

# **Fahrbahngriffigkeit bei der Verwendung von Calciumchlorid-Lösung in Taumittelsprühanlagen**

**Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen  
Bereich Straßenverkehrstechnik**



# **Fahrbahngriffigkeit bei der Verwendung von Calciumchlorid-Lösung in Taumittelsprühanlagen**

Dipl.-Ing. J. Kamplade  
H. Sievert

Bundesanstalt für Straßenwesen,  
Bergisch Gladbach, Februar 1989

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen

Bereich Straßenverkehrstechnik

Brüderstraße 53

D-5060 Bergisch Gladbach 1

Telefon: (022 04) 4 30

Telex: 8 878 483 bas d

## KURZFASSUNG, ABSTRACT, RÉSUMÉ

### Fahrbahngriffigkeit bei der Verwendung von Calciumchlorid-Lösung in Taumittelsprühanlagen

Die Forschungsarbeit hatte zu klären, ob beim Einsatz von Calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) in Taumittelsprühanlagen beim Straßenwinterdienst die Möglichkeit einer besonderen Beeinträchtigung der Fahrbahngriffigkeit besteht. Die Untersuchungen zeigen, daß eine unerwartete Glätte auftreten kann, wenn  $\text{CaCl}_2$ -Hexahydrat ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) aus der Taumittellösung auf der Fahrbahn auskristallisiert. Voraussetzung hierfür sind aber klimatische Bedingungen, die im Winter selten auftreten: niedrige relative Luftfeuchtigkeiten (kleiner 43 %) bei Temperaturen um  $0^\circ\text{C}$ . Besondere Glätte ist vor allem dann festzustellen, wenn in der Übergangsphase neben dem auskristallisierten  $\text{CaCl}_2$ -Hexahydrat auch  $\text{CaCl}_2$ -Lösung vorhanden ist. Das Ausmaß der Glättebildung wurde unter Variation der Parameter  $\text{CaCl}_2$ -Menge, Makro- und Mikrotexur der Fahrbahn sowie der relativen Luftfeuchtigkeit in umfangreichen Meßreihen mit dem SRT-Gerät in einer Klimakammer näher ermittelt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß bei größeren  $\text{CaCl}_2$ -Ansammlungen die Griffigkeit bis unter das Niveau absinken kann, das gegeben ist, wenn Heizöl auf die Fahrbahn ausgeflossen ist. Die Ergebnisse machen ferner deutlich, daß eine Hydratschicht von 1/100 mm Dicke bereits ausreicht, die Elemente der Mikrorauheit der Fahrbahnoberfläche weitgehend außer Kraft zu setzen, die für die Griffigkeitswirkung der Oberfläche bei Nässe verantwortlich sind. Auf Belägen mit überdurchschnittlichen Texturausprägungen sind aber  $\text{CaCl}_2$ -Konzentrationen bis  $5 \text{ g/m}^2$   $\text{CaCl}_2$  (Feststoff) unkritisch. Es wird vorgeschlagen, im Rahmen der Erhaltung der Fahrbahnbeläge im Bereich von Taumittelsprühanlagen stets für eine überdurchschnittliche Rauheit und Griffigkeit zu sorgen und über die Steuerung der Taumittelsprühanlagen die Ansammlung größerer  $\text{CaCl}_2$ -Mengen (über  $5 \text{ g/m}^2$ ) zu unterbinden.

### The effect on skid resistance of the use of calcium chloride solutions in spreaders for de-icing chemicals

The objective of the research project was to answer the question of whether or not calcium chloride ( $\text{CaCl}_2$ ) in spreaders for de-icing chemicals used within the framework of winter maintenance would result in particularly detrimental effects on the skid resistance of roadways. The investigations revealed the possibility of unexpected slipperiness when  $\text{CaCl}_2$ -hexahydrate ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) crystallizes out from the de-icing solution. This requires however weather conditions rarely occurring in the winter season: low relative air humidity (less than 43%) around  $0^\circ\text{C}$ . A special degree of slipperiness was detected in the transitional phase when part of the  $\text{CaCl}_2$ -solution in addition to the crystallized  $\text{CaCl}_2$ -hexahydrate is still present on the roadway. In order to determine the extent and degree of slipperiness, a large series of measurements was undertaken in a climatic

chamber by means of the SRT equipment (British pendulum) varying the following parameters: quantity of  $\text{CaCl}_2$ , macro- and microtexture of pavement surfacings, relative air humidity. The research findings revealed that the skid resistance can drop below the level attained on pavements in the presence of escaped fuel oil when larger quantities of  $\text{CaCl}_2$  accumulate on the roadway. The findings further revealed that a hydrate film of 1/100 mm already suffices to invalidate the anti-skid effect of the fine-textured surface elements which are causal for the friction properties of pavements in wet conditions. On above-average textured surfacing,  $\text{CaCl}_2$  concentrations of up to  $5 \text{ g/m}^2$   $\text{CaCl}_2$  (solid matter) have been found to be uncritical. Within the scope of pavement maintenance it is thus proposed to ensure exceptional texture and skid resistance properties on surface areas within the reach of de-icing chemical spreaders and to prevent the accumulation of larger  $\text{CaCl}_2$  quantities (greater than  $5 \text{ g/m}^2$ ) by controlling the operation of the spreaders accordingly.

### **Les propriétés antidérapantes du revêtement sous l'action de la saumure de chlorure de calcium distribuée par des ensembles répandeurs de produits de dégel**

La recherche avait pour but de vérifier si l'utilisation du chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) par des répandeurs de produits de dégel pourrait donner lieu à un impact particulièrement défavorable sur l'adhérence. Les études démontrent qu'une glissance inattendue peut se présenter lorsque se produit sur le revêtement une cristallisation de  $\text{CaCl}_2$ -hexahydrate ( $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) de la solution de produits de dégel. Ceci présuppose cependant des conditions climatiques qui sont très rares en temps d'hiver, à savoir une humidité atmosphérique relativement faible à  $0^\circ\text{C}$  (moins de 43%). Une glissance particulièrement prononcée peut être observée lorsqu'on rencontre dans la phase de transition également une solution de  $\text{CaCl}_2$ , à côté du  $\text{CaCl}_2$ -hexahydrate cristallisé. Afin de déterminer dans quelle mesure se produit de la glissance, on a effectué des séries de mesure de grande envergure avec l'appareil SRT (Skid Resistance Tester) dans le boîtier climatisé, sous variation des paramètres suivants: quantité de  $\text{CaCl}_2$ , micro- et macrotexture du revêtement ainsi que l'humidité atmosphérique relative. Les résultats des études signalent qu'en présence d'importantes accumulations de  $\text{CaCl}_2$ , l'adhérence peut être réduite jusqu'à tel point que l'on observe lorsque du pétrole lourd se répand sur le revêtement. De plus, les résultats enseignent qu'une couche de hydrates d'une épaisseur de 1/100 mm suffit déjà à empêcher en large mesure l'effet des éléments de la microrugosité dont dépend la qualité antidérapante de la surface en temps humide. En ce qui concerne les revêtements d'une texture extraordinairement rugueuse, des concentrations de  $\text{CaCl}_2$  jusqu'à  $5 \text{ g/m}^2$  de  $\text{CaCl}_2$  (substance solide) ne sont cependant pas encore préoccupantes. Dans le cadre de la conservation des revêtements de chaussées, il est proposé de garantir dans les zones atteintes par les ensembles répandeurs toujours une rugosité et une adhérence fort marquées et d'éviter à l'aide du réglage des répandeurs l'accumulation de grandes quantités de  $\text{CaCl}_2$  (plus de  $5 \text{ g/m}^2$ ).

# I N H A L T

	Seite
1 Einführung	1
2 Versuchsrahmen	5
2.1 CaCl <sub>2</sub> -Lösungsfilm- und Hydratschichtdicken	5
2.2 Temperatur	7
2.3 Fahrbahnproben	8
2.4 Griffigkeitsbewertung	10
2.5 Relative Luftfeuchtigkeit	12
2.6 Besonderheiten im Versuchsablauf	13
3 Versuchsergebnisse	15
3.1 Fahrbahngriffigkeit bei der Auskristallisation größerer Calciumchloridmengen	15
3.2 Auswirkungen von im Winterdienst üblichen Calciumchloridmengen auf die Griffigkeit	17
4 Folgerungen für den wissenschaftlichen Erkenntnisstand	22
5 Folgerungen für die Verwendung von Calciumchlorid in Taumittelsprühanlagen	25
SCHRIFTTUM	28
ANLAGEN 1 - 14	



## 1 Einführung

Im Rahmen des Einsatzes von  $\text{CaCl}_2$ -Lösungen als flüssiges Taumittel im Straßenwinterdienst wurde in einzelnen Fällen von tatsächlichen oder vermeintlichen Glättebildungen berichtet. Ferner ereigneten sich im Jahr 1986 Unfälle, nachdem infolge eines technischen Defekts an der Leitung einer Taumittelsprühanlage eine größere Menge Calciumchlorid-Lösung auf die Fahrbahn gelaufen war. Dies veranlaßte den Bundesminister für Verkehr, die Bundesanstalt für Straßenwesen mit Untersuchungen über potentielle Risiken der Beeinträchtigung der Fahrbahngriffigkeit durch den Einsatz von  $\text{CaCl}_2$  an Taumittelsprühanlagen zu beauftragen.

Verschiedene daraufhin durchgeführte Versuchsreihen der Außenstelle Inzell der BAST, für die das Pendelgerät (SRT) im Labor und auf der Straße eingesetzt wurde, hatten im wesentlichen folgende Ergebnisse gezeigt:

- Die Fahrbahngriffigkeit bei Nässe wird durch im Wasser gelöste Taumittel zusätzlich reduziert, und zwar umso mehr, je höher die Taumittelkonzentration ist. Dies gilt gleichermaßen auch für  $\text{NaCl}$ . Allerdings geht die Lösungskonzentration bei diesem Salz nur bis maximal 26 % bei  $0^\circ\text{C}$ ;  $\text{CaCl}_2$  erreicht dagegen Lösungskonzentrationen bis ca. 37 %.
- Die festgestellten Griffigkeitsabnahmen gegenüber dem normalnassen Zustand sind jedoch relativ gering. Gemittelt über verschiedene Fahrbahnproben betragen sie ca.

7 % bei 20-prozentiger

11 % bei 30-prozentiger

20 % bei 37-prozentiger

CaCl<sub>2</sub>-Konzentration der zur Annässung der Oberfläche verwendeten Taumittellösung.

- Die Griffigkeitsabnahmen variieren in Abhängigkeit von der Ausprägung der Fahrbahnrauheit.

Ferner wurde festgestellt, daß bereits sehr geringe Lösungsfilm-dicken ausreichen (0,02 mm rechnerische Dicke), um die Griffigkeit herabzusetzen, und daß sich in dünnen Lösungsfilmen die CaCl<sub>2</sub>-Konzentration in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchtigkeit offenbar rasch ändert, wie indirekt aus mit der Luftfeuchtigkeit korrespondierenden Griffigkeitsänderungen abgeleitet wurde.

Die in diesen Versuchsreihen durch CaCl<sub>2</sub>-Lösungsfilme bewirkten Griffigkeitsabnahmen waren aber zu gering, um die verschiedentlich berichteten Glättebildungen damit erklären zu können. Wenn ohne meßtechnische Hilfsmittel auf einer relativ griffigen Fahrbahn (wie im Fall der defekten Taumittelsprühanlage) eine offenbar besondere Fahrbahnglätte wahrgenommen wird, so müssen wesentlich ausgeprägtere zusätzliche Griffigkeitsreduzierungen gegenüber dem normal-nassen Zustand der Fahrbahn vorliegen.

Ferner zeigen die bekannten Phasendiagramme für Wasser-Calciumchlorid, daß in Abhängigkeit von der Temperatur, dem Dampfdruck und der CaCl<sub>2</sub>-Konzentration auch die feste Phase, das auskristallisierte CaCl<sub>2</sub>-Hexahydrat (CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, in den hier relevanten Temperaturbereichen), in die Betrachtungen einzubeziehen ist; auch während der kalten Jahreszeit kann ein Auftreten der klimatischen Voraussetzungen, die für die Rekristallisation von CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O aus einer zunächst gering

konzentrierten Lösung erforderlich sind, nicht ohne weiteres ausgeschlossen werden.

Der Frage einer möglichen Glättebildung unter diesen Voraussetzungen wurde deshalb erneut nachgegangen, obwohl in den Fachgremien eine Bildung des  $\text{CaCl}_2$ -Hydrats auf der Fahrbahn damals für unwahrscheinlich erachtet wurde und vor allem Zweifel bestanden, daß - sollte dieser Fall einmal eintreten - durch eine solche Hydratbildung eine besondere Glätte entstehen könnte. Da für diese ergänzenden Versuche, die in der Bundesanstalt für Straßenwesen in Bergisch Gladbach vorgenommen wurden, eine Klimakammer, in der die Hydratbildung unter wirklichkeitsnahen Randbedingungen hätte simuliert werden können, damals nicht verfügbar war, wurde eine für Griffigkeitsmessungen ausreichend große Fläche mit einer  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  Kristallschicht auf eine Weise präpariert, die ebenfalls aus dem Phasendiagramm hergeleitet werden kann. Über  $30^\circ\text{C}$  kann die feste Phase  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  nicht auftreten. Eine mengenmäßig entsprechend zusammengesetzte Schmelze (unter Berücksichtigung der Mol-Gewichte von  $\text{H}_2\text{O}$  und  $\text{CaCl}_2$  aus - etwas mehr als - 108,12 Gewichtsteilen Wasser und 110,99 Gewichtsteilen wasserfreiem Calciumchlorid) wurde auf eine Oberflächenprobe dünn ausgegossen: nach Abkühlung unter eine Temperatur von  $30^\circ\text{C}$  muß das Hexahydrat auskristallisieren.

Auf einer so auskristallisierten  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ -Schicht wurden mit dem Pendelgerät wesentlich niedrigere Werte gemessen als beim Vorhandensein von reinen Wasserfilmen oder auch Calciumchlorid-Lösungsfilmen auf einer Fahrbahndecke. Je nach momentaner Rauigkeit der sich langsam an der Oberfläche auflösenden Kristallschicht wurden mit dem Pendelgerät Meßwerte in einem Bereich von 22 bis 36 SRT-Einheiten beobachtet. Diese Werte liegen zwar deutlich über den Meßwerten, die bei  $0^\circ\text{C}$  auf Glatteis auftreten (ca. 12 SRT-Einheiten); die nied-

rigsten Meßwerte, die mit 22 bis 26 SRT-Einheiten erfaßt wurden, liegen aber kaum höher als die Werte auf Eis bei sehr tiefen Temperaturen ( $-15^{\circ}\text{C}$ ). Und die Meßwerte im oberen Bereich der Ergebnisspanne sind mit SRT-Werten vergleichbar, die auf Fahrbahnen gemessen werden, wenn leichtes Heizöl oder Dieselöl ausgelaufen ist (30...35 SRT-Einheiten). Die besonders niedrigen Griffigkeiten, die bei diesem Zustand auftreten, den wir als  $\text{CaCl}_2$ -Glätte bezeichnen wollen, werden offenbar durch die kristalline Zwischenschicht in Verbindung mit einem hauchdünnen Lösungsfilm bewirkt, der sich bei entsprechender Luftfeuchtigkeit an der Hydratoberfläche bildet.

Diese Ergebnisse waren Anlaß für einen neuen Auftrag des BMV, diesem Phänomen differenzierter nachzugehen und die Möglichkeit der Bildung von  $\text{CaCl}_2$ -Glätte durch Rekrystallisation unter wirklichkeitsnahen Randbedingungen zu untersuchen. Hierzu waren die klimatischen Abläufe nachzuahmen, die bei Calciumchloridmodifikationen zur natürlichen Abgabe oder Aufnahme von  $\text{H}_2\text{O}$  führen. Der Fortgang dieser Forschungsarbeit wurde allerdings durch technische Störungen und Fehler in der automatischen Steuerungsanlage der bereitgestellten Klimakammer erheblich verzögert. Nach mehreren Reparaturen konnte mit den eigentlichen Versuchsreihen erst im Herbst 1987 begonnen werden.

## 2 Versuchsrahmen

### 2.1 $\text{CaCl}_2$ -Lösungsfilm- und Hydratschichtdicken

Um bei den Untersuchungen möglichst wirklichkeitsnahe Versuchsbedingungen zu erhalten, wurde die Calciumchloridlösung - wie bei den meisten Taumittelsprühanlagen - in einer annähernd 25-%igen Konzentration auf Fahrbahnproben aufgesprüht. Mit einem Feinstzerstäuber wurden jeweils Mengen von 0,5 bzw. 1  $\text{cm}^3$  wie eine Farbe auf den 12 x 23 cm großen Proben gleichmäßig verteilt ausgebracht. Die  $\text{CaCl}_2$ -Sole mußte dabei sehr fein zerstäubt werden, um bei den sehr kleinen Taumittelmengen von Anfang an und ohne zusätzliche Manipulationen, deren Auswirkungen auf die verbleibende Lösungsmenge auf den Fahrbahnproben nur schwer kontrollierbar wäre, einen geschlossenen Lösungsfilm auf den Oberflächen zu erhalten. Wegen der begrenzten Probenoberfläche traten dabei jedoch Sprühverluste auf. Sie wurden in gesonderten Versuchen über Differenzwägungen an den Proben genauer bestimmt. Sie lagen im Mittel bei 30 % und wurden mit diesem Betrag allgemein in Abzug gebracht.

Die auf die Untersuchungsflächen unter Abzug der geschilderten Sprühverluste applizierten Lösungs- und Salzmengen und die daraus resultierenden rechnerischen Lösungsfilm- und Hydratschichtdicken sind in der Tabelle 1 zusammengefaßt. Die größeren Schichtdicken - entsprechend einer Taumittellösungsmenge von 60 und 90  $\text{g}/\text{m}^2$  - wurden in den Versuchen stufenweise aufgebaut. Zunächst wurden die Messungen auf den mit 30  $\text{g}/\text{m}^2$  Taumittellösung präparierten Proben ausgeführt. Danach wurde auf die trockene Oberfläche - also auf die Oberfläche mit der auskristallisierten ersten Hydratschicht - erneut 25-%ige Lösung aufgesprüht. Auf diese Weise wurden die Proben für die Versuchsreihe mit 60  $\text{g}/\text{m}^2$  Taumittellösung

präpariert und später auch entsprechend die dritte Stufe für die Versuchsreihe mit 90 g/m<sup>2</sup>. In einer gesonderten Meßserie wurden die Versuche mit einer Taumittelmenge von 15 g/m<sup>2</sup> ausgeführt, nachdem die Probenoberflächen mehrmals sorgfältig mit klarem Wasser abgespült worden waren.

Tabelle 1: Rechnerische Mengen und Schichtdicken der CaCl<sub>2</sub>-Modifikationen in der Untersuchung

25%-ige CaCl <sub>2</sub> -Lösung		CaCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O
Menge (g/m <sup>2</sup> )	Filmdicke (mm)	Menge (g/m <sup>2</sup> )	Schichtdicke (mm)
15	0,0125	3,8	0,0042
30	0,025	7,5	0,0085
60	0,050	15,0	0,0170
90	0,075	22,5	0,0255

Bei den angegebenen Lösungsmengen und Schichtdicken handelt es sich um angenäherte Werte. Dies ist zunächst eine Folge der rechnerischen Behandlung der Sprühverluste; die für genaue Bestimmungen erforderlichen Präzisionswägungen konnten wegen der hygroskopischen Effekte nur unter besonderen Vorkehrungen und wegen des erheblichen Aufwands nur in einzelnen Fällen ausgeführt werden. Hinzu kommt, daß im Laufe der zahlreichen Messungen, bei welchen der Gummigleitkörper des Pendelgerätes stets in gleicher Richtung über die Oberflächen gleitet, innerhalb einer Versuchsreihe sicher kleinere Verluste von CaCl<sub>2</sub> auftreten. Ferner spielt der Umstand eine Rolle, daß auch auf bituminösen Fahrbahnproben das gelöste Calciumchlorid teilweise in den Belag bzw. in dessen Mineralstoffe eingedrungen sein muß; wie später festzustellen war, konnte das CaCl<sub>2</sub> auch durch das stets praktizierte gründliche Abspülen und Abbürsten der Probenoberflächen nicht wieder vollständig ausgewaschen werden. Auf gereinig-

ten Proben bildete sich bei entsprechender Luftfeuchte nach einiger Zeit allmählich ein zunehmender Wasserniederschlag, der nur durch erneut an die Oberfläche gewandertes  $\text{CaCl}_2$  bedingt sein konnte; dies bestätigten auch Geschmacksproben.

Die in den Versuchsreihen berücksichtigten Lösungsfilmstärken waren ausgehend von den bei Taumittelsprühanlagen üblichen Dosierungen festgelegt worden. Die kleinste Menge von  $15 \text{ g/m}^2$  entspricht der bei vielen Anlagen üblichen untersten Stufe von 2 Sprühstößen á  $7,5 \text{ g/m}^2$  25-prozentiger Taumittel-lösung. Auf der Straße dürften zwar deutlich größere Tröpfchendurchmesser ausgesprüht werden als bei der Zerstäubung im Versuch. Dennoch wird auch dort durch die Einwirkungen des Verkehrs ein geschlossener dünner Film entstehen, oder die Sole wird im Zuge der weiteren Verdünnung beim Tauprozess gleichmäßig verteilt werden. Das Hydrat wird somit auch auf der Straße in einer ähnlichen Schichtdicke auskristallisieren wie in der Versuchsanordnung, wenn die Luftfeuchtigkeit unter den kritischen Wert absinkt.

## 2.2 Temperatur

Die Versuche wurden bei  $15^\circ \text{ C}$ , der Belagstemperatur, bei der sich die Verkehrsunfälle an der Taumittelsprühanlage nach dem oben erwähnten technischen Defekt im Jahr 1986 ereigneten, durchgeführt. Deutlich niedrigere Temperaturen ließ die technische Ausrüstung der Klimakammer - bei gleichzeitiger Regelung der Luftfeuchtigkeit im für die Untersuchungen erforderlichen Bereich - nicht zu. Eine Variation des Parameters Temperatur erfolgte deshalb nicht.

Bei einer Veränderung der Versuchstemperatur können wesentlich andere Voraussetzungen für eine mögliche Glättebildung durch  $\text{CaCl}_2$  auch nicht erwartet werden. Würden die Versuche

bei 0°C ausgeführt, so verschiebt sich der Bereich der kritischen Luftfeuchtigkeit, bei welchem den Kraftschluß zwischen Gummi und Fahrbahn beeinträchtigende Gemenge aus gelöstem und hydratisiertem  $\text{CaCl}_2$  auftreten. Der kritische Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit, bei dem sich das Hydrat bildet oder auch wieder in Lösung geht, kann aus den Daten verschiedener Handbücher und technischer Unterlagen für 15°C mit etwa 36 % interpoliert berechnet werden. Bei 0°C würde die kritische Luftfeuchtigkeit 41,1 bis 42,5 % betragen und bei -10°C liegt sie bei etwa 45 %.

### 2.3 Fahrbahnproben

In den Untersuchungen wurden insgesamt 6 Fahrbahnproben berücksichtigt, darunter eine aus einer älteren Zementbetondecke ausgesägte Oberflächenprobe, die jedoch nach einigen Vorversuchen von den weiteren Untersuchungen ausgeschlossen wurde. Mit vertretbarem Aufwand waren auf dieser Probe keine reproduzierbaren Versuchsbedingungen herzustellen. Die bis zu einer Menge von 125 g/m<sup>2</sup> aufgesprühte  $\text{CaCl}_2$ -Lösung wurde rasch von der Zementbetondecke aufgesaugt. Die Auswirkungen des Calciumchlorids waren deshalb auf dieser Probe gering; ob auf der Straße durch eine weitere Speicherung von  $\text{CaCl}_2$  in der Fahrbahndecke problematische Anreicherungen möglich sind und ob in deren Folge auch deutlichere Glättebildungen auf Zementbeton auftreten könnten, bleibt offen.

Die in den eigentlichen Untersuchungen berücksichtigten fünf Proben aus bituminösen Fahrbahndecken sind in der Tabelle 2 näher beschrieben und in den Anlagen 1-3 abgebildet. Mit Fahrbahnrauheiten, die bei der üblichen Messung am Pendelgerät (angenäßte Oberfläche) Ergebnisse zwischen  $t_{\text{SRT}} = 42$  und 73 (SRT-Einheiten) zeigen, wurden Beispiele mit sehr schlechtem bis sehr gutem Zustand der Mikrotextrur berück-

sichtig. Auf Straßen unter starkem Verkehr (Autobahnen) liegt der häufigste mit dem Pendelgerät ermittelte Wert zwischen 55 und 60 SRT-Einheiten. Die Makrotexturkomponente war auf den Oberflächen 1 und 2 gut bis sehr gut ausgeprägt (0,5 und 1,4 mm mittlere Rauhtiefe ermittelt mit dem Sandfleckenverfahren) und auf den übrigen drei Oberflächen (0,25 bis 0,3 mm mittlere Rauhtiefe) weniger gut. Am häufigsten sind Makrotexturausprägungen im Bundesfernstraßennetz mit etwa 0,4 mm mittlerer Rauhtiefe bzw. mit einer Makrotexturkennzahl von  $t_{AM} \approx 10$  bewertet mit dem Ausflußmesser nach Moore.

Tabelle 2: Oberflächenmerkmale der Fahrbahnproben

Lfd. Nr.	Oberflächentyp		Beschreibung der Fahrbahnproben	Meßwerte zum Oberflächenzustand			
	Mikro- rau- heit	Makro- rau- heit		Englisches Pendelgerät (SRT-Einh.) trocken	-naß- $t_{SRT}$	Ausfluß- messer (s) $t_{AM}$	Sandfleck- verfahren (mm) mittlere Rauhtiefe
1	sehr hoch	sehr grob	Gußasphalt, abgestreut mit Splitt 2/5, genoppt, ( GA 0/16 )	97	73	1	1,4
2	sehr hoch	gut	Asphaltbeton, Oberfläche verwittert, ( AB 0/8 )	93	72	6	0,5
3	mittel	mittel	Asphaltbeton, stark befahren, ( AB 0/11 )	96	60	15	0,3
4	stark poliert	mittel	Bituminöse Oberfläche, mit Natursand 0/2, poliert ( GA 0/8 )	98	42	14	0,25
5	mittel	sehr fein	Bituminöse Decke, Mörtelanreicherung ( GA 0/16 )	97	57	68	< 0,2

Der Kraftschluß zwischen Gummi und Fahrbahn ist bei trockener Oberfläche stets sehr hoch und wird von der Fahrbahnrauheit nur sehr wenig beeinflusst. Bei Nässe ist jedoch fahrbahnseitig allein eine entsprechende Ausprägung von Mikro-

und Makrotextur für die Übertragbarkeit von Reibkräften entscheidend. Primär kommt es dabei darauf an, daß der Reifengummi mit der Mikrotextur in eine hinreichende Wechselwirkung treten kann; die Makrotextur ist nur gemeinsam und in Kombination mit einer höheren Mikrotexturausprägung von zunehmender Bedeutung für den Kraftschluß bei Nässe bei hohen Fahrgeschwindigkeiten.

Für die vorliegenden Untersuchungen mußten Fahrbahnproben mit verschiedenen Kombinationen der beiden Texturkomponenten berücksichtigt werden, um beurteilen zu können, unter welchen Voraussetzungen die extrem dünnen  $\text{CaCl}_2$ -Hydratschichten im Gemenge mit  $\text{CaCl}_2$ -Lösung oder die geschichtete Überlagerung der beiden  $\text{CaCl}_2$ -Modifikationen zu einer maßgebenden Reduzierung der Kraftübertragungsmöglichkeit zwischen Gummi und Fahrbahnoberfläche führen können.

#### 2.4 Griffigkeitsbewertung

Zur Beurteilung der Griffigkeit wird in dieser Untersuchung das Pendelgerät (SRT) eingesetzt. Es bewertet aufgrund der Gerätekonzeption die Auswirkung der Mikrorauheit der Fahrbahnoberfläche auf die Kraftübertragung zwischen dem Gummigleitkörper des Gerätes und der Fahrbahn, die bei der normalen Anwendung des Meßverfahrens durch einen Wasserfilm gestört ist. Die Fahrbahngriffigkeit gilt als beeinträchtigt - und das im "Merkblatt über Fahrbahngriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe" für die Ergebnisse am "Blockierten Schlepprad" vorgegebene Richtwertniveau im allgemeinen als unterschritten - wenn SRT-Werte unter 50 gemessen werden.

Die Flächenpressung in der Berührungszone des Gleitkörpers mit der Fahrbahnoberfläche liegt in der Größenordnung der Kontaktdrücke von Pkw-Reifen. Aus der Anpreßkraft des Gleit-

körpers von ca. 22 N, der Kantenlänge des Gleitkörpers von 75 mm und der Reibkantenbreite des Gummis von im Mittel 1,5 mm im Gebrauchszustand ergibt sich ein Kontaktdruck von ca. 0,2 N/mm<sup>2</sup>; ein ähnlicher Druck wird auch von Reifen erzeugt, die einen Innendruck von etwas weniger als 2 bar haben. Damit dürfte bei den Messungen mit dem Pendelgerät von ähnlichen mechanischen Beanspruchungen an den auskristallisierten CaCl<sub>2</sub>-Hydratschichten auszugehen sein, wie sie auch unter den Drücken von Pkw-Reifen entstehen können; sollte z.B. die kristalline CaCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O-Schicht durch die Beanspruchungen bei diesen Reibvorgängen von den Rauhschichten des Belages verlagert und in die Rauhtiefen verdrängt werden können, so dürfte dieser für die Griffigkeit positive Effekt auch in den Versuchen mit dem Pendelgerät eintreten.

Für jeden einzelnen Versuch werden auf einer Probe jeweils fünf Messungen mit dem Pendel ausgeführt. Die fünf Meßwerte werden gemittelt und so zu einem Meßergebnis zusammengefaßt. Ein Anstieg der Meßwerte innerhalb dieser fünf Messungen, der auf den dünnen Hydratschichten eine Verminderung der wirksamen Dicke der kristallinen Gleitschichten auf den Rauhschichten signalisieren könnte, wurde aber nicht beobachtet. Soweit überhaupt aus den Veränderungen der Meßanzeige im Laufe der wiederholten Pendeldurchgänge Tendenzen feststellbar sind, wäre eher auf einen die Kristallschichten glättenden, die Griffigkeit erniedrigenden Effekt aus dem wiederholten Reibvorgang zu schließen. Würden die Rauhschichten der Fahrbahnproben die Kristallschichten bei wiederholter Beanspruchung durch den Reibvorgang aber partiell durchstoßen, so müßten die Reibwerte dagegen zunehmen.

In der vorliegenden Untersuchung waren nur extrem dünne Lösungs- bzw. Hydratschichten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Griffigkeit zu erfassen. Da diese dünnen Schichten

ten mit 0,004 bis 0,025 mm Dicke im kristallisierten Zustand (siehe Tabelle 1) die Fahrbahngriffigkeit nur dadurch beeinträchtigen können, daß sie die Mikrorauheit außer Kraft setzen, war in dieser Hinsicht das Pendelgerät (SRT) für diese Untersuchung besonders geeignet. Das Meßverfahren wird stets dann deutlich abgeminderte Werte anzeigen, wenn das  $\text{CaCl}_2$  mit seiner festen Modifikation in der Lage ist, die zur Mikrotextrur zählenden Rauheitselemente der Oberfläche mit einer dünnen Kristallschicht soweit zu überziehen und zu nivellieren, daß diese in ihrer entscheidenden Wirkungsmöglichkeit für die Kraftübertragung des Gummis beeinträchtigt oder ausgeschaltet wird; nach der Reibungstheorie muß dabei aber auch gleichzeitig eine dünne (mindestens monomolekulare) flüssige Gleitschicht, z.B. aus der gelösten Phase des  $\text{CaCl}_2$ , zur Verfügung stehen - oder sich beim Reibvorgang bilden, wenn das  $\text{CaCl}_2$ -Hydrat durch reibungsbedingte Temperatursteigerungen über  $30^\circ\text{C}$  zu schmelzen beginnt.

## 2.5 Relative Luftfeuchtigkeit

Die kritische relative Luftfeuchtigkeit, bei der die Calciumchlorid-Lösung bei  $15^\circ\text{C}$  - der Temperatur, bei der die Versuchsreihen durchgeführt wurden - die Sättigungsgrenze erreicht und bei deren Unterschreitung das Hexahydrat ausgeschieden wird, errechnet sich aus dem Verhältnis des Dampfdrucks der gesättigten  $\text{CaCl}_2$ -Lösung und dem Dampfdruck von Wasser bei dieser Temperatur - ausgehend von den im Schrifttumverzeichnis angegebenen Quellen - zu etwa 36 %.

Der Bereich der relativen Luftfeuchtigkeiten, in dem die Griffigkeitsuntersuchungen durchgeführt wurden, wurde auf 24 % bis 48 % festgelegt (kritische Luftfeuchtigkeit von 36 %  $\pm$  12 %). Da die Regelung und Erfassung der relativen Luftfeuchtigkeit mit den elektronischen Steuer- und Meßeinrich-

tungen der Klimakammer unzureichend war, wurde die Luftfeuchtigkeit bei jeder Griffigkeitsmessung gesondert ermittelt. Dabei wurde wegen der Verlässlichkeit und der vergleichsweise sehr hohen Genauigkeit auf die Methode der Bestimmung der psychrometrischen Differenz zurückgegriffen, bei der die Luftfeuchtigkeit aus der Temperaturdifferenz berechnet wird, die zwischen einem trockenen und einem feuchten Thermometer bei hoher Luftgeschwindigkeit gemessen wird. Daneben wurde wegen des geringeren Meßaufwands auch ein mit den Psychrometermessungen als verlässlich überprüftes elektronisches Handgerät verwendet, das im Zuge der Untersuchungen beschafft werden konnte.

## 2.6 Besonderheiten im Versuchsablauf

Die kritische Luftfeuchtigkeit, bei der je nach Änderungsrichtung der Luftfeuchtigkeit das Calciumchlorid-6-Hydrat sich abzuscheiden beginnt oder wieder in Lösung übergeht, liegt, wie bereits dargestellt, für die gewählte Versuchstemperatur von 15°C bei etwa 36 %. Nach den Griffigkeitsverläufen, die bei den durchgeführten Versuchsreihen festgestellt wurden, scheint dieser kritische Punkt zu variieren. Dies ist jedoch der Versuchsdurchführung und der indirekten Beurteilung des Erreichens der kritischen Luftfeuchtigkeit über deren Auswirkungen auf die Griffigkeit zuzuschreiben. Zu berücksichtigen ist nämlich, daß im Rahmen der Versuchsanordnung kleine räumliche und zeitliche Differenzen zwischen den Griffigkeits- und Luftfeuchtigkeitsmessungen unvermeidbar sind. Sie müssen u.a. wegen der Anwesenheit der Versuchsperson in der Klimakammer zu nach Größe und Richtung schwankenden Differenzen zwischen der gemessenen und der an der  $\text{CaCl}_2$ -6-Hydrat-Oberfläche wirksamen Luftfeuchtigkeit führen. Ferner sind dabei die zeitlichen Abläufe zu berücksichtigen, die bei den Austauschprozessen zwischen der sich

verändernden Luftfeuchtigkeit, dem  $\text{CaCl}_2$ -Hexahydrat und der  $\text{CaCl}_2$ -Lösung eine Rolle spielen, und die bei der verfügbaren Klimakammer nicht gezielt gesteuert werden konnten.

Erhebliche Streuungen in den Griffigkeitsmeßergebnissen könnten ferner durch eine unterschiedliche Art oder Form der Kristallisation des Hydrats an den Probenoberflächen bedingt sein, möglicherweise im Zusammenhang mit der variierenden Luftfeuchteänderungsgeschwindigkeit und -richtung. Um trotz der zahlreichen Ursachen für Streuungen in den Griffigkeitswerten zu aussagefähigen Ergebnissen zu gelangen, waren sehr große Versuchszahlen erforderlich. Insgesamt wurden für die vorliegende Forschungsarbeit annähernd 4000 Einzelmessungen allein mit dem Pendelgerät durchgeführt.

Da die einzelnen Luftfeuchtigkeitsstufen nicht genau angefahren und auf einem bestimmten Niveau geregelt werden konnten, wurde die Versuchsmatrix in unregelmäßiger Folge nach und nach aufgefüllt. Besonders viele Messungen wurden in dem Luftfeuchtigkeitsbereich ausgeführt, bei dem die Oberfläche der Hydratschicht vom trockenen in den feuchten Zustand (und umgekehrt) übergeht. Das Übergehen in diesen Mischzustand, bei dem teilweise die gelöste neben der noch kristallisierten  $\text{CaCl}_2$ -Modifikation vorliegt, konnte in den insgesamt überwiegenden Versuchen mit zunehmender Luftfeuchtigkeit auch häufig visuell erkannt werden; wegen der oben geschilderten Unsicherheiten bei der Bestimmung der maßgebenden Luftfeuchtigkeit war die gemessene Luftfeuchtigkeit für die Feststellung des Zeitpunktes, zu dem kritische Griffigkeitszustände sich einstellen, nur ein unzureichender Anhaltspunkt.

### 3 Versuchsergebnisse

#### 3.1 Fahrbahngriffigkeit bei der Auskristallisation größerer Calciumchloridmengen

Eine erste Versuchsreihe, die hauptsächlich der Entwicklung und Erprobung der Versuchstechnik diente, wurde mit einer relativ großen Calciumchloridmenge von  $125 \text{ g/m}^2$  aufgesprühte Lösung ausgeführt. Diese Menge liegt zwischen den beim normalen Betrieb von Taumittelsprühanlagen ausgebrachten Dosierungen und den Solemengen, die bei dem Defekt einer Anlage im Jahr 1986 auf die Fahrbahn gelangt waren. Die Versuchsreihe umfaßte Pilotmessungen auf drei bituminösen Fahrbahnproben und einer Probe, die einer älteren Zementbetondecke entnommen worden war.

Diese Messungen haben zu folgenden Ergebnissen geführt:

- Bei relativen Luftfeuchtigkeiten unter 30 % ergeben Messungen auf der auskristallisierten  $\text{CaCl}_2$ -Hydratschicht Werte von  $t_{\text{SRT}} = 60-70$  Einheiten am Pendelgerät. Diese Werte sind deutlich niedriger als auf normal trockenen Fahrbahnoberflächen; dort werden 90-100 SRT-Einheiten gemessen.
- Bei Steigerung der relativen Luftfeuchtigkeit über 35 % fallen die Werte auf den mit Calciumchlorid präparierten Oberflächen deutlich ab. Auf den bituminösen Proben erreichten sie bei etwa 40 % gemessener Luftfeuchtigkeit in dieser Versuchsreihe die niedrigsten Werte. Auf der bei Nässe mit  $t_{\text{SRT}} = 72$  sehr griffigen und mit 0,5 mm mittleren Rautiefe relativ grobrauen Oberfläche der Probe Nr. 2 lagen die niedrigsten Ergebnisse auf der feuchten Hydratschicht (ca.  $31 \text{ g/m}^2$  reines Salz bzw.  $0,035 \text{ mm}$  mittlere Schichtdicke  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) bei 26 SRT-Einheiten.

- Diese besonders niedrigen Griffigkeitswerte wurden nach kurzer Zeit festgestellt, sobald die relative Luftfeuchtigkeit auf deutlich über 36 % gesteigert wurde. Dabei wird die Probenoberfläche offensichtlich feucht. Etwas später steigen die Meßwerte dann auf ein Niveau an, das den in den früheren Versuchsreihen ermittelten Werten entspricht, die bei reinen Lösungsfilmen gemessen wurden. Die kritischen Glättezustände stellen sich demnach ein, wenn ein dünner Lösungsfilm und eine kristallisierte Hydrat-schicht gleichzeitig auftreten.
- Der zeitliche Ablauf der Glättebildung in Wechselwirkung mit den klimatischen Prozessen war in der verfügbaren Klimakammer nicht genauer erfaßbar; die große Hysterese in der Luftfechtigkeitsregelung ließ keine näheren Rückschlüsse auf die Schnelligkeit der  $H_2O$ -Austauschprozesse zu. Allerdings sind auch die an der Straßenoberfläche auftretenden Klimaverläufe nicht näher bekannt und entsprechende Simulationen somit nicht möglich. Das relativ rasche Durchlaufen der glatten Oberflächenzustände in den Versuchsreihen ist i.ü. auch im Zusammenhang mit der hohen Luftumwälzung und Leistung der Klimakammer zu sehen, die bei Änderungen und Schwankungen stets voll einsetzt. Grundsätzlich muß die Zeitdauer, in der die besonders glatten Zustände bei Luftfechtigkeitsänderungen durchlaufen werden, bei größeren  $CaCl_2$ -Schichtdicken aber zunehmen.
- Auf der Zementbetonprobe war der Abfall der Griffigkeit wesentlich geringer als bei den Versuchen auf den bituminösen Fahrbahnproben. Im Rahmen der Versuchsanordnung wurde die aufgesprühte  $CaCl_2$ -Lösungsmenge von  $125 \text{ g/m}^2$  von der Probe weitgehend aufgesaugt bevor sich  $CaCl_2$ -Hydrat abscheiden konnte. Auf der im normalnassen Zustand mit

$t_{SRT} = 65$  bewerteten Probe lagen die kritischsten Werte im  $\text{CaCl}_2$ -präparierten Zustand bei  $t_{SRT} = 50$  Einheiten - ein Wert, der auch auf weniger griffigen Belägen bei normaler Fahrbahnnässe angetroffen werden kann. Weitere Messungen mit geringeren  $\text{CaCl}_2$ -Beaufschlagungen ( $<100 \text{ g/m}^2$  25-%ige Lösung) konnten auf Zementbeton bei den Laborversuchen deshalb entfallen.

Für den Zeitpunkt der Unfälle anlässlich des oben genannten Defekts an der Taumittelsprühanlage im Jahr 1986 war für den betroffenen Fahrbahnabschnitt eine Beaufschlagung von im Mittel  $300 \text{ g/m}^2$  annähernd 30-prozentiger Lösung hochgerechnet worden. Die in der Klimakammer ermittelten Ergebnisse haben gezeigt, daß bereits bei einer wesentlich geringeren Taumittelmenge (in den vorgenommenen Versuchen etwa 40 % des hochgerechneten Betrages) sehr glatte Fahrbahnzustände möglich sind, wenn sich aufgrund niedriger Luftfeuchtigkeit  $\text{CaCl}_2$ -Hexahydrat abscheiden kann. Dies wurde unter anderem auf einer relativ rauhen und griffigen Fahrbahnoberflächenprobe nachgewiesen, wie sie für die Unfallstelle aufgrund der Berichte und Messungen der Straßenverwaltung (ca. 70 SRT-Einheiten) anzunehmen ist.

Die weiteren Untersuchungen konnten sich damit auf die Frage konzentrieren, inwieweit Glättebildungen auch bei den geringeren Taumittelmengen möglich sind, die im normalen Winterdienst ausgebracht werden.

### 3.2 Auswirkungen von im Winterdienst üblichen Calciumchloridmengen auf die Griffigkeit

Die Dosierung, mit der Calciumchlorid-Lösung normalerweise im Winterdienst an heutigen Taumittelsprühanlagen ausgebracht wird, beginnt bei etwa 1,9 bis 2,5 g Salz je Sprüh-

stoß und  $m^2$  und reicht, soweit bekannt, bis  $6 \text{ g/m}^2$  und mehr in einem Sprühzyklus, wenn z.B. die Glatteisdetektoren weiterhin kritische Zustände signalisieren. Danach kann ein erneuter Sprühzyklus normalerweise erst nach einer gewissen Wartezeit ausgelöst werden. Größere Salzmengen können sich somit nur bei einem fehlerhaften Betrieb der Anlage auf der Fahrbahn ansammeln bzw. wenn Sole unter klimatischen Randbedingungen ausgebracht wird, bei welchen sie sich nicht unter Wasseraufnahme weiter verdünnen und so von der Fahrbahn abfließen kann oder vom Verkehr verfrachtet wird.

Der weitere Versuchsplan zum Einfluß dünner Hydratschichten auf die Griffigkeit berücksichtigt deshalb zunächst Sprühlösungsdosierungen mit Salzmengen von  $3,8 \text{ g/m}^2$  (2 Sprühstöße a  $1,9 \text{ g/m}^2$ ) bis  $7,5 \text{ g/m}^2$  zur Charakterisierung der Situation beim planmäßigen Betrieb der Anlagen. Ferner werden Salzmengen von 15 und  $22,5 \text{ g/m}^2$  in die Versuche einbezogen, um auch die Verhältnisse bei früheren Taumittelsprühanlagen eingrenzen zu können (an denen bis zu 20 und  $30 \text{ g/m}^2$  innerhalb von 8 bzw. 13 Minuten ausgebracht wurden, LEIBFRIED 1980) und um Verhältnisse zu berücksichtigen, die sich auch heute bei möglicherweise mangelhaften Betriebszuständen einstellen können bzw. wenn sich das  $\text{CaCl}_2$  auf der Fahrbahn ansammelt. In diesen Versuchsreihen wurden, wie in Kapitel 2 näher erläutert, folgende Parameter variiert:

- Makrotextur der Fahrbahn mit Proben von unter 0,2 mm bis 1,5 mm mittlerer Rauhtiefe (gemessen mit dem Sandfleckverfahren).
- Mikrotextur der Fahrbahn durch Oberflächenausprägungen dieser Proben zwischen 42 und 73 SRT-Einheiten (bewertet mit dem Pendelgerät bei nasser Oberfläche).
- Relative Luftfeuchtigkeit mit einem Bereich von  $\pm 12 \%$  um den kritischen Punkt, bei dem sich das  $\text{CaCl}_2$ -Hexahydrat

abscheidet bzw. wieder in Lösung geht.

- Richtung der Luftfeuchteänderung - wegen der möglicherweise unterschiedlichen Auswirkungen auf die Ausbildung gleitempfindlicher Schichtungen beim Übergang von der festen zur flüssigen  $\text{CaCl}_2$ -Phase bzw. umgekehrt.

Für die einzelnen Versuchsreihen wurden je Probe und Stufe für die aufgebrachte  $\text{CaCl}_2$ -Menge eine große Zahl von Meßergebnissen unter Variation der Luftfeuchtigkeit ermittelt. Insgesamt wurden dabei etwa 3000 Messungen mit dem Pendelgerät ausgeführt und mit den gleichzeitig ermittelten Luftfeuchtwerten dokumentiert. Daraus wurden die in der Anlage 4-8 tabellierten Mittelwerte der Meßergebnisse berechnet. Hinter jeder dokumentierten Zahl steht wenigstens 1 Versuch mit 5 Einzelmessungen am Pendelgerät. Bei einer großen Zahl von Fällen ergaben sich bei der Variation der Luftfeuchtigkeit jedoch mehrere Versuche (bis zu 4), die dann zu einem mittleren Ergebnis zusammengefaßt wurden. In den Anlagen 9 bis 13 sind diese Ergebnisse je Oberfläche graphisch aufgetragen.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Kraftübertragung zwischen Gummi und Fahrbahnoberfläche in hohem Maße durch die Dicke der Hydratschichten (je nach  $\text{CaCl}_2$ -Menge 0,004-0,025 mm mittlere rechnerische Schichtdicke, siehe auch Tabelle 1, S.6) in Wechselwirkung mit der Ausprägung der Fahrbahntextur beeinflußt wird (Anlage 14). Ferner wurde festgestellt, daß sehr niedrige Griffwertwerte sowohl bei steigender wie bei fallender Luftfeuchtigkeit in der Nähe der kritischen Luftfeuchtigkeit (ca. 36 % bei 15°C) auftreten können. Im einzelnen können die Ergebnisse dieser Versuchsreihen wie folgt erläutert werden:

- Bei der niedrigsten Dosierung mit 15 g/m<sup>2</sup> der 25-%igen Lösung, was einer Salzmenge von 3,8 g/m<sup>2</sup> entspricht, lagen

auf 4 von 5 Oberflächen die Meßergebnisse im allgemeinen noch im vertretbaren Bereich. Die Mittelwerte erreichten bei trockener Oberfläche ca. 80 SRT-Einheiten und waren bei feuchter Oberfläche  $t_{SRT} \geq 53$ . Nur auf der Probe Nr. 4, die mit einer Mikrorauheit von  $t_{SRT} = 42$  bewertet mit dem Pendelgerät (wie üblich mit Wasser angehäßt gemessen), einen Oberflächenzustand repräsentiert, bei dem der Belag ohnedies aufgeraut oder erneuert werden sollte, wurden Werte gemessen, die geringe Griffigkeiten beim Einsatz von  $CaCl_2$  signalisieren; im trockenen Zustand (relative Luftfeuchte ungefähr 30 %) lag der Mittelwert bei 68 und im Übergangsbereich der kritischen Luftfechtigkeiten bei 40 SRT-Einheiten. Die Probe 5 zeigte ebenfalls bereits weniger gute Meßergebnisse (nahe 50 SRT-Einheiten), wenn die Oberfläche beginnt feucht zu werden; allerdings verkörpert diese Probe auch einen Zustand der Mikrorauheit, bei dem unter höheren Verkehrsbelastungen eine baldige Erneuerung oder Aufrauhung des Belages aus Gründen der Verkehrssicherheit bei Nässe naheliegt.

- Bei der Sprühmitteldosierung von  $30 \text{ g/m}^2$ , entsprechend einer Salzmenge von  $7,5 \text{ g/m}^2$ , werden im trockenen Zustand auf allen Oberflächen bereits deutlicher reduzierte Werte gegenüber der normaltrockenen Fahrbahn gemessen; die Mittelwerte liegen auf den einzelnen Oberflächen zwischen 65 und 72 SRT-Einheiten. Bei beginnender Feuchte auf der  $CaCl_2$ -Hydratschicht sinken die Werte nun deutlich stärker ab, bis  $t_{SRT} = 36$  auf Probe 5. Nur auf den Oberflächen mit guter Makro- und guter Mikrorauheit werden mit im Mittel 48 und 52 SRT-Einheiten noch annehmbare Werte gemessen.
- Mit weiterer  $CaCl_2$ -Hydratanreicherung auf den Oberflächen entsprechend einer Sprühmitteldosierung von 60 und  $90 \text{ g/m}^2$  (15 und  $22,5 \text{ g/m}^2$  Salz) nehmen die aktivierbaren Reibungswerte noch weiter ab.

Im trockenen Zustand sind nun die SRT-Werte auf den Oberflächen mit wenig Grobrauheit ( $< 0,3$  mm mittlere Rauhtiefe bzw.  $t_{AM} \leq 15$  sec Ausflußzeit) deutlich höher als auf den Oberflächen mit viel Grobrauheit ( $> 0,5$  mm mittl. Rautiefe bzw.  $t_{AM} \leq 6$  sec). Bei der größten Salzanreicherung, entsprechend einer Hydratschichtdicke von  $0,025$  mm, liegen die Ergebnisse bei geringer Grobrauheit mit i.M.

65 SRT-Einheiten um 10 Einheiten höher als auf den beiden Beispielen mit guter bis sehr guter Grobrauheit mit ca. 55 SRT-Einheiten.

Im feuchten Zustand werden auf allen Oberflächen nun Werte deutlich unter  $t_{SRT} = 50$  gemessen. Bei der Sprühmitteldosierung von  $90$  g/m<sup>2</sup> liegen sie auf den Oberflächen mit weniger guter Texturausprägung mit ca. 30 SRT-Einheiten i.M. um 10 Einheiten niedriger als auf den Oberflächen mit guter Makro- und Mikrotextrur. Allgemein nehmen die SRT-Werte auf feuchter Oberfläche mit wachsender Salzmenge bzw. CaCl<sub>2</sub>-Hydratschichtdicke stetig ab.

#### 4 Folgerungen für den wissenschaftlichen Erkenntnisstand

Sehr wesentlich für die Bewertung des Phänomens der  $\text{CaCl}_2$ -Glätte ist das Ergebnis, daß eine Hydratschicht von im Mittel 1/100 mm Dicke (mittlere rechnerische Dicke ohne die möglicherweise durch die Rauheit der Oberfläche bedingte örtliche Variation) ausreicht, die Elemente der Mikrorauheit der Fahrbahnoberfläche weitgehend außer Kraft zu setzen, die für die Griffigkeitswirkung der Oberfläche bei Nässe verantwortlich sind. Die Reibwerte wurden bei einer Schichtdicke des  $\text{CaCl}_2$ -Hexahydrats von 0,0085 mm, das teilweise bereits in Lösung übergegangen war, auf Probe 2 von  $t_{\text{SRT}} = 72$  (normalnaß) auf  $t_{\text{SRT}} = 48$  (mit  $\text{CaCl}_2$ ) und auf Probe 5 von  $t_{\text{SRT}} = 57$  auf  $t_{\text{SRT}} = 36$  herabgemindert, also um Differenzbeträge von 24 und 21 SRT-Einheiten. Von erheblichem wissenschaftlichen Interesse ist diese Erkenntnis aber auch deshalb, weil auf indirektem Wege daraus gefolgert werden kann, daß der unmittelbare Zugang zur geometrischen Differenzierung der griffigkeitswirksamen Mikrorauheit mit Verfahren zu suchen ist, die wesentlich besser als auf 1/100 mm genau auflösen. Es ergibt sich der Ansatz, die Griffigkeitswirksamkeit der Mikrotextrur in Abhängigkeit von der Größenordnung dünner Beschichtungen auf speziellen Oberflächen mit geringer Grob- rauheit und gleichförmig ausgeprägter Feinrauheit zu prüfen; so könnte noch genauer eingegrenzt werden, in welchem Bereich die griffigkeitswirksame Mikrotextrur tatsächlich beginnt. Nach den Erkenntnissen aus den vorliegenden Untersuchungen beginnt sie wohl nicht, wie bisher angenommen bei Wellenlängen  $< 0,5$  mm; wahrscheinlich sind nur die Anteile der Rauheitsfunktion wirklich bedeutsam, die mit einer um eine Zehnerpotenz kleineren Wellenlänge ( $< 0,05$  mm) aus dem Rauheitsspektrum ausgefiltert werden können.

Im übrigen erscheinen für die Erklärung der  $\text{CaCl}_2$ -Glätte noch folgende Effekte wesentlich:

- Der Kristallisationsprozeß beginnt offensichtlich an der Grenzschicht zwischen der Lösung und der festen Fahrbohn-oberfläche. Deshalb kann das Hydrat auch in sehr dünnen Schichten fein verteilt an der Fahrbohn anhaften. Ferner kann sich so auch beim Übergang von der gelösten zur festen Phase - bei fallender Luftfeuchtigkeit - eine Schichtung ausbilden, bei der ein (extrem) dünner Lösungsfilm über der sehr dünnen Hydratschicht liegt.
- Das  $\text{CaCl}_2$ -Hydrat geht mit steigender Temperatur (bei ca.  $30^\circ\text{C}$ ) rasch in eine Schmelze über, die ebenfalls als Gleitschicht in Betracht gezogen werden kann. Dieser Effekt könnte erklären, daß auch auf einer voll auskristallisierten trockenen Hydratschicht wesentlich niedrigere Reibwerte gemessen werden als auf allen anderen bekannten festen Oberflächen bei Trockenheit (auch visuell ähnlich erscheinenden Oberflächen, wie mikroskopisch glattes, makroskopisch aber leicht gewelltes oder genopptes Glas). Die Reibungswärme konzentriert sich auf Oberflächen mit deutlicher Makrorauheit auf wenige Kontaktpunkte; durch höhere Kontaktdrücke entwickelt sich wohl eine höhere Reibungstemperatur als auf Oberflächen mit geringer Grob- rauheit. Auf letzteren ist die Anpreßkraft des Gleitkörpers über die ganze Kontaktzone gleichmäßiger verteilt. Auf den Proben mit ausgeprägter Grob- rauheit werden auch niedrigere Reibungsbeiwerte auf der (trockenen)  $\text{CaCl}_2$ -Hydratschicht gemessen als auf Oberflächen mit geringer oder fehlender Grob- rauheit.

Aus diesen Ergebnissen ist ferner zu folgern, daß Unfall- erhebungen zur genaueren Untersuchung der Effizienz von Tau- mittelsprühanlagen sich nicht allein auf die Unfälle be-

schränken dürfen, für die winterliche Fahrbahnzustände angegeben sind. Da auch bei ansonsten trockener und feuchter Fahrbahn besondere  $\text{CaCl}_2$ -bedingte Glättezustände nicht völlig ausgeschlossen werden können, sind die Unfälle, für die kein konkreter Fahrbahnzustand angegeben ist ("ohne Angabe"), ebenfalls im Auge zu behalten. Dies gilt mit Einschränkungen auch für die Unfälle bei nasser Fahrbahn, wenn man berücksichtigt, daß die Übergänge zwischen naß und winterglatt sowie zwischen trocken und feucht bzw. naß fließend sind. Es wären also alle Unfälle während der Wintermonate zu erfassen und zu bilanzieren - und hinsichtlich der möglichen  $\text{CaCl}_2$ -Effekte unter Hinzuziehung der Betriebsbedingungen der Taumittelsprühanlage kritisch zu analysieren.

## 5 Folgerungen für die Verwendung von $\text{CaCl}_2$ in Taumittelsprühanlagen

Für eine Umsetzung der Untersuchungsergebnisse in die Praxis beim Betrieb von Taumittelsprühanlagen können aus den vorliegenden Versuchsergebnissen folgende Hinweise formuliert werden:

- Auf überdurchschnittlich rauhen und griffigen Belägen, wie den Fahrbahnproben Nr. 1, 2 und 3, sind  $\text{CaCl}_2$ -Konzentrationen von  $\leq 5$  g Salz (Feststoff) pro  $\text{m}^2$  unkritisch (Anl.14).
- Glätte kann bei  $\text{CaCl}_2$ -Konzentrationen über  $5 \text{ g/m}^2$  entstehen, wenn Luftfeuchtigkeiten um 40-45 % durchlaufen werden.
- Die Rutschsicherheit kann bei  $\text{CaCl}_2$ -Mengen von erheblich mehr als  $5 \text{ g/m}^2$  in der Übergangsphase (teilweise auskristallisiertes  $\text{CaCl}_2$ -Hydrat, teilweise Lösung) ähnlich gering sein, wie auf einer Fahrbahn, auf die bei einem Unfall Heizöl ausgeflossen ist.
- Bei relativen Luftfeuchtigkeiten über 50 % sind auch höhere  $\text{CaCl}_2$ -Konzentrationen auf der Fahrbahn unproblematisch. Es muß aber sichergestellt sein, daß die Sole vom Verkehr verfrachtet wird oder im Zuge des Tauprozesses verdünnt von der Fahrbahn abfließen kann, bevor mit einer Witterungsänderung die Luftfeuchtigkeit sinkt und dann  $\text{CaCl}_2$ -Hydrat ausgeschieden werden kann.
- Wird unterhalb der kritischen Luftfeuchtigkeit von ca. 40-45 % mehr als  $5 \text{ g CaCl}_2$  pro  $\text{m}^2$  auf die Fahrbahn aufgebracht, so kann zweimal Fahrbahnglätte entstehen - einmal wenn das  $\text{CaCl}_2$ -Hydrat alsbald auskristallisiert und ein zweites Mal, wenn es beim Wiederanstieg der Luftfeuchtigkeit erneut in Lösung übergeht.

- Bei größeren Hydratmengen ist nicht auszuschließen, daß sich im auskristallisierten trockenen Zustand besondere Gleitfilme auch dann ausbilden, wenn z.B. beim Bremsen durch die Reibungswärme das Hydrat an der Oberfläche schmilzt.
- Je dünner die Hydratschicht (je geringer die  $\text{CaCl}_2$ -Menge auf der Fahrbahn) ist, umso kürzer ist der Zeitraum, für den eine möglicherweise gefährliche  $\text{CaCl}_2$ -Glätte beim Durchgang durch die kritische Luftfeuchtigkeit besteht.

Um künftig die Möglichkeit von  $\text{CaCl}_2$ -bedingten Glättebildungen an Taumittelsprühanlagen auszuschließen, wird empfohlen, die Steuerungseinrichtungen zu ergänzen und mit Luftfeuchtigkeitsmessern auszustatten. Durch Fehlsteuerungen ausgelöste überflüssige Sprühungen bei trockener Kälte, d.h. ohne akute Winterglätte, müssen verlässlich unterbunden werden können. Und um in den Übergangsbereichen - bei Witterungssituationen, in deren weiteren Verlauf eine Hydratbildung eintreten könnte - stets eine ausreichende Griffigkeit sicherzustellen, sollen Fahrbahndecken an Taumittelsprühanlagen überdurchschnittlich rauh sein. Ferner ist die auf der Fahrbahn zulässige  $\text{CaCl}_2$ -Konzentration nach oben zu begrenzen.

Daraus ergeben sich folgende allgemeine Bedingungen:

- $\text{CaCl}_2$ -Anreicherungen auf der Fahrbahn von mehr als  $5 \text{ g/m}^2$  sollten bei Luftfeuchtigkeiten unter 50 % vermieden werden.
- Rauheitsverbessernde Maßnahmen oder Deckschichterneuerungen sollten an Taumittelsprühanlagen vorgenommen werden, sobald Anforderungen an die Mikro- und Makrotextur von  $t_{\text{SRT}} \geq 60$  und  $t_{\text{AM}} \leq 10$ , bewertet mit Pendelgerät und Ausflußmesser, nicht mehr erfüllt sind.

Ferner wird empfohlen, im Neuzustand auf solchen Fahrbahnbelägen Zielwerte für die Rauheit von  $t_{SRT} > 70$  und  $t_{AM} < 5$  anzustreben, damit die zweite Bedingung auch unter Verkehrseinwirkungen für längere Zeit eingehalten werden kann. Ein überdurchschnittlicher Zustand von Mikro- und Makrotextur ist außerdem geeignet, die griffigkeitsmindernden Effekte größerer Mengen von  $CaCl_2$ -Lösung zu kompensieren, die bei Witterungen mit höheren Luftfeuchtigkeiten ausgebracht werden können, bei welchen kein Hydrat gebildet wird. Damit lassen sich künftig Taumittelsprühanlagen ohne die bisher wohl selten aufgetretenen und deshalb unerkannten Risiken  $CaCl_2$ -bedingter Glättebildungen betreiben.

S C H R I F T T U M :

Arbeitsanweisung für kombinierte Griffigkeits- und Rauheitsmessungen mit dem Pendelgerät und dem Ausflußmesser, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1972

Merkblatt über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1968

Merkblatt für den Unterhaltungs- und Betriebsdienst an Straßen, Teil: Winterdienst außerhalb geschlossener Ortslagen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln 1984

Technische Information Calciumchlorid/ $\text{CaCl}_2$ , CFK, Chemische Fabrik Kalk GmbH, Köln 1982

D. BEHRENS, Erdalkalichloride, DECHEMA-WERKSTOFF-TABELLE Chemische Beständigkeit, Frankfurt/M., November 1983

E. ENGEL, Ermittlung des Einflusses von Feuchtsalzen auf die Fahrbahngriffigkeit, TÜV Rheinland, Köln Dezember 1986

H. KUHLE, Entwicklungen, Ziele und Möglichkeiten des Winterdienstes an Bundesfernstraßen, Straße und Autobahn 2/1985, S. 63-68

M. KUTTER, L. NIEBRÜGGE, Erfahrungen mit Glatteismeldegeräten beim Landschaftsverband Westfalen-Lippe, Straße und Autobahn 12/1985, S. 498-503

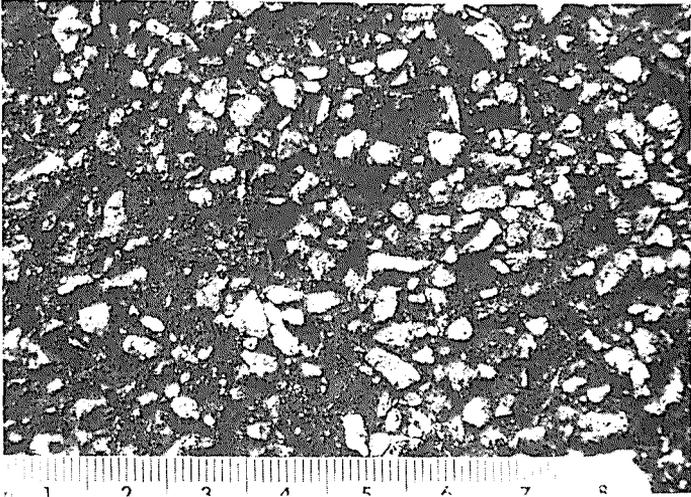
T. LEIBFRIED, Automatische Taumittelsprühanlage auf dem Autobahnviadukt Flamatt in der Schweiz, Straße und Autobahn 1/1980, S. 37-38

H. REMY, Lehrbuch der anorganischen Chemie, Band 1, Leipzig 1960

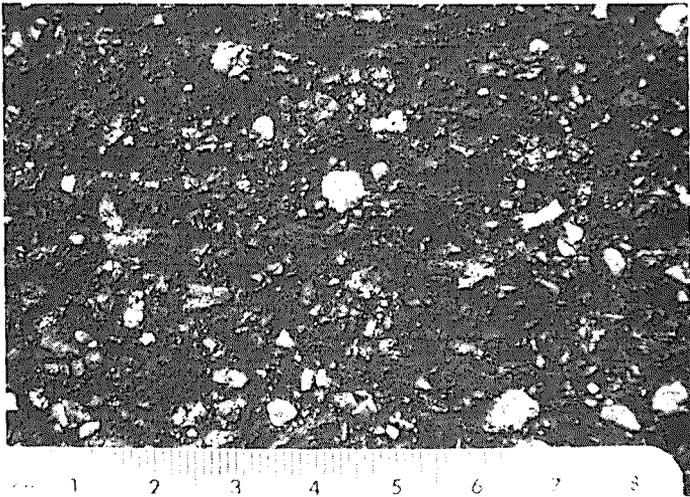
R. RUTISHAUSER, Anwendung flüssiger Auftaumittel zur Bekämpfung von Winterglätte, Vereinigung Schweizerischer Straßenfachleute (VSS), Zürich, März 1986

H. SCHMITZ, Über die Verhinderung winterlicher Straßenglätte durch Salzstreuung auf Straßen außerhalb geschlossener Ortslagen, Straße und Autobahn, 2/1983, S. 50-63

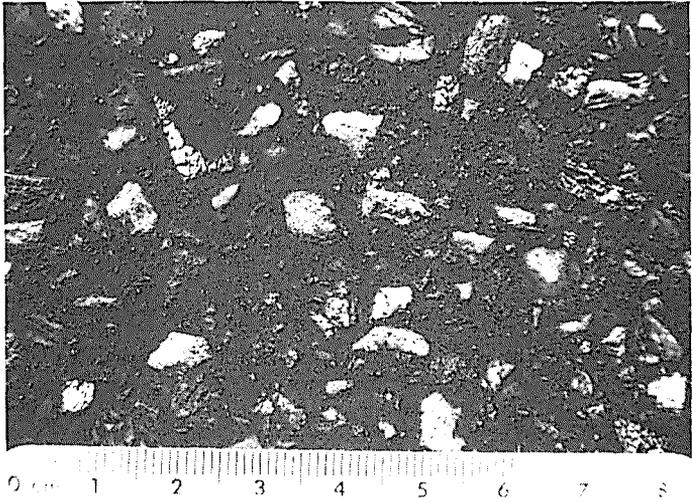
Fahrbahnprobe Nr. 1 (GA 0/16, Abstreusplitt 2/5)



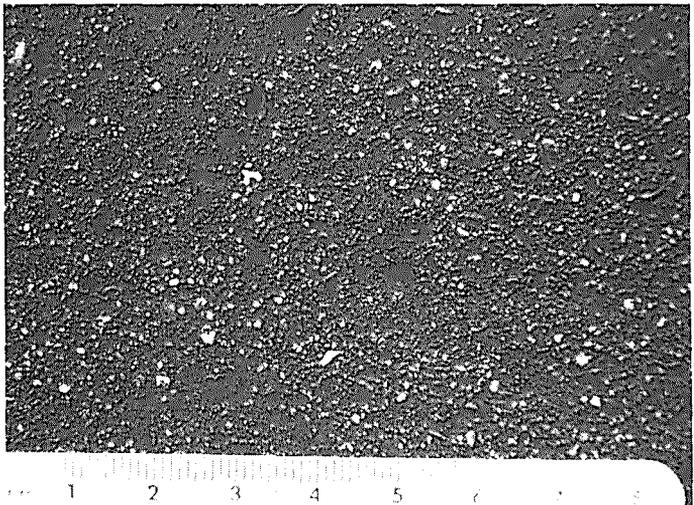
Fahrbahnprobe Nr. 2 (AB 0/8)



Fahrbahnprobe Nr. 3 (AB 0/11)



Fahrbahnprobe Nr. 4 (GA 0/8)



Fahrbahnprobe Nr. 5 (AB 0/11)

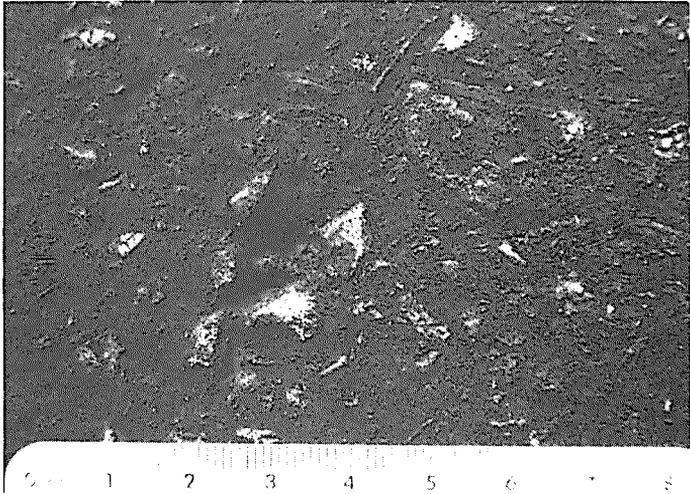


Tabelle 3: Meßergebnisse auf der Fahrbahnprobe I in Abhängigkeit von der  $CaCl_2$ -Menge und dem Oberflächenzustand

Relative Luftfeuchtigkeit (%)	Meßergebnisse am Pendelgerät (SRT-Einheiten) bei folgenden $CaCl_2$ -Mengen - in g Feststoff / $m^2$ -				Bemerkungen zum Oberflächenzustand
	- 3,8 -	- 7,5 -	- 15 -	- 22,5 -	
24					
25		67,8	56,6	55,8	
26		76	57		die Oberfläche
27	79,4	71	66	54,6	erscheint
28		72,5	64,8	55,2	visuell
29		66,2		53,2	trocken,
30	79	65,6	56	58,3	das $CaCl_2$ -
31		63	56,6	54,2	Hexahydrat
32	79	62	63	59,2	ist vollständig
33		67	55,6	55,2	auskristallisiert
34	78	59	58,4	56,2	
35		62	56,8	48,6	
36	69,5	57,9	56,6	48,2	
37		59,2	51,2	45,2	
38	65,5	57,3	46,2	45,4	
39	63,2	55,8	42,8	44,4	die
40	62	52	37,6	42,2	Oberfläche
41	60,6	51,4	47	42,6	erscheint
42	62	51,2	42	38,2	visuell
43	62	50,2	47,6	40,8	feucht
44		56,8	50,4	42,6	
45	62	53	49	39,4	
46	61	54,8	50	51,2	das $CaCl_2$ ist
47		58,6	53,4	56	weitgehend gelöst
26 bis 32%	78,8	66,9	59,7	55,8	Mittelwert der Meßergebnisse im "visuell trockenen" Bereich
40 bis 44%	61,6	52,3	44,9	41,3	Mittelwert der Meßergebnisse im "visuell feuchten" Bereich

25%ige $CaCl_2$ -Lösung	- Lösungsdosierung in g / $m^2$ -				Bemerkung
	- 15 -	- 30 -	- 60 -	- 90 -	
Meßergebnis am Pendelgerät in SRT-Einheiten	66	60	59,6	59	25%ige Lösung frisch aufgesprüht

Tabelle 3: Meßergebnisse auf der Fahrbahnprobe 2 in Abhängigkeit von der  $CaCl_2$ -Menge und dem Oberflächenzustand

Relative Luftfeuchtigkeit (%)	Meßergebnisse am Pendelgerät (SRT-Einheiten) bei folgenden $CaCl_2$ -Mengen - in g Feststoff / $m^2$ -				Bemerkungen zum Oberflächenzustand
	- 3,8 -	- 7,5 -	- 15 -	- 22,5 -	
	24				
25		70,2	56	56	
26		69	58		die Oberfläche
27		70	57	58,8	erscheint
28	80,6	68,4	62	57,4	visuell
29		68,6		54,4	trocken,
30	80	64	63,2	53,4	das $CaCl_2$ -
31	81	63,6	56,2	55,2	Hexahydrat
32		61	58,8	57	ist vollständig
33		59,6	56,2		auskristallisiert
34	80	64	60,4	51	
35	80	59,4	55,2	47,8	
36		55	52,4	44,8	
37	73	56,2	56,8	47,4	
38	61	55,5	50,1	45,2	
39	62,3	51,4	45,2	43,4	die
40	61,2	50	45	40,8	Oberfläche
41	61	48,2	39,4	44,6	erscheint
42		46,6	41,4	36	visuell
43	62,2			36,8	feucht
44		47,2	40,6	41,3	
45	64	52,2	42	54	
46	64	53,6	43,4	55	das $CaCl_2$ ist
47		57,2	56	58	weitgehend gelöst
26 bis 32%	80,4	65,4	59,0	55,3	Mittelwert der Meßergebnisse im "visuell trockenen" Bereich
40 bis 44%	61,5	48,0	41,6	39,9	Mittelwert der Meßergebnisse im "visuell feuchten" Bereich

25%ige $CaCl_2$ -Lösung	- Lösungsdosierung in g / $m^2$ -				Bemerkung
	- 15 -	- 30 -	- 60 -	- 90 -	
Meßergebnis am Pendelgerät in SRT-Einheiten	68	64	63	63	25%ige Lösung frisch aufgesprüht

Tabelle 3: Meßergebnisse auf der Fahrbahnprobe 3 in Abhängigkeit von der  $CaCl_2$ -Menge und dem Oberflächenzustand

Relative Luftfeuchtigkeit (%)	Meßergebnisse am Pendelgerät (SRT-Einheiten) bei folgenden $CaCl_2$ -Mengen - in g Feststoff / $m^2$ -				Bemerkungen zum Oberflächenzustand
	- 3,8 -	- 7,5 -	- 15 -	- 22,5 -	
24			66	66	
25		69			die
26		82	66	66	Oberfläche
27	80	78	63	65	erscheint
28		70,6	71	65,2	visuell
29		80	66	65,4	trocken,
30	80	71	72,4		das $CaCl_2$ -
31		69		66,3	Hexahydrat
32	81	68,6	65,4	69,2	ist vollständig
33		63,2	63,6	63,4	auskristallisiert
34	78	67,6	66,4	61,2	
35		68,8	56,2	54,4	
36	75	61,2	54,8	48,4	
37		57,8	54,8	41,4	
38	58	53,8	46,7	40,2	
39	56,6	48,6	38,6	35,2	die
40	55	43,8	35,2	32	Oberfläche
41	55,5	41	38,6		erscheint
42		41	41,2	31,5	visuell
43	55,2			32	feucht
44		41,6	36	29	
45	55	49	36	34,2	
46	56	52,2	38	38,4	das $CaCl_2$ ist
47			42,8	40,6	weitgehend gelöst
26 bis 32%	79,8	72,2	66,7	65,2	Mittelwert der Meßergebnisse im "visuell trockenen" Bereich
40 bis 44%	55,2	41,8	37,8	31,1	Mittelwert der Meßergebnisse im "visuell feuchten" Bereich

25%ige $CaCl_2$ -Lösung	- Lösungsdosierung in g / $m^2$ -				Bemerkung
	- 15 -	- 30 -	- 60 -	- 90 -	
Meßergebnis am Pendelgerät in SRT-Einheiten	60	52	50	49	25%ige Lösung frisch aufgesprüht

Tabelle 3: Meßergebnisse auf der Fahrbahnprobe 4 in Abhängigkeit von der  $CaCl_2$ -Menge und dem Oberflächenzustand

Relative Luftfeuchtigkeit (%)	Meßergebnisse am Pendelgerät (SRT-Einheiten) bei folgenden $CaCl_2$ -Mengen - in g Feststoff /m <sup>2</sup> -				Bemerkungen zum Oberflächenzustand
	- 3,8 -	- 7,5 -	- 15 -	- 22,5 -	
24					
25					
26		70,6	73	65	die Oberfläche
27	69	71	72	70	erscheint
28		70,5	70,6	69,4	visuell
29		72	67,8	67,6	trocken,
30	69	69,4	66,6	64,8	das $CaCl_2$ -
31		67,4	65	61,6	Hexahydrat
32	68	63,8	63,4	60,6	ist vollständig
33		60	61,2	59,4	auskristallisiert
34	66		65,4		
35		57,8	51,6	48,4	
36	48	53,8	49,6	40,4	
37		50,2	48,6	39,8	
38	43,5	46,6	44,8	36,2	
39	42,7	43,3	39,8	32,1	die
40	40	37,6	36	30,4	Oberfläche
41	41	36,8	35,8	33,2	erscheint
42	41	37,4	36,2	29,4	visuell
43	40,2		34,2	29	feucht
44	41,6	37,8	34,8	30	
45		40,2	38	36,2	
46	41,4	39,8	35	36	das $CaCl_2$ ist
47		40,4	37,2	36,6	weitgehend gelöst
26 bis 32%	68,0	68,1	67,2	64,8	Mittelwert der Meßergebnisse im "visuell trockenen" Bereich
40 bis 44%	40,8	37,4	35,4	30,4	Mittelwert der Meßergebnisse im "visuell feuchten" Bereich

25%ige $CaCl_2$ -Lösung	- Lösungsdosierung in g /m <sup>2</sup> -				Bemerkung
	- 15 -	- 30 -	- 60 -	- 90 -	
Meßergebnis am Pendelgerät in SRT-Einheiten	44	40	38	38	25%ige Lösung frisch aufgesprüht

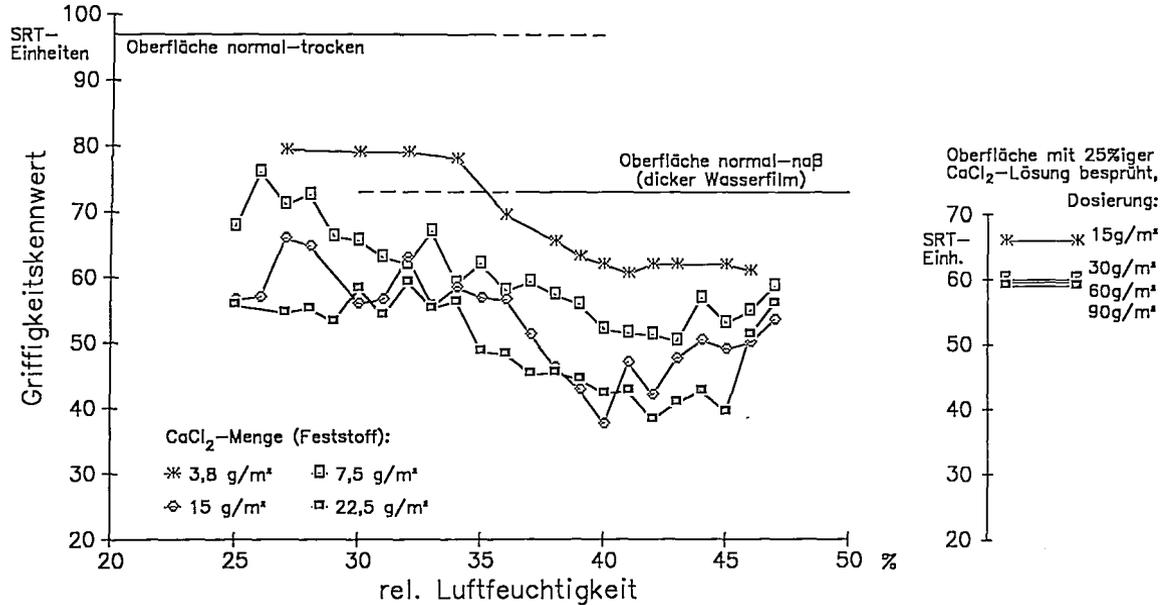
Tabelle 3: Meßergebnisse auf der Fahrbahnprobe 5 in Abhängigkeit von der  $CaCl_2$ -Menge und dem Oberflächenzustand

Relative Luftfeuchtigkeit (%)	Meßergebnisse am Pendelgerät (SRT-Einheiten) bei folgenden $CaCl_2$ -Mengen - in g Feststoff / $m^2$ -				Bemerkungen zum Oberflächenzustand
	- 3,8 -	- 7,5 -	- 15 -	- 22,5 -	
24					
25		74,2	71,2		die Oberfläche
26		71,8	70,4	70,2	erscheint
27	80	73	70,6	68	visuell
28		72	73	67,8	trocken,
29		73,6	72,4	69	das $CaCl_2$ -
30	80	70,3	68,7		Hexahydrat
31			68,6	67,5	ist vollständig
32	81	70	63,2	66,4	auskristallisiert
33		69,6	66,6	58,8	
34	78	71	60,6	56,6	
35	78	71,6	61,4	56,4	
36		70,4	56,8	39,5	
37	67	68,4	47	39,4	
38		58,8	44,3	38,3	
39	53,5	45,5	40,4	37,1	die
40	52,9	36	30,9	35,6	Oberfläche
41	51	36,4	37	37	erscheint
42	52	36	36,2	28,9	visuell
43	55		36,7	31,4	feucht
44	56	35,8	35,5	30	
45	56	44,6	41,8	33,8	
46		44,2	43,4	34,6	das $CaCl_2$ ist
47		45,2	44,8	42,4	weitgehend gelöst
26 bis 32%	79,8	71,4	68,2	65,5	Mittelwert der Meßergebnisse im "visuell trockenen" Bereich
40 bis 44%	53,4	36,0	35,3	32,6	Mittelwert der Meßergebnisse im "visuell feuchten" Bereich

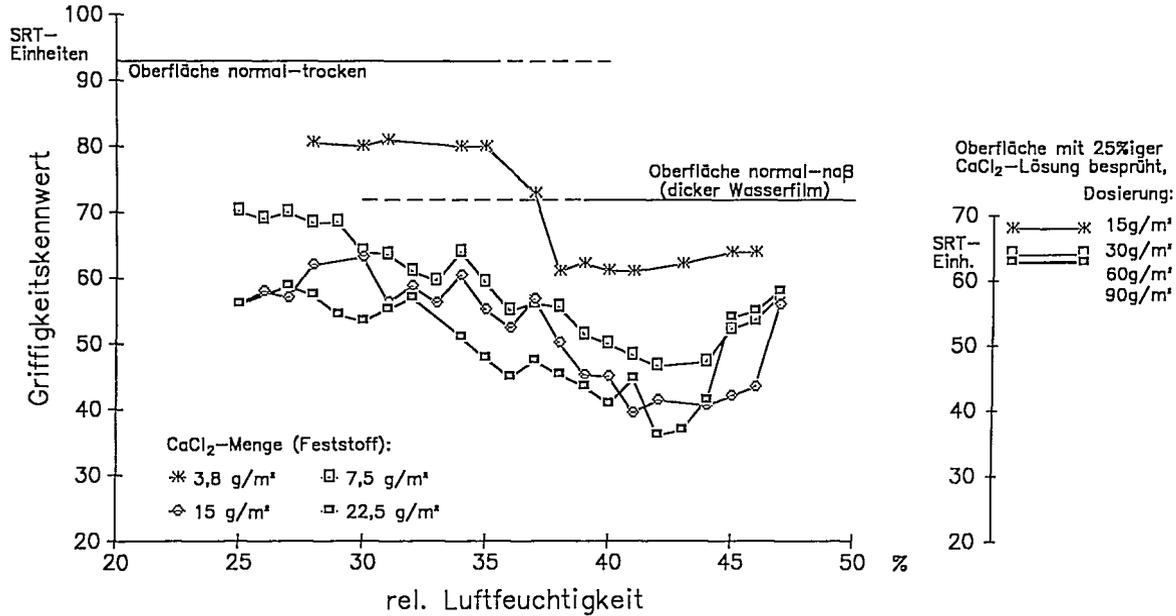
25%ige $CaCl_2$ -Lösung	- Lösungsdosierung in g / $m^2$ -				Bemerkung
	- 15 -	- 30 -	- 60 -	- 90 -	
Meßergebnis am Pendelgerät in SRT-Einheiten	58	47	47	47	25%ige Lösung frisch aufgesprüht

# Fahrbahnprobe Nr. 1



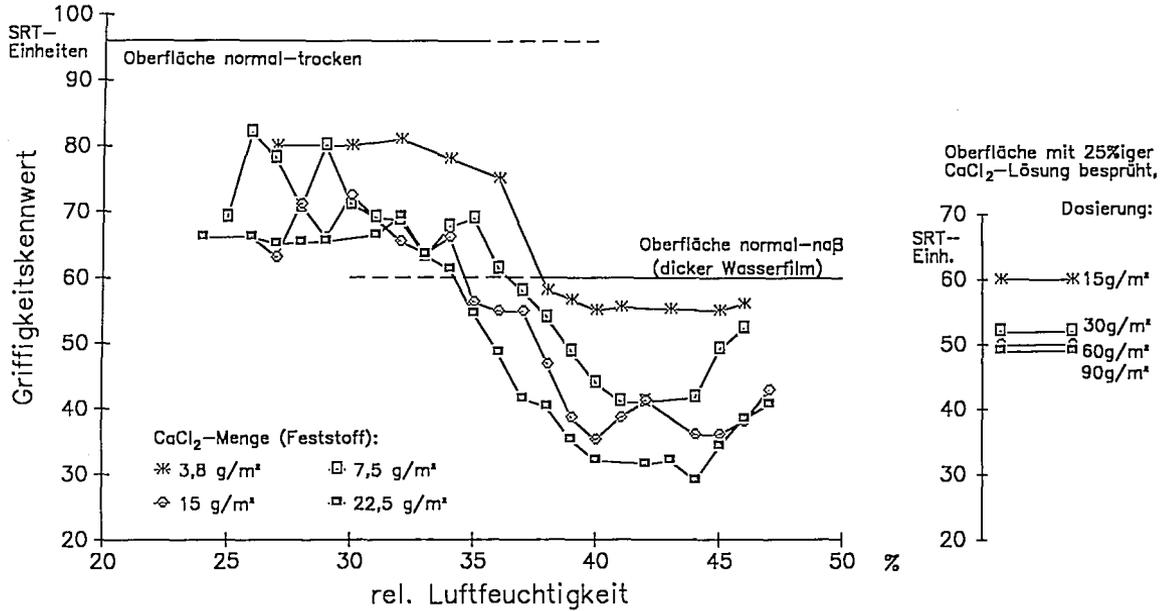
Meßergebnisse am Pendelgerät (SRT) in Abhängigkeit von der CaCl<sub>2</sub>-Dosierung und der Luftfeuchtigkeit auf einer Fahrbahnoberfläche mit sehr guter Mikrotextur und sehr grober Makrotextur (t<sub>SRT</sub>=73; t<sub>AM</sub>=1)

## Fahrbahnprobe Nr. 2



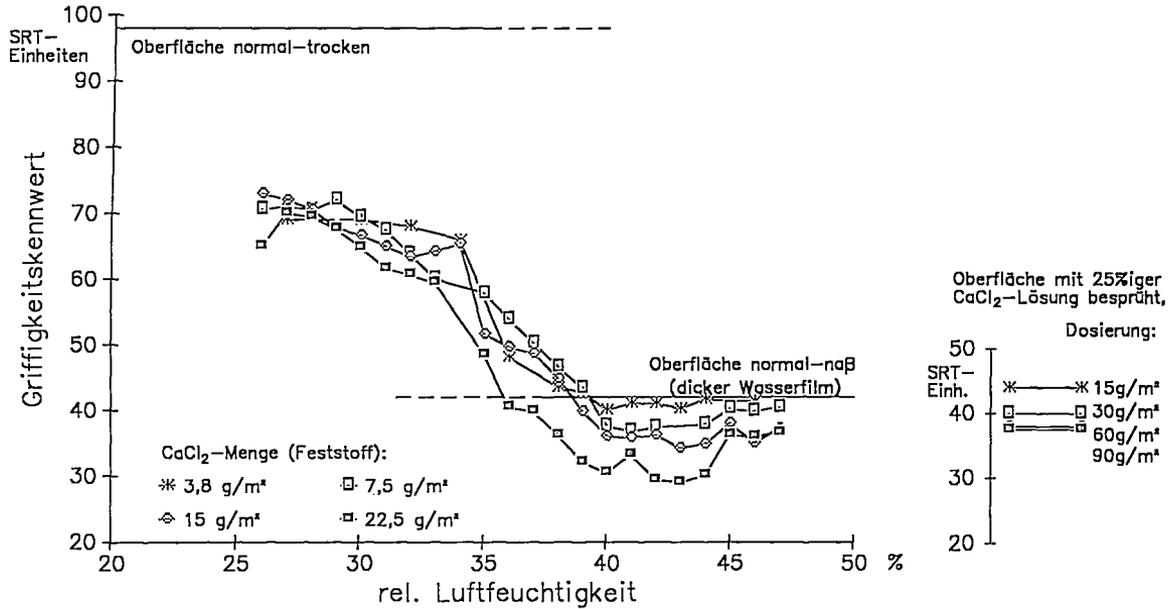
Meßergebnisse am Pendelgerät(SRT) in Abhängigkeit von der CaCl<sub>2</sub>-Dosierung und der Luftfeuchtigkeit auf einer Fahrbahnoberfläche mit sehr guter Mikrotextur und guter Makrotextur (t<sub>SRT</sub>=72; t<sub>AM</sub>=6)

# Fahrbahnprobe Nr. 3



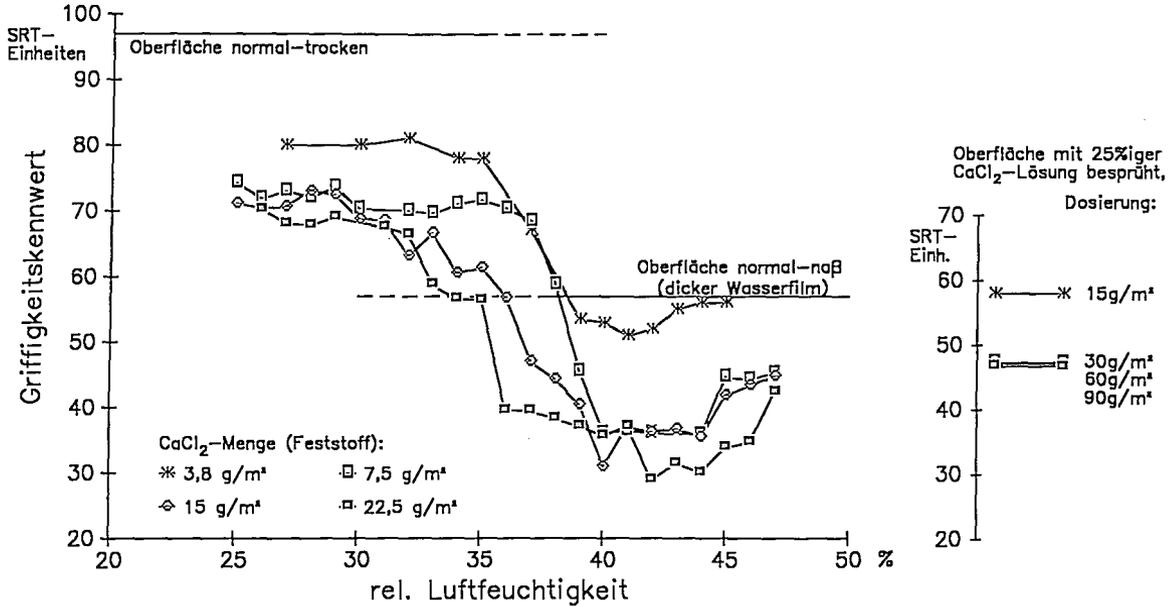
Meßergebnisse am Pendelgerät(SRT) in Abhängigkeit von der CaCl<sub>2</sub>-Dosierung und der Luftfeuchtigkeit auf einer Fahrbahnoberfläche mit mittelmäßiger Mikro- und Makrotextur (t<sub>SRT</sub>=60; t<sub>M</sub>=15)

# Fahrbahnprobe Nr. 4

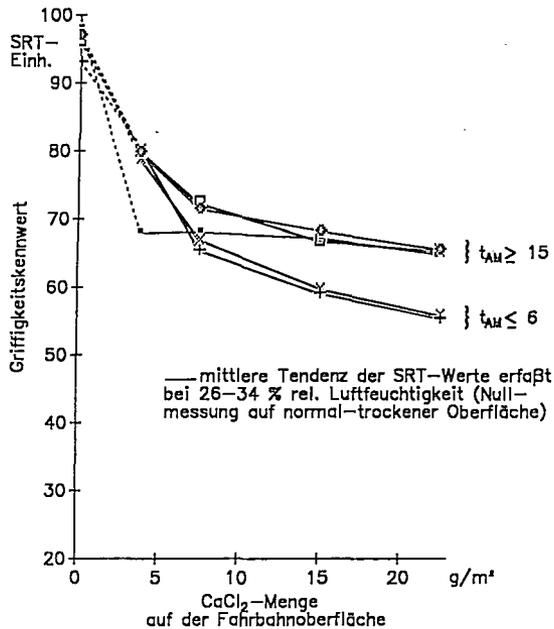


Meßergebnisse am Pendelgerät(SRT) in Abhängigkeit von der CaCl<sub>2</sub>-Dosierung und der Luftfeuchtigkeit auf einer Fahrbahnoberfläche mit schlechter Mikrotextur (Mineralstoffe poliert) und mittelmäßiger Makrotextur (t<sub>SRT</sub>=42; t<sub>M</sub>=14)

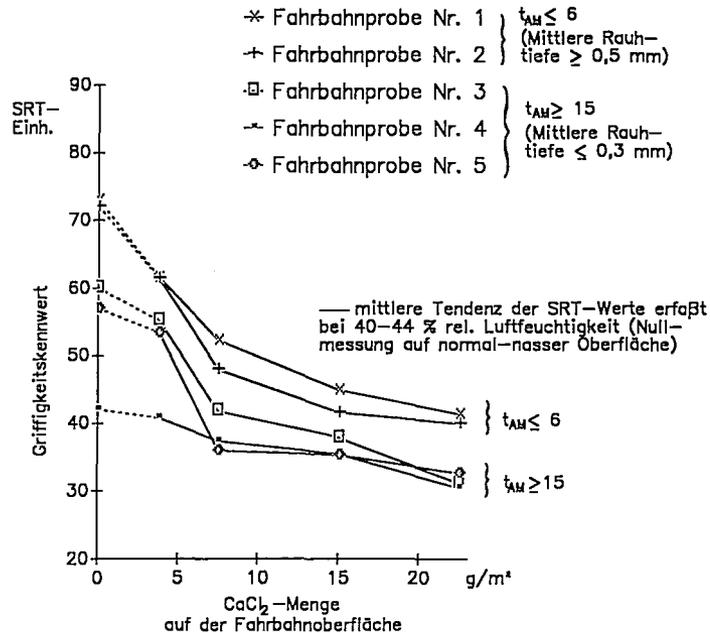
# Fahrbahnprobe Nr. 5



Meßergebnisse am Pendelgerät(SRT) in Abhängigkeit von der CaCl<sub>2</sub>-Dosierung und der Luftfeuchtigkeit auf einer Fahrbahnoberfläche mit mittelmäßiger Mikrotextur und geringer Makrotextur (t<sub>SRT</sub>=57; t<sub>AH</sub>=68)



Mittlere Tendenz der Griffigkeit in Abhängigkeit von der CaCl<sub>2</sub>-Menge und der Fahrhahnoberfläche bei visuell trocken erscheinender Oberfläche



Mittlere Tendenz der Griffigkeit in Abhängigkeit von der CaCl<sub>2</sub>-Menge und der Fahrhahnoberfläche bei visuell feucht erscheinender Oberfläche



