzen eines grossen Salzkorns (kristallines Meersalz) auf einer Eisoberfläche bezüglich Schmelzgeschwindigkeit und die Schmelzstruktur und deren Volumen beobachtet und beschrieben. Ein Salzkorn wurde auf eine Eisoberfläche gelegt; danach wurde die Zeit und Tiefe notiert, bis sich das Salzkorn vollkommen aufgelöst hatte. Das Schmelzvolumen und die hinterlassene Schmelzstruktur wurden mit dem micro-CT analysiert. Dieses Experiment wurde dreimal mit Salzkörnern unterschiedlicher Grösse bei -15 °C durchgeführt. Durchmesser und Volumen des Salzkorns wurde mit einer Schublehre bestimmt.

In Studie 4 wurde die Struktur und Salzkonzentration von Schnee auf der Strasse untersucht. Die Schneestrassenproben wurden an verschiedenen Lokalitäten vom Winterdienst Davos und vom SLF im Raum Davos während des Winters 2013/2014 gesammelt.

Die gesammelten Schneeproben wurden im μ CT untersucht. Danach wurde ein Teil der Probe geschmolzen um die Leitfähigkeit zu messen, woraus die Salzkonzentration bestimmt werden kann. Die Leitfähigkeit wurde mit einem Multi 197i Leitfähigkeitsmessgerät gemessen, welches mit einer TetraCon329 Leitfähigkeitsmesszelle ausgestattet ist. Für die Kalibration wurde eine Standardlösung von 12.9 mS/cm bei 25 °C von ATI Orion verwendet. Die Werte zur Salzgehaltsbestimmung wurden an die Werte aus der Literatur (14) (15). Die gemessenen Salzkonzentrationen wurden danach mit den effektiv gestreuten Salzmenngen aus den erhaltenen Rapportberichten vom Winterdienst Davos verglichen.

Die Strassenproben wurden wie folgt entnommen.



Abb. 9 Ablauf einer Schneeprobeentnahme auf der Strasse.

Der Ort der Probenahme wurde ausgewählt (Abb. 9-1). Danach wurde die Schneetemperatur gemessen (Abb. 9-2), die Proben wurden vorsichtig in das vorbereitete Tupperwaregefäß gelegt (Abb. 9-3, -4 und -5), verschlossen, und in eine Styroporkiste gelegt, die mit Coldpack-Elementen ausgestattet ist (Abb. 9-6). Danach wurden die Proben möglichst schnell zum SLF geliefert und im Kältelabor bei -25 °C gelagert.

4 Resultate und Diskussion

4.1 Experiment 1 – Test-Studie 1 und Studie 2

Die Reibungsmessungen wurden vierfacher wiederholt. Die Messungen waren sehr gut wiederholbar, deshalb wurde für die weitere Auswertung der Mittelwert jedes Messpunktes verwendet und dargestellt. Die Resultate sind für jeden Temperaturbereich separat dargestellt. Es sei hier nochmals erwähnt, dass die %-Angaben der Probenamen sich auf Massenprozent beziehen (siehe Tab. 1). Eine Probe mit 1% Solegehalt beinhaltet 99 g Schnee und 1 g Sole auf eine 100 g Schnee-Sole Mischung.

Bei warmen Temperaturen von $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist klar ersichtlich, dass die Salzkonzentration hier keinen grossen Einfluss auf die Reibungskoeffizienten hat (Abb. 10). Die reine Schneeprobe zeigt denselben Reibungskoeffizienten wie die Proben mit bis zu 5% Solegehalt.

Dieses Bild ändert sich bei tieferen Temperaturen, da offenbar andere Prozesse eine Rolle spielen. Die Kurven werden auseinandergezogen und der Salzgehalt hat nun einen sehr grossen Einfluss auf die Reibung hat (Abb. 11). Bei $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt sich, dass die Schnee-Sole Mischungen mit den geringsten Solegehalten (0.5 und 0.75 %) und reiner Schnee bewirken die höchsten Reibungskoeffizienten. Höhere Solegehalte zeigen einen Abfall des Reibungskoeffizienten. Der Solegehalt und der Reibungskoeffizient sind allerdings nicht eindeutig zusammenhängend.

Bei einer Temperatur von -12°C verändert sich das Bild erneut (Abb. 12). Nahezu in Umkehrung von der Situation bei -6°C zeigen nun die Messungen bei 0 – 0.75 % Solegehalt die niedrigsten Reibungskoeffizienten.

Diese komplexe Bild zeigt, dass die Reibung zwischen Schnee und einer Gummiprobe von einer Reihe temperaturabhängig wirkender Prozesse abhängt.

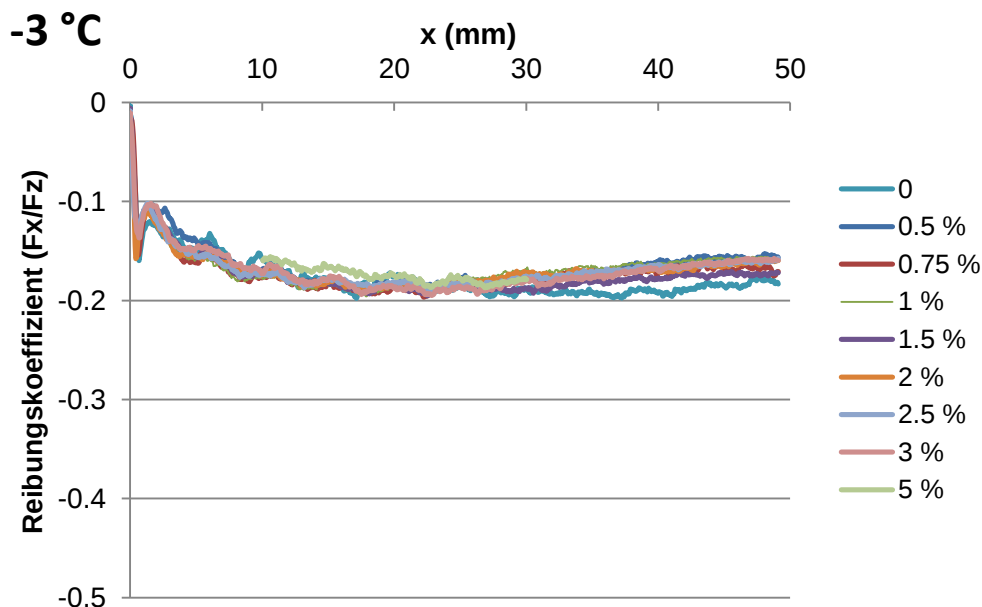


Abb. 10 Reibungskoeffizienten von der Schneeproben mit 0 – 5 % Solegehalt bei $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

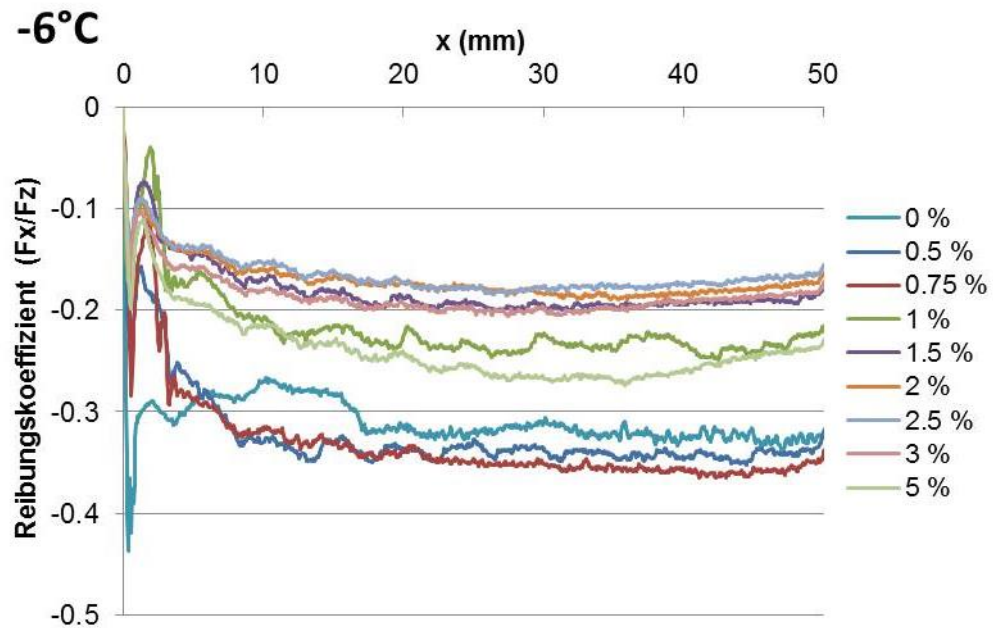


Abb. 11 Reibungskoeffizienten der Schneeproben mit 0 – 5 % Solegehalt bei -6°C .

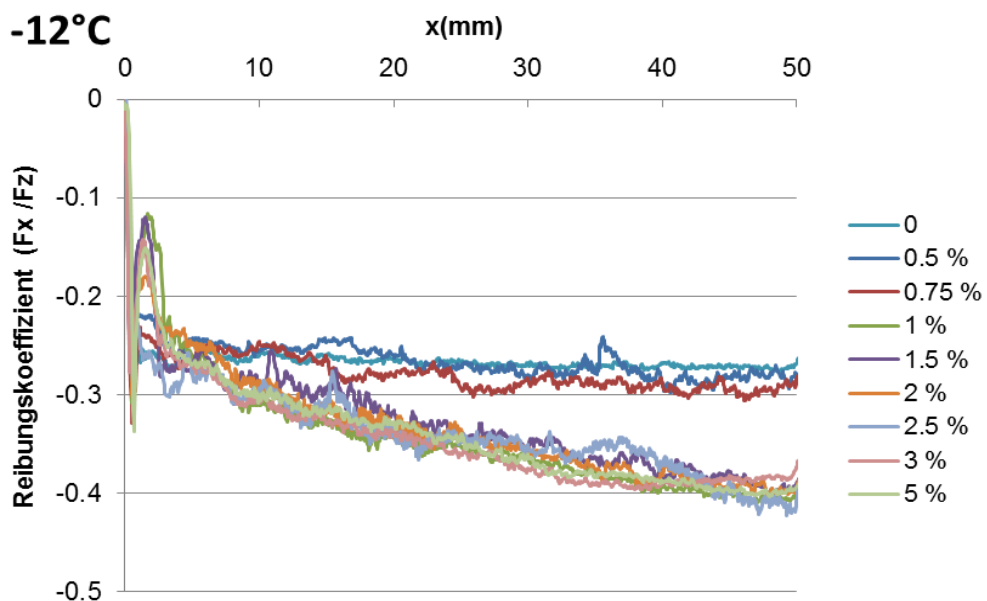


Abb. 12 Reibungskoeffizienten der Schneeproben mit 0 – 5 % Solegehalt bei -12°C .

In Abb. 13 werden alle Daten des statischen Reibungskoeffizienten dargestellt. Der maximale Reibungskoeffizient der gleichen Temperatur unmittelbar nach Beginn des Fahrweges wurde dazu gemittelt. Die Standardabweichung der Mittelwerte ist kleiner als die dargestellten Symbole.

Es zeigt sich, dass bei -12°C über alle Solegehalte hinweg die höchsten statischen Reibungskoeffizienten gemessen wurden. Der Einfluss des Solegehaltes ist nicht bedeutend.

Eine sehr kleiner Solegehalt (0.5-0.75%) reicht um den statischen Reibungskoeffizient sich über dem Reibungskoeffizient von der reinen Schneeprobe (0 %) zu heben, dieser fällt bei höheren Konzentrationen jedoch wieder ab.

Bei -6 °C sind die Werte für den reinen Schnee sehr hoch, und fallen auf weniger als ein Drittel (von 0.6 auf 0.2) bei einem von 1% Solegehalt ab. Ab einem Solegehalt von 1 % zeigen sich keine grossen Veränderungen mehr. Wir vermuten, dass dieser anfänglich sehr hohe statische Reibungskoeffizient hat mit dem temperaturabhängigen Elastizitätsmodul der Gummiprobe zusammenhängt. Bei -6°C besteht eine optimale Kombination zwischen Gummi und Schneefestigkeit. Dabei deformieren die an der Schneeoberfläche liegenden Eisstrukturen den Gummi und führen zu einem sehr hohen statischen Reibungskoeffizienten. Sobald die Festigkeit des Schnees durch Sole reduziert wird, ist die Schneeoberfläche nicht mehr hart genug um die Schneekörner in den Gummi zu drücken, sondern bricht schneller. Dies bewirkt eine schnelle Fluidisierung der Schneesicht und eine Reduktion des statischen Reibungskoeffizienten (Abb. 13).

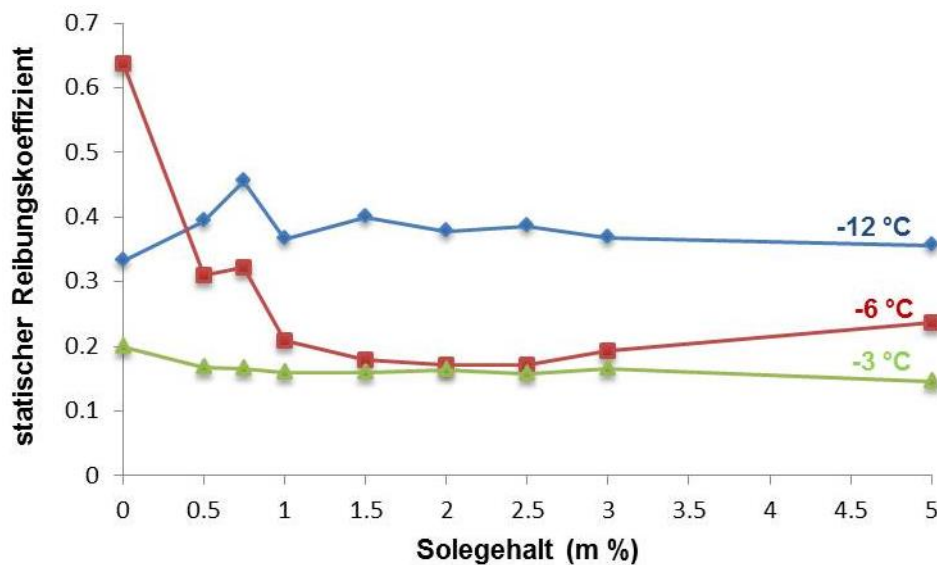


Abb. 13 Statischer Reibungskoeffizient der Schnee-Soleproben.

Abb. 14 zeigt die ausgewerteten dynamischen Reibungskoeffizienten. Ein linearer Trend wurde zwischen 10 – 30 mm Distanz in x-Richtung auf die Kurven (Abb. 10-12) gelegt. Der Wert in der Mitte dieser Geraden (also bei 20 mm) wurde als dynamischer Reibungskoeffizient bestimmt. Die Genauigkeit der Werte liegt im Rahmen von 10 % bei den Temperaturen -12 °C und - 6 °C und bei maximal 6 % bei -3 °C. Der Kurvenverlauf im dynamischen Reibungsregime ist vor allem abhängig ob und wie fest sich die Gummiprobe während der Vorwärtsbewegung eingegraben hat. Wie auch in Abb. 12 in Experiment 1 zu sehen ist, haben sich vor allem die Messungen bei -12 °C mit den Solegehalten zwischen 1 und 5 % eingegraben. Bei -3 °C (Abb. 10) verlaufen die Kurve nahezu horizontal.

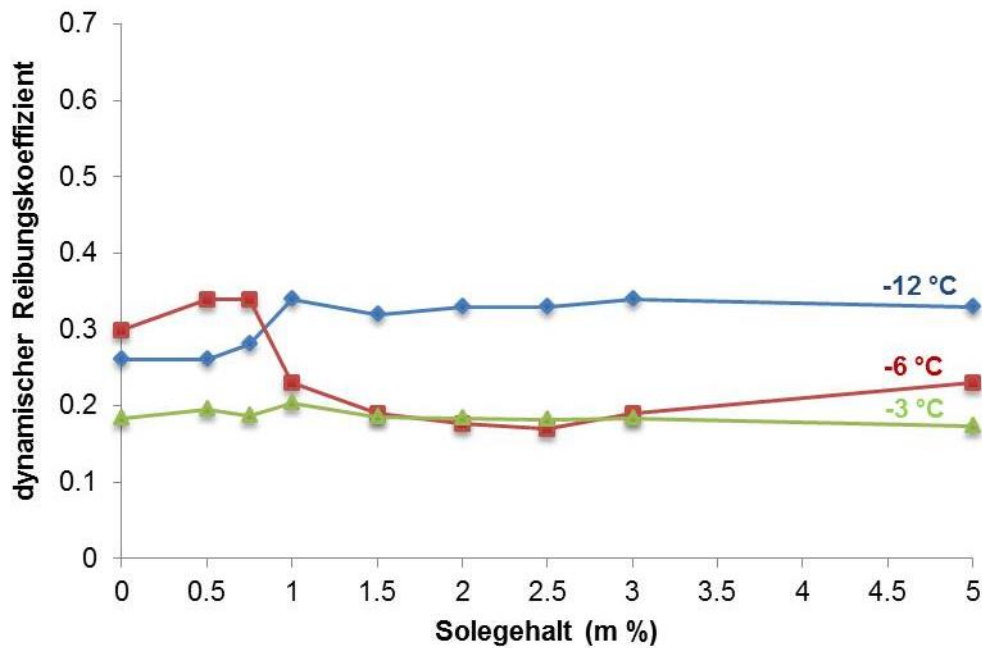


Abb. 14 Dynamischer Reibungskoeffizient der Schnee-Salzproben bei verschiedenem Solegehalt und Temperatur.

Die mechanischen Eigenschaften des Schnees wurden mit dem Schneepenetrorometer bestimmt (Abb. 15 - Abb. 18). Wiederum wurde dies bei allen Temperaturen und Solegehalten durchgeführt. Für die Auswertung wurde die Eindringtiefe bestimmt, bei welcher eine Kraft von 1 N erreicht wurde. Je härter eine Schneeschicht ist, desto weniger tief kann das Schneepenetrorometer in die Schneeschicht eindringen. Im Gegensatz zu den Reibungsmessungen zeigen diese Messungen eine recht grosse Variabilität.

Bei -3 °C (Abb. 15) ist deutlich zu erkennen, dass die Eindringtiefe am geringsten ist bei der Schneeprobe ohne Salz. Mit zunehmendem Solegehalt wird die Schnee-Sole Mischung zunehmend etwas weicher. Der zunehmende Solegehalt hat bei einem Solegehalt von mehr als 1% jedoch keine grössere Änderung der Schneehärte mehr, da der Schnee bereits sehr stark aufgeweicht ist. Die Werte pendeln sich bei rund 5 mm Eindringtiefe ein.

Bei -6 °C (Abb. 16) zeigt sich ein anderes Bild. Erwartungsgemäss ist die Eindringtiefe bei den Schneeproben ohne Salz wiederum am kleinsten und der Schnee am härtesten. Mit zunehmendem Solegehalt wird der Schnee immer weicher, die Werte befinden sich alle unterhalb der eingezeichneten Linie. Die Variabilität zwischen den Messungen liegt daran, dass die Herstellung einer homogenen oberen Schnee-Sole Schicht sehr schwierig ist, oder dass sich, bezogen auf die Stempelgrösse des Schneepenetroimeters, grosse lokale Unterschiede bilden.

Bei -12 °C (Abb. 17) liegen die Messpunkte generell ebenfalls unterhalb der eingezeichneten Linie. Somit wird auch bei dieser Temperatur der Schnee mit zunehmendem Solegehalt weicher.

Die Messungen mit dem Schneepenetrorometer sind aus unserer Sicht schwierig zu interpretieren (Abb. 18). Dies hängt in einem gewissen Mass von der dünnen untersuchten Schneeprobe ab, bei der Randeffekte auf die Messung mit einem Stempel wahrscheinlich sind. Auch der kleine Durchmesser des Stempels kann eine Rolle spielen, wo sehr kleinräumige Konzentrationsänderungen des Solegehaltes zu grossen Änderungen der Schneehärte führen.

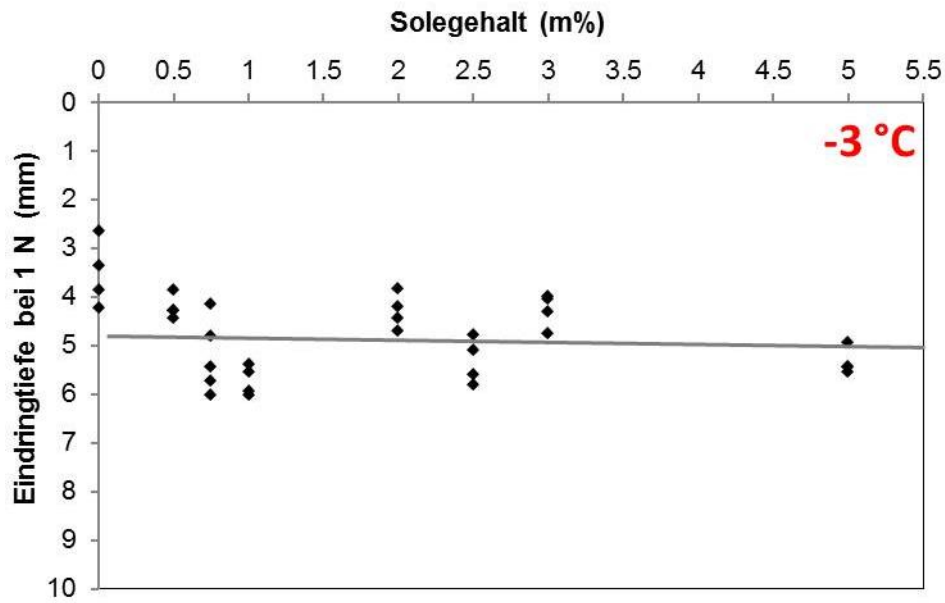


Abb. 15 Eindringtiefe bei einer Kraft von 1 N und einer Temperatur von $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

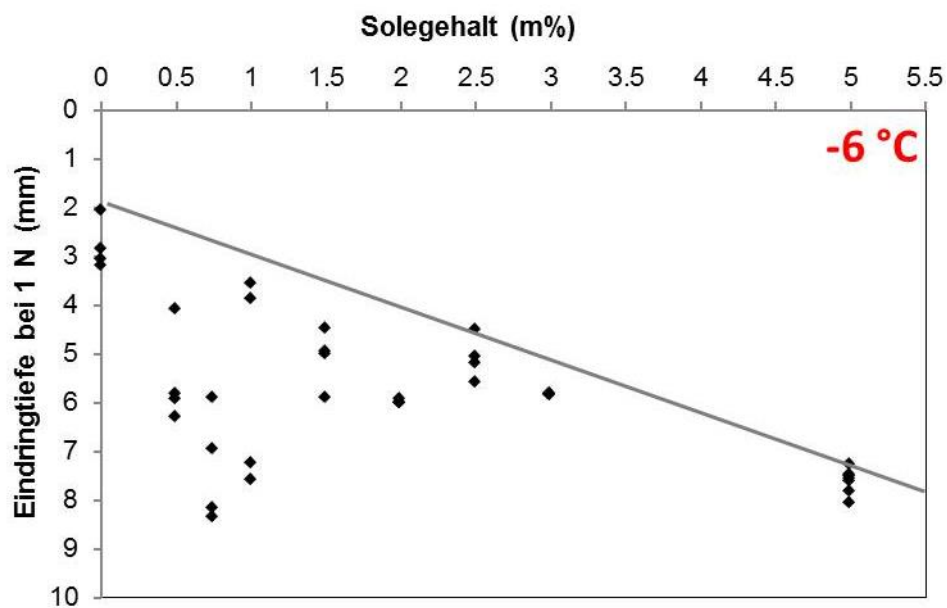


Abb. 16 Eindringtiefe bei einer Kraft von 1 N und einer Temperatur von $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

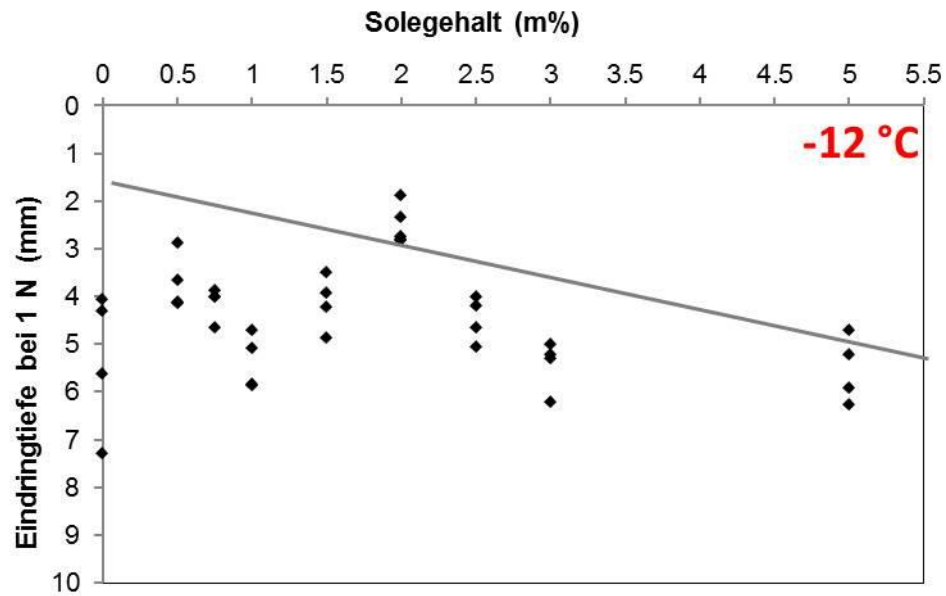


Abb. 17 Eindringtiefe bei einer Kraft von 1 N und einer Temperatur von -12 °C.

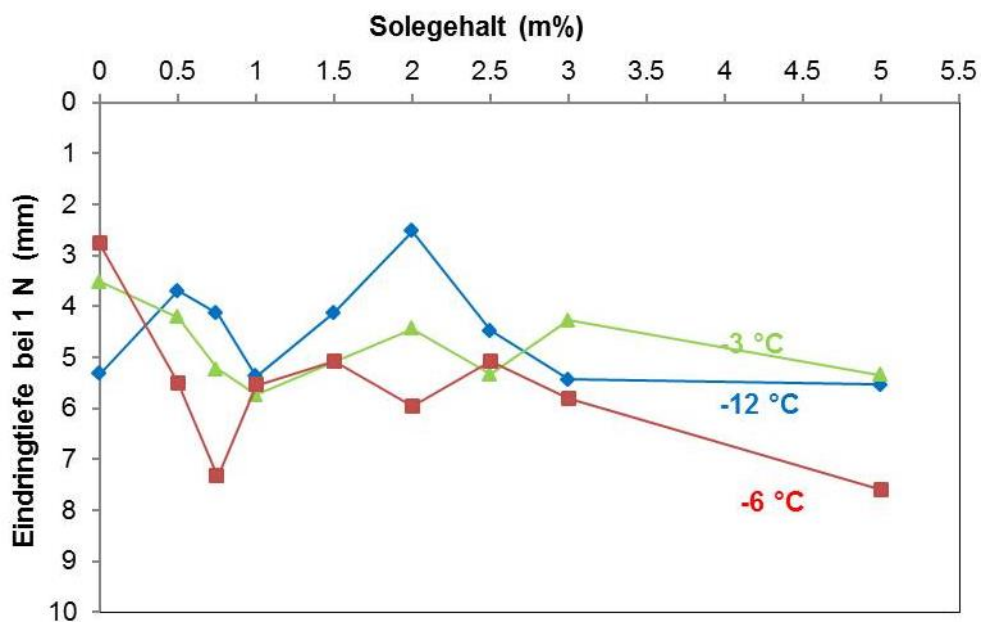


Abb. 18 Mittelwerte der Eindringtiefen des Schneepenetroimeters.

4.2 Experiment 2 - Studie 3

Der Schmelzvorgang eines Salzkorns auf einer Eisoberfläche wurde beobachtet und analysiert. Es zeigte sich, dass ein Salzkorn sich tunnelartig senkrecht in die Tiefe schmilzt und nicht wie erwartet an der Oberfläche eine Lache aus Salzlösung bildet (siehe Abb. 19). Je grösser das Salzkorn, desto mehr Eis wurde geschmolzen. Aus den gemessenen Daten wurde die Schmelzgeschwindigkeit über alle Salz-Korngrößen gemittelt; diese beträgt bei -15°C 0.65 mm/min. Die Schmelzgeschwindigkeit ist abhängig von der Salzkornform und den dadurch entstehenden Kontaktflächen zum Eis, und vermutlich auch von der Temperatur, dies wurde aber nicht weiter untersucht (Abb. 20). Dieser Prozess ist

komplex und sprengt den Rahmen dieses Projekts. Kurz kann hier aber zusammengefasst werden, dass diese Daten sehr gut zeigen, dass der Schmelzprozess sehr schnell abläuft!

Schmelzgeschwindigkeiten auf Schneeschichten sind um einiges höher als auf einer kompakten Eisschicht, da der Schnee viel Porenraum hat. Übertragen auf das Salzen auf den Strassen heisst das, dass das Salz innert Minuten durch die Schneedecke geschmolzen ist und die Salzlösung durch den "Tunnel" auf den Strassenboden gelangt und dort vermutlich als Schmelzwasser abfließt, sofern die Sole nicht unmittelbar mechanisch in den Schnee gemischt wird. Wie das Salz optimal auf der Strasse gehalten werden kann, ist eine weitere offene Frage, wie auch die Resultate von Studie 4 zeigen.

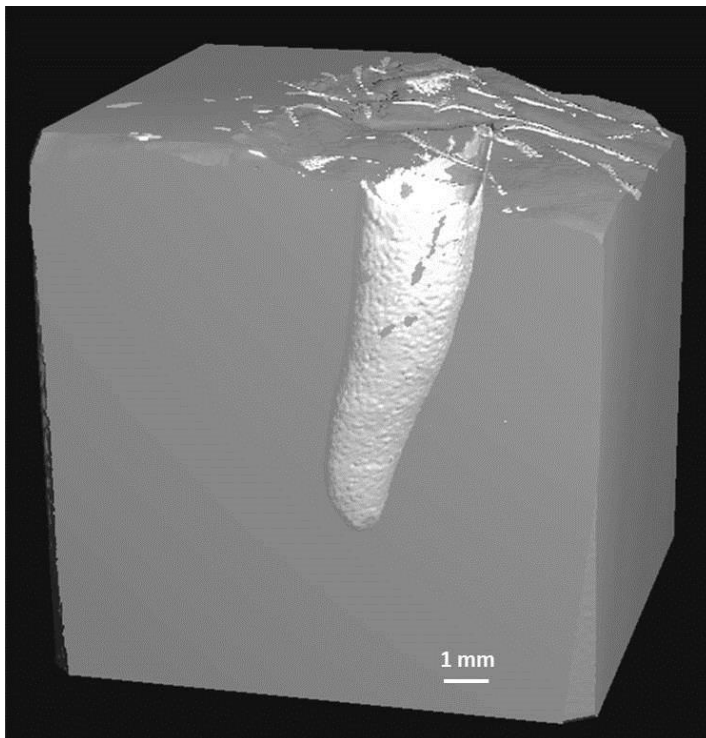


Abb. 19 Das micro-CT-Bild zeigt den halbtransparenten (grauen) Eiswürfel und den geschmolzenen Tunnel (hell), der durch das aufgelöste Salzkorn entstanden ist.

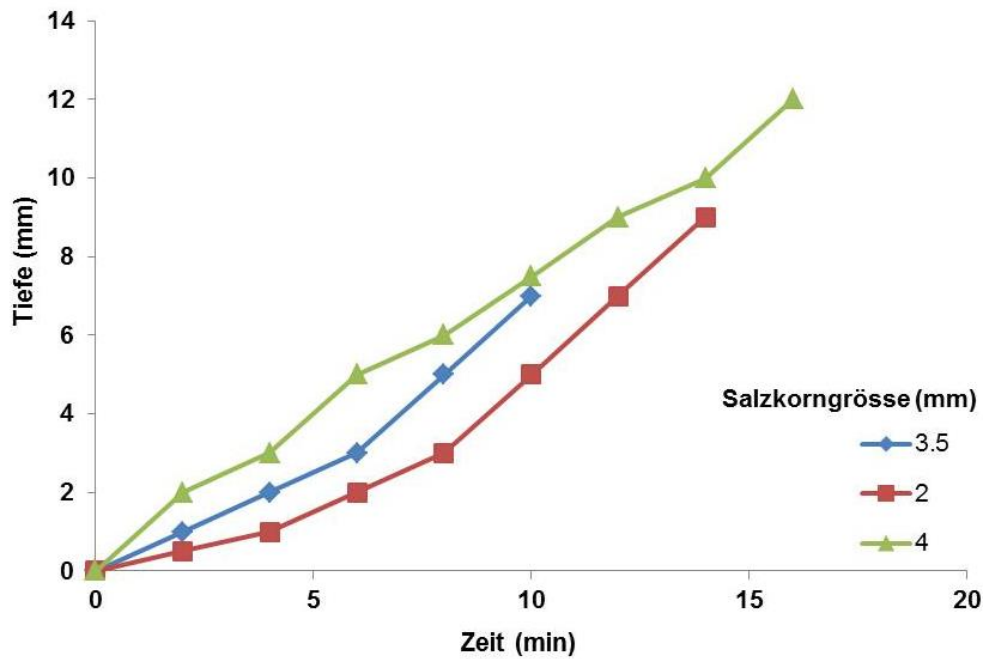


Abb. 20 Schmelzprozess eines Salzkorns auf einer Eisoberfläche aufgezeichnet als Weg-Zeit Diagramm

Das Schmelzvolumen, welches jedes Salzkorn verursacht hat, wurde mit dem micro-CT bestimmt (Abb. 21). Zusammen mit der Eisdichte (917 kg m^{-3}) und der Salzkornmasse konnte auf die sich im geschmolzenen "Tunnel" befindliche Salzlösung geschlossen werden. Diese Daten wurden dann mit theoretischen Salzlöslichkeitswerten im Gleichgewicht verglichen. Alle Experimentpunkte liegen unterhalb der Salz-Löslichkeitslinie. Das heisst, dass die Zeit von 1 h bis maximal 6 h nicht reichte um das Phasengleichgewicht zu erreichen. Bei der Experimenttemperatur von -15°C läuft dieser Prozess langsam.

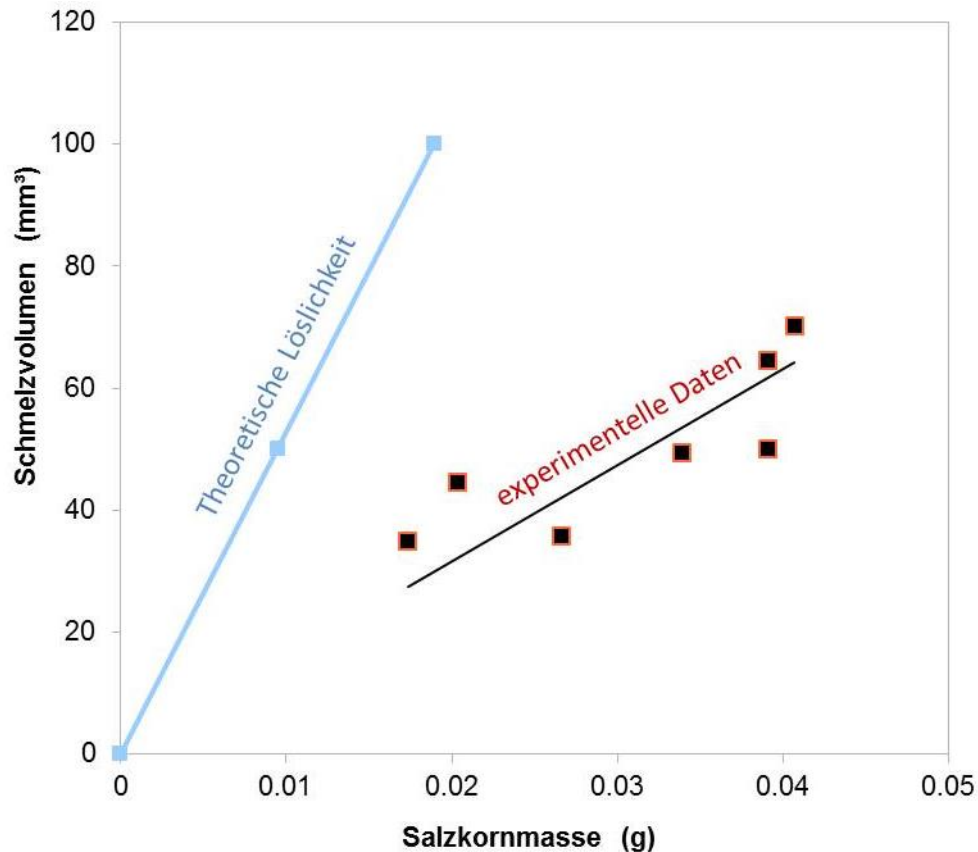


Abb. 21 Experimentelle und theoretische Löslichkeitswerte des Schmelzexperimentes zeigen, dass die Salzlösung das Phasengleichgewicht noch nicht erreicht hat (Messungen bei -15°C).

4.3 Experiment 2 – Studie 4

Die von der Strasse gesammelten Schneeproben zeigten, dass sich ein sehr geringer Teil des gestreuten Salzes noch im Strassenschnee befindet. Die Strassenschneeproben wurden geschmolzen und auf ihre elektrische Leitfähigkeit hin analysiert. Daraus konnte auf die Salzkonzentration geschlossen werden. Der Vergleich mit der an diesem Tag gestreuten Menge Salz an der Probenahmestelle zeigt, dass die Aufenthaltsdauer des Salzes und somit seine Wirksamkeit auf der Strasse kurz ist. Lediglich 10 % des gestreuten Salzes war noch im Schnee zu finden (Tab. 2).

Tab. 2 Elektrische Leitfähigkeitswerte und Salzkonzentrationen der gesammelten Strassenschneeprobe

Probe	Elektrische Leitfähigkeit [mS/cm]	NaCl-Konzentration [g/kg] ¹	NaCl-Konzentration [g/m ²] ²	Gestreute Salzmenge [g/m ²]
A	26.14	15	1.5	10
B	5.8	4.7	0.5	10
C	7.01	5.2	0.5	8
D	15.73	9.0	0.9	8
E	3.76	4.1	0.4	8

¹ Umrechnung von gemessener elektr. Leitfähigkeit auf NaCl-Konzentration über publizierte Werte (Weast, 1989 und Wolf, 1966).

² Umrechnung auf NaCl-Konzentration [g / m²]: 2 cm Schneehöhe pro m² sind 10 l (oder 10 kg) Wasser wenn mit einer Schneedichte von 500 kg/m³ gerechnet wird. Somit wird die NaCl-Konzentration um 1/10 verdünnt auf einen m².

Anhänge

I	Rapporte der Strassenschneeproben	35
---	---	----

I Rapporte der Strassenschneeprobe

Rapport zu Salzstreuung (Schneeprobe A)

Tiefbauamt des Kantons Graubünden
Uffizi da construcziun bassa dal cha
Ufficio tecnico dei Grigioni

Bezirk: V Davos Auftrag Nr.: 023927
Circondario: V Davos Numero: arico:
Funkruf:
Sigla ricetrasm.:

Winterdienststrapport Rapporto lavori invernali

Unternehmung: Kessler AG
Ditta:

GR: 5369 Datum: 5.3.14
GR: Data:

Rückkehr: km 136258 Uhr 5:45
Arrivo: km 136234 Uhr 4:30
Abfahrt: km 24 Uhr 1 1/4
Partenza: km Uhr
Total: km Uhr
Totale: km Uhr

Diesel: Liter 1x Vereina

1. Überzeit von 4:30 bis 5:45 Uhr 1 1/4 Std.
Ore supplementari da a Ore Std.
2. Überzeit von bis Uhr Std.
Ore supplementari da a Ore Std.

Gefahrene Strecken Tratta percorsa: Davos - Vereina / Parkplätze + Ausstellplätze putzen

Datum: 5.3.14
Data:

Rückkehr: km 136278 Uhr 12:00
Arrivo: km 136258 Uhr 11:00
Abfahrt: km 20 Uhr 1
Partenza: km Uhr
Total: km Uhr
Totale: km Uhr

Diesel: Liter 1x Vereina

1. Überzeit von bis Uhr Std.
Ore supplementari da a Ore Std.
2. Überzeit von bis Uhr Std.
Ore supplementari da a Ore Std.

Gefahrene Strecken Tratta percorsa: Davos - Vereina / Salz laden

Der Chauffeur Autista: Joh. Kessler Der Auftraggeber Committente:

	km	Std. ore	Streumittel mat. spargim.
d ☐ Pflügen Calaneve			
a ☐ Salzen/Splitten Insalare/inghiare			kg
v ☒ Pflügen und Salzen/Splitten Calaneve e insalare/inghiare	24	1 1/4	
o ☐ Leerfahrt Viaggi a vuoto			lt.
à 10 gr. m ²			
n ☐ Stillstandzeit von <u> </u> bis <u> </u> Uhr <u> </u> Std. tempo di attesa a <u> </u> Ore <u> </u> Std.			

(Überzeit, Früh- und Nachtdienst sowie an Samstagen, Sonntagen und allgemeinen Feiertagen) siehe Frontseite
(Ore supplementari, servizio mattino e notte come pure sabato e domenica e giorni festivi generali) vedi pagina di fronte

Tiefbauamt des Kantons Graubünden
Uffizi da construcziun bassa dal cha
Ufficio tecnico dei Grigioni

Bezirk: V Davos Auftrag Nr.: 023928
Circondario: V Davos Numero: arico:
Funkruf:
Sigla ricetrasm.:

Winterdienststrapport Rapporto lavori invernali

Unternehmung: Kessler AG
Ditta:

GR: 5369 Datum: 5.3.14
GR: Data:

Rückkehr: km 136297 Uhr 17:30
Arrivo: km 136278 Uhr 16:45
Abfahrt: km 19 Uhr 3/4
Partenza: km Uhr
Total: km Uhr
Totale: km Uhr

Diesel: Liter 1x Vereina

1. Überzeit von bis Uhr Std.
Ore supplementari da a Ore Std.
2. Überzeit von bis Uhr Std.
Ore supplementari da a Ore Std.

Gefahrene Strecken Tratta percorsa: Davos - Vereina

Datum:
Data:

Rückkehr: km Uhr
Arrivo: km Uhr
Abfahrt: km Uhr
Partenza: km Uhr
Total: km Uhr
Totale: km Uhr

Diesel: Liter

1. Überzeit von bis Uhr Std.
Ore supplementari da a Ore Std.
2. Überzeit von bis Uhr Std.
Ore supplementari da a Ore Std.

Gefahrene Strecken Tratta percorsa:

Der Chauffeur Autista: Der Auftraggeber Committente:

	km	Std. ore	Streumittel mat. spargim.
d ☐ Pflügen Calaneve			
a ☒ Salzen/Splitten Insalare/inghiare	19	3/4	kg
v ☐ Pflügen und Salzen/Splitten Calaneve e insalare/inghiare			
o ☐ Leerfahrt Viaggi a vuoto			lt.
à 8 gr. m ²			
n ☐ Stillstandzeit von <u> </u> bis <u> </u> Uhr <u> </u> Std. tempo di attesa a <u> </u> Ore <u> </u> Std.			

(Überzeit, Früh- und Nachtdienst sowie an Samstagen, Sonntagen und allgemeinen Feiertagen) siehe Frontseite
(Ore supplementari, servizio mattino e notte come pure sabato e domenica e giorni festivi generali) vedi pagina di fronte

Rapport zu Salzstreuung (Schneeprobe B)

Tagesrapport
Datum 01.03.14 - 31.03.14
TBA PROD

h KW mit Steuer

Tag	Zeit	Projekt, Aufgabe oder Auftrag	Beschreibung	KST/KTR	Erfasste Zeit	Soll-zeit	Ungeb. Komp. Gleit-zeit	stu
	10:00 - 13:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15213	2.00		2.00	
	13:15 - 16:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15311	3.00		3.00	
	16:15 - 18:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15210	1.00		1.00	
Tagestotal					11.50		8.50	
Di, 05.03.14	04:30 - 06:00 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15210	1.50			
	06:00 - 07:30 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15311	1.50			
	07:30 - 10:00 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15213	2.50		2.50	
	10:00 - 13:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15311	2.00		2.00	
	13:15 - 15:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15311	2.00		2.00	
	15:15 - 18:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15213	2.00		2.00	
Tagestotal					11.50		8.50	
Do, 06.03.14	05:00 - 06:00 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15210	1.00			
<i>Monstein.</i>	06:00 - 06:30 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15311	0.50			
	06:30 - 07:30 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit		1.00			
	07:30 - 18:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit		2.00		2.00	

à 10gr / m² (Salz)

Rapport zu Salzstreuung (Schneeprobe C)

Tagesrapport
Datum 01.03.14 - 31.03.14
TBA PROD

h KW mit Steuer

sample C

Tiefbauamt Graubünden
Uffizi da construcziun bassa dal Grischun
Ufficio tecnico dei Grigioni

Tag	Zeit	Projekt, Aufgabe oder Auftrag	Beschreibung	KST/KTR	Erfasste Zeit	Soll-zeit	Ungeb. Komp. Gleit-zeit	stu
Di, 18.03.14	13:15 - 18:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15210	4.00		4.00	
Tagestotal					4.00		4.00	
Mi, 19.03.14	--							
Tagestotal								
Do, 20.03.14	--							
Tagestotal								
Fr, 21.03.14	13:15 - 18:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15210	3.50		3.50	
Tagestotal					3.50		3.50	
Sa, 22.03.14	--							
Tagestotal								
So, 23.03.14	17:45 - 18:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15210	3.50			
<i>handwasserst.</i>	17:45 - 18:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15210	1.00			
	17:45 - 18:15 ✓	1101, Winterdienst Kantonsstrassen Offen, BU100, Winterdienst	Normale Arbeitszeit	15311	0.50			

à 8gr / m² (Salz)

Rapport zu Salzstreuung (Schneeprobe D)

Sample D 023933

Tiefbauamt des Kantons Graubünden
Ufficio da construcziun bassa dal chë
Ufficio tecnico del Grigioni

Bezirk: V DAVOS Auftrag N°: _____
Circondario: _____ Nummer: _____
Funkruf: _____
Sigla ricetrasm: _____

Winterdienststrappo Rapport lavori invernali

Unternehmung: Kessler AG

GR: 5367 Datum: 23.3.14

km	Std. ore	Streuemittel mat. spargim.
Pflügen		
d ☐ Calaneve		
a ☐ Salzen/Splitten		kg
a ☐ Insalare/inghiatare		
v ☒ Pflügen und Salzen/Splitten	164	8
v ☒ Calaneve e insalare/inghiatare		
o ☐ Leerfahrt		lt.
o ☐ Viaggi a vuoto		
n ☐ Stillstandzeit von _____ bis _____		
n ☐ tempo di attesa _____ a _____		

Überzeit, Früh- und Nachtdienst sowie an Sonntagen, Sonntagen und allgemeinen Feiertagen siehe Frontseite
(Ore supplementari, servizio mattino e notte come pure sabato e domenica e giorni festivi generali) vedi pagina di fronte

Gefahrene Strecken Tratta percorsa: Davos - Vereina Salz laden

Rückkehr: 136608 Uhr: 12¹⁵
Arrivo: km
Abfahrt: 136444 Uhr: 4¹⁵
Partenza: km
Total: 164 Uhr: 8
Totale: km
Diesel: Liter 8x Vereina

1. Überzeit von 4¹⁵ bis 12¹⁵ Uhr 8 Std.
Ore supplementari da _____ a _____
2. Überzeit von _____ bis _____ Uhr _____ Std.
Ore supplementari da _____ a _____

GR: 5367 Datum: 23.3.2014

km	Std. ore	Streuemittel mat. spargim.
Pflügen		
d ☐ Calaneve		
a ☐ Salzen/Splitten		kg
a ☐ Insalare/inghiatare		
v ☒ Pflügen und Salzen/Splitten	37	2
v ☒ Calaneve e insalare/inghiatare		
o ☐ Leerfahrt		lt.
o ☐ Viaggi a vuoto		
n ☐ Stillstandzeit von _____ bis _____		
n ☐ tempo di attesa _____ a _____		

Überzeit, Früh- und Nachtdienst sowie an Sonntagen, Sonntagen und allgemeinen Feiertagen siehe Frontseite
(Ore supplementari, servizio mattino e notte come pure sabato e domenica e giorni festivi generali) vedi pagina di fronte

Gefahrene Strecken Tratta percorsa: Davos - Vereina

Der Chauffeur Autista: J. A. Kessler Der Auftraggeber/Committente: V. Kessler

à 8g/m² 023934

Tiefbauamt des Kantons Graubünden
Ufficio da construcziun bassa dal chë
Ufficio tecnico del Grigioni

Bezirk: V DAVOS Auftrag N°: _____
Circondario: _____ Nummer: _____
Funkruf: _____
Sigla ricetrasm: _____

Winterdienststrappo Rapport lavori invernali

Unternehmung: Kessler AG

GR: 5367 Datum: 23.3.14

km	Std. ore	Streuemittel mat. spargim.
Pflügen		
d ☐ Calaneve		
a ☐ Salzen/Splitten		kg
a ☐ Insalare/inghiatare		
v ☒ Pflügen und Salzen/Splitten	22	1
v ☒ Calaneve e insalare/inghiatare		
o ☐ Leerfahrt		lt.
o ☐ Viaggi a vuoto		
n ☐ Stillstandzeit von _____ bis _____		
n ☐ tempo di attesa _____ a _____		

Überzeit, Früh- und Nachtdienst sowie an Sonntagen, Sonntagen und allgemeinen Feiertagen siehe Frontseite
(Ore supplementari, servizio mattino e notte come pure sabato e domenica e giorni festivi generali) vedi pagina di fronte

Gefahrene Strecken Tratta percorsa: Davos - Vereina

Rückkehr: 136667 Uhr: 18³⁰
Arrivo: km
Abfahrt: 136645 Uhr: 17³⁰
Partenza: km
Total: 22 Uhr: 1
Totale: km
Diesel: Liter 1x Vereina

1. Überzeit von 17³⁰ bis 18³⁰ Uhr 1 Std.
Ore supplementari da _____ a _____
2. Überzeit von _____ bis _____ Uhr _____ Std.
Ore supplementari da _____ a _____

GR: 5367 Datum: 23.3.14

km	Std. ore	Streuemittel mat. spargim.
Pflügen		
d ☐ Calaneve		
a ☐ Salzen/Splitten		kg
a ☐ Insalare/inghiatare		
v ☒ Pflügen und Salzen/Splitten	21	1
v ☒ Calaneve e insalare/inghiatare		
o ☐ Leerfahrt		lt.
o ☐ Viaggi a vuoto		
n ☐ Stillstandzeit von _____ bis _____		
n ☐ tempo di attesa _____ a _____		

Überzeit, Früh- und Nachtdienst sowie an Sonntagen, Sonntagen und allgemeinen Feiertagen siehe Frontseite
(Ore supplementari, servizio mattino e notte come pure sabato e domenica e giorni festivi generali) vedi pagina di fronte

Gefahrene Strecken Tratta percorsa: Davos - Vereina

Der Chauffeur Autista: J. A. Kessler Der Auftraggeber/Committente: V. Kessler

Literaturverzeichnis

- [1] **ASTRA, Bundesamt für Strassen.** Technisches Merkblatt Winterdienst, Lagebeurteilung. *Fachhandbuch Betrieb (Betrieblicher Unterhalt der Nationalstrassen)*. 2013, S. 1-3.
- [2] **Ramakrishna, D.M. und Viraraghavan, T.** Environmental impact of chemical deicers - A review. *Water, Air, and Soil Pollution*. 18. 5 2005, Bd. 166, S. 49-63.
- [3] **Nelson, S.S., Yonge, D.R. und Barber, M.E.** Effects of Road Salts on Heavy Metal Mobility in Two Eastern Washington Soils. *Journal of Environmental Engineering*. 2009, Bd. 135, 7.
- [4] **Klein-Paste, A., et al., et al.** Microstructural analytical techniques for snow compacted by an aircraft tire. *Tribology International*. 2007, Bd. 40, 2, S. 412-417.
- [5] **Pytko, J.** Determination of snow stresses under vehicle loads. *Cold Regions Science and Technology*. 2010, Bd. 60, 2, S. 137-145.
- [6] **Roberts, A.D. und Lane, J.D.** Friction of rubber on ice in the presence of salt. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 16, 1983, S. 275-285.
- [7] **Wahlin, J. und Klein-Paste, A.** The effect of common de-icing on the hardness of compacted snow. *Cold Regions Science and Technology*. 18. 9 2015, Bd. 109, S. 28-32.
- [8] **Wahlin, J., Leisinger, S. und Klein-Paste, A.** The effect of sodium chloride solution on the hardness of compacted snow. *Cold Regions Science and Technology*. 14. 2 2014, Bd. 102, S. 1-7.
- [9] **Szabo, D. und Schneebeli, M.** Subsecond sintering of ice. *Applied Physics Letters*. 2007, Bd. 90, 3, S. 151916-1 - 151916-3.
- [10] **Obbard, R.W., Troderman, G. und Baker, I.** Correspondence: Imaging brine and air inclusions in sea ice using micro X-ray computed tomography. *Journal of Glaciology*. 2009, Bd. 55, S. 1113.
- [11] **Kaempfer, T.U., Schneebeli, M. und Sokratov, S.** A microstructural approach to model heat transfer in snow. *Geophysical Research Letters*. 2005, Bd. 32, 21.
- [12] **Johnson, J.B. und Schneebeli, M.** Characterizing the microstructural and micromechanical properties of snow. *Cold Regions Science and Technology*. 17. 4 1999, Bd. 30, S. 91-100.
- [13] **Seta, E., et al., et al.** Method for predicting tire performance and method for designing tire. *Physics and Chemistry of Ice*. 26. January 2011, Bd. 45.
- [14] **Weast, R.C.** *CRC Handbook of Chemistry, and Physics*. Boca Raton, FL : CRC Press, 1989. Bd. 70.
- [15] **Wolf, A.V.** *Aqueous Solutions and Body Fluids*. New York : Harper and Row, 1966.
- [16] **Lindenmann, H.P., et al., et al.** *Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen*. ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT). Bern : Bundesamt für Strassen ASTRA, 2010. ASTRA 2007/012.
- [17] **Wahlin, J. und Klein-Paste, A.** Influence of microstructure on the consolidation of compressed snow. *Journal of Cold Regions Engineering*. 13. 8 2014, S. 1-12.

[18] **Klein-Paste, A. und Wahlin, J.** Controlling the properties of thin ice layers on pavement surfaces - an alternative explanation for anti-icing. *Physics and Chemistry of Ice*. 2010, Bd. 12.

Abbildungsverzeichnis

Abb.1 Schematischer Aufbau des Projekts mit den beiden Hauptexperimenten 1 und 2 und den darin aufgeführten Studien 1-4.	14
Abb. 2 Das μ CT ist in einer Kältekammer in welcher die Temperatur geregelt werden kann (oben). Ein Graustufenbild mit den drei Phasen Luft, Schnee und Salzlösung kann sehr gut unterschieden werden	17
Abb. 3 Reibungsmessgerät mit der aufgeschraubten Schneebox. Die Kräfte F_z senkrecht zur Fahrtrichtung X sowie die Scherkraft (F_x) sind eingezeichnet.	18
Abb. 4 Beispiel einer Reibungsmessung mit den beiden aufgezeichneten Normal- (rot) und Scherkraft (blau). Im Verlauf der Scherkraft ist das statische sowie das dynamische Reibungsregime erkennbar.	18
Abb. 5 Phasendiagramm von NaCl und Wasser in Abhängigkeit von Konzentration und Temperatur (Grafik aus www.meereisportal.de / Alfred Wegener Institut).	19
Abb. 6 Einschichtige Schneeprobe aus der Teststudie 1 und die zweischichtige Schneeprobe in der Studie 2.	20
Abb. 7 Herstellung der Schneeproben für die Experimente mit dem Reibungsmessgerät	20
Abb. 8 Schneekörner einer Strassenprobe (links) im Vergleich mit Schneekörner einer Laborprobe (rechts).	21
Abb. 9 Ablauf einer Schneeprobeentnahme auf der Strasse.	22
Abb. 10 Reibungskoeffizienten von der Schneeproben mit 0 – 5 % Solegehalt bei -3 °C.	23
Abb. 11 Reibungskoeffizienten der Schneeproben mit 0 – 5 % Solegehalt bei -6 °C.	24
Abb. 12 Reibungskoeffizienten der Schneeproben mit 0 – 5 % Solegehalt bei -12 °C.	24
Abb. 13 Statischer Reibungskoeffizient der Schnee-Soleproben.	25
Abb. 14 Dynamischer Reibungskoeffizient der Schnee-Salzproben bei verschiedenem Solegehalt und Temperatur.	26
Abb. 15 Eindringtiefe bei einer Kraft von 1 N und einer Temperatur von -3 °C.	27
Abb. 16 Eindringtiefe bei einer Kraft von 1 N und einer Temperatur von -6 °C.	27
Abb. 17 Eindringtiefe bei einer Kraft von 1 N und einer Temperatur von -12 °C.	28
Abb. 18 Mittelwerte der Eindringtiefen des Schneepenetrorometer.	28
Abb. 19 Das micro-CT-Bild zeigt den halbtransparenten (grauen) Eiswürfel und den geschmolzenen Tunnel (hell), der durch das aufgelöste Salzkorn entstanden ist.	29
Abb. 20 Schmelzprozess eines Salzkorns auf einer Eisoberfläche aufgezeichnet als Weg-Zeit Diagramm	30

Abb. 21 Experimentelle und theoretische Löslichkeitswerte des Schmelzexperimentes zeigen, dass die Salzlösung das Phasengleichgewicht noch nicht erreicht hat (Messungen bei -15°C).....	31
---	----

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 29.12.2014

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS 2012 / 601

Projekttitel: Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen

Enddatum: 31.12.2014

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Dieses Projekt untersucht die physikalischen Eigenschaften von Salz-Schnee-Gemischen. Einerseits spielen vor allem thermodynamische Prozesse beim Schmelzen des Salzkorns im Schnee eine Rolle, andererseits ist bis heute nicht geklärt, welchen Einfluss der Verkehr durch die Interaktion Schnee-Reifen auf die mechanischen Schneeeigenschaften hat. Die Schneebeurteilungen wurden im Labor mit einem Schneereibungsmessgerät, am micro-CT und mit dem Schneepenetrometer untersucht und analysiert. Die Experimente wurden bei -3°C , -6°C und bei -12°C durchgeführt. Es zeigte sich, dass bereits sehr tiefe Salzkonzentrationen einen erheblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften sowie auf die Reibungskoeffizienten haben. Bei hohen Temperaturen von -3°C wurde klar ersichtlich, dass die Salzkonzentration wenig Wirkung auf die Reibungskoeffizienten hat. Inwiefern sich dieses Resultat auf den Reibungskoeffizient von Fahrzeugen übertragen lässt, müssten weitere Experimente zeigen. Im Weiteren wurde der Schmelzvorgang eines Salzkorns auf einer Eisoberfläche gemessen, um über die Prozessgeschwindigkeit nähere Anhaltspunkte zu haben. Dieser Prozess läuft rasch ab. Die mittlere Eindringgeschwindigkeit eines Salzkorns beträgt 0.65 mm/min . Das bedeutet, dass das gestreute Salz auf den Strassen innert wenigen Minuten sich durch den Schnee geschmolzen hat und vermutlich als Schmelzwasser von der Strasse fliesst. Dass diese Beobachtungen mit der Realität übereinstimmen zeigt Studie 4. Schneebeurteilungen des vergangenen Winters wurden von der Strasse gesammelt und mit dem micro-CT analysiert und die Leitfähigkeit gemessen. Aus diesen Daten konnte die in der Strassenschneeprobe enthaltene Salzkonzentration ermittelt werden. Zusammen mit den Rapporten zur gestreuten Salzmenge an den spezifischen Lokalisationen und Daten zeigte sich, dass sich rund 90% des gestreuten Salzes nicht mehr auf der Strasse befindet.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

Zielerreichung:

Die Resultate zeigen, dass die hier durchgeführten Experimente wesentliche grundlegende Fragen klären können. In Bezug auf die Praxis konnte gezeigt werden, dass sehr geringe Solekonzentrationen zu grossen mechanischen Effekten führen. Diese Erkenntnisse stehen im Widerspruch zu anerkannten Werten der Praxis, welche ca. zehnmal höhere Salzkonzentrationen empfehlen. Bei ersten Messungen auf der Strasse konnte auch gezeigt werden, dass im Schnee-Salz-Gemisch auf der Strasse weniger als 10% der ausgebrachten Salzmenge enthalten ist.

Folgerungen und Empfehlungen:

Aufgrund der Resultate sollten diese Experimente weiter ausgeführt werden, mit dem Ziel die Resultate in der Praxis umzusetzen. Die Komplexität des Systems Salz, Schnee und Reifen ist äusserst gross; was aus den Resultaten dieses Projektes deutlich hervorgeht. Es wird empfohlen die Experimente kontinuierlich und systematisch auszubauen bis ein vollständiges Grundwissen vorhanden ist um die Resultate in der Praxis umzusetzen. Eine gezielte Erforschung der Wirkung von Salz auf die Verbesserung der Reibungskoeffizienten und des Lebenszyklus des Salzes auf der Strasse könnte zu einem ökologischeren und effizienteren Strassenunterhaltes im Winter führen.

Publikationen:

Projektschlussbericht

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Schneebeli

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Nebst bestätigten Erwartungen beinhalteten die Ergebnisse aus den Laboruntersuchungen teilweise auch Überraschungen. Eine wichtige Erkenntnis war sicher, dass bereits geringe Mengen von Salz grossen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Reibungseffekte haben. Das bestätigt auch, dass Salz nach wie vor das richtige Medium ist zur Schneebe- kämpfung. Eher überraschend war die Tatsache, dass die Reibungskoeffizienten mit mehr Salz nicht nachhaltig erhöht werden. Den Erwartungen entsprechend waren die Resultate aus den Schneeproben von der Strasse und den gemessenen Salzkonzentrationen, die sich nach einer Stunde auf 10% reduzierten. Das wurde auch bereits aus Versuchen in Deutschland festgestellt. Alle Experimente stammen aus Laborversuchen. Die Verhältnisse im praktischen Winterdienst sind sehr unterschiedlich und können andere Resultate zeigen.

Umsetzung:

Die Tatsache dass relativ geringe Mengen von Salz ausreichen um eine Verbesserung der Reibungswerte zu erzielen, führt zur Annahme, dass grundsätzlich zu viel Salz verbraucht wird um Schnee und Eis auf den Fahrbahnen zu bekämpfen. Dies wird noch verstärkt durch die Tatsache der grossen Salzverluste in den Schneeproben nach relativ kurzer Zeit. Bei der Umsetzung gilt es diesem Umstand Rechnung zu tragen, insbesondere bei Empfehlungen der Streumenge in Normen und Richtlinien.

weitergehender Forschungsbedarf:

Die Interaktion von Winterreifen auf Schneefahrbahnen die festgefahren sind, gilt es jetzt insbesondere in praktischen Feldversuchen auf den Strassen zu untersuchen. Weiter wäre auch interessant zu klären wohin das Salz verfrachtet wird, das in den Schneeproben nicht mehr vorhanden war. Bleibt es auf der Fahrbahn oder wird es in die Umgebung verfrachtet?

Einfluss auf Normenwerk:

Die Erkenntnisse liefern wichtige Grundlagen zur Überarbeitung der Normen SN 640 760 Schneecharakterisierung und SN 640 772 Bekämpfung der Winterglätte mit Streumitteln

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Rösti

Vorname: Martin

Amt, Firma, Institut: Tiefbauamt des Kantons Bern, Nationalstrassen Betrieb

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbauasphalt mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastuktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Ver-	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		kehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarmer Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektiertungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Vieillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdruckverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormassstab	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeugrückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebspartikeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDA in SVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kapthaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrsintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlag-schutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009