

# **Vergleichsunter- suchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 63**

**bast**



# **Vergleichsunter- suchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten**

von

Ursula Blume

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Straßenbau Heft S 63**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Arbeitsprogrammprojekt 05.321 der Bundesanstalt für Straßenwesen:**  
Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsverhalten an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9323  
ISBN 978-3-86918-061-8

Bergisch Gladbach, Oktober 2010

## Kurzfassung – Abstract

### Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten

Obwohl rezyklierte Baustoffe und industrielle Nebenprodukte verstärkt im Ober- und Unterbau von Straßen eingesetzt werden, fehlt zurzeit ein genormtes Prüfverfahren zur Beurteilung des Frostverhaltens dieser Baustoffgemische. Gleiches gilt für die Beurteilung des Frostverhaltens von kalkbehandelten Böden.

Zur realitätsnahen Simulation der Frostbeanspruchung wurde eine neue Versuchs- und Messeinrichtung auf Grundlage der in der Forschungsarbeit von WEINGART, WIELAND „Weiterentwicklung des Frosthebungsversuches“ festgelegten Rahmenbedingungen zur Durchführung von Routineprüfungen erprobt.

Hierzu wurden Vergleichsuntersuchungen an unterschiedlichen Böden und Baustoffgemischen, mit denen die Bandbreite der im Straßenbau eingesetzten Tragschichten erfasst und unterschiedliche frostempfindliche Böden untersucht werden sollten, von insgesamt sieben Versuchsteilnehmern durchgeführt. Von vier Teilnehmern wurde das neu entwickelte Frosthebungsgerät verwendet, drei Teilnehmer führten die Versuche mit anderen Frosthebungsgeräten durch. Die Versuchsrandbedingungen wurden in einer Arbeitsanweisung vorgegeben, um die bestmögliche Vergleichbarkeit der Versuche zu garantieren.

Mit dem neuen Frosthebungsgerät können jeweils Doppelversuche in getrennten Versuchskammern durchgeführt werden. Zur Minimierung der Wandreibung bestehen die Probezylinder aus Teflonringen, die sich während des Versuches voneinander lösen können, um die frostbedingte Hebung des Materials zu ermöglichen. Die Proben stehen in einem Wasserbad, damit während des gesamten Versuchszeitraumes Wasser nachgesaugt werden kann. Die Befrostung wird durch einen Kühlkopf von oben auf die Probe aufgebracht. Nach einer 24-stündigen Temperierungsphase folgt die 4-tägige Absenkphase, in der die Kühlkopftemperatur so gesteuert wird, dass die 0°C-Isotherme mit konstanter Geschwindigkeit in Probenmitte erreicht wird. Diese Lage wird während der 3-tägigen Befrostungsphase beibehalten. Während der 24-stündigen Auftauphase erfolgt das vollständige Auftauen der Probe.

Gemessen werden die Temperatur an der Oberfläche und in der Mitte der Probe sowie die Temperatur des Wasserbades. Daneben wird die Hebung der Probe bestimmt. Während des gesamten Versuches werden diese Messdaten in 5-minütigen Intervallen vollautomatisch gemessen und aufgezeichnet.

Es wurden mehrere Parameter, die aus den Ergebnissen des Versuches direkt bestimmt werden, untersucht und bewertet mit dem Ziel, Kriterien zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit festzulegen. Hierzu wurden die Quellung in der 24-stündigen Temperierungsphase, die maximale Frosthebung, die nach dem Auftauen verbleibende Resthebung sowie die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit, d. h. die Hebungsdifferenz zwischen letztem und vorletztem Befrostungstag, untersucht. Zusätzlich wurden die Kornverfeinerung, der Wassergehalt und die Tragfähigkeitsabnahme durch Vergleich der CBR-Werte vor und nach Befrostung, ausgewertet. Verglichen wurden diese Größen mit dem Kornverteilungskriterium gemäß ZTV E-StB und den Festlegungen in Österreich und in der Schweiz zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit. Die geringe und variierende Anzahl der Versuche ermöglicht keine statistischen Vergleiche.

Das neue Frosthebungsgerät eignet sich zusammen mit dem festgelegten Befrostungsregime zur Durchführung von Frosthebungsversuchen an rezyklierten Baustoffgemischen, industriellen Nebenprodukten und kalkbehandelten Böden.

Für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit sollte die maximale Frosthebung bewertet und limitiert werden. Daneben ist die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit zu begrenzen. Nur wenn während der Befrostungsphase eine deutliche Abflachung der Hebungskurve erreicht wird, sind die gemessenen maximalen Hebungen aussagekräftig.

Es werden Verbesserungsvorschläge für die Festlegung der Einbaubedingungen gemacht. Auf Grundlage der Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen wurde der Entwurf einer Technischen Prüfvorschrift für Frosthebungsversuche an kalkbehandelten Böden, rezyklierten Baustoffen und industriellen Nebenprodukten weiterentwickelt und konkretisiert.

Zur Festlegung von Kriterien zur Klassifizierung der Frostempfindlichkeit sind die Durchführung und Auswertung weiterer Versuche an unterschiedlichen natürlichen und rezyklierten Baustoffen und Bau-

stoffgemischen und kalkbehandelten Böden nach den Vorgaben dieser Technischen Prüfvorschrift erforderlich.

### **Comparison of frost-heave-tests and hydraulically lime-treated soils, recycling-materials and industrial by-products**

Recycled materials and industrial by-products are increasingly used in the pavement and in the subgrade of roads, although there is currently no standardised test method for evaluating the frost behaviour of these construction material mixtures. The same applies to the evaluation of the frost behaviour of lime-treated soils.

A new test and measuring device based on the framework conditions for the performance of routine tests determined in the research work of WEINGART, WIELAND "Further development of the frost heaving test" was investigated to facilitate a realistic simulation of frost stress.

Seven test participants performed comparative investigations on different soils and building material mixtures that were intended to represent the substructures used in road construction and to investigate frost-sensitive soils. Four of the participants used the newly developed frost-heaving device and three participants performed the tests with other frost-heaving devices. The constraints of the test were specified in detailed work instructions to ensure the best possible comparability of the tests.

The new frost-heaving device can be used to perform double tests in separate test chambers. The test cylinders are made of Teflon rings that can separate from each other in order to minimise wall friction and to allow frost-dependent heaving of the material. The samples are placed in a water bath in order to ensure the possibility to suck water during the entire test period. Cooling to simulate frost is applied by a cooling head placed on top of the sample. A 24-hour temperature stabilisation period is followed by a 4-day cooling-down phase during which the cooling head temperature is controlled to ensure that the 0°C-isotherm is approached at a constant speed in the middle of the sample. This condition is sustained during a 3-day frost exposure phase. During the subsequent 24-hour thawing phase, the sample is completely defrosted.

The temperature at the surface and in the middle of the sample and the temperature of the water bath are measured. Further on the heaving of the sample is determined. These data are automatically measured at 5-minute intervals during the entire test period.

Several parameters which were determined directly from the results of the tests, were investigated and evaluated to define criteria for the assessment of frost sensitivity. The swelling during the 24-hour temperature stabilisation period, the maximum frost heaving, the heaving that remains after thawing and the frost-heaving speed, i.e. the difference in heaving between the last and the second-last frost exposure day, were investigated for this purpose. Additional values determined were the grain size reduction, the water content and the reduction in bearing capacity by comparing the CBR-values before and after frost exposure. These values were compared with the grain distribution criterion according to the ZTV E-StB and the regulations concerning frost sensitivity in Austria and Switzerland. The low and varying number of tests does not permit statistical evaluation.

The new frost-heaving device in combination with the specified frost-exposure procedure is suitable for performing frost-heaving tests on recycled building material mixtures, industrial by-products and hydraulically lime-treated soils.

The evaluation of frost sensitivity should be based on the valuation and limitation of maximum frost heaving. The relevant frost-heaving speed should be limited as well because the maximum heaving measured is only significant if the heaving curve reaches a distinctive flattening during the frost-exposure phase.

Some suggestions were made to improve the specifications of the installation conditions. The draft of the technical test specification for frost-heaving tests on hydraulically lime-treated soils, recycled building materials and industrial by-products was enhanced and substantiated, based on the results of the comparative investigations.

For the determination of criteria for the classification of frost sensitivity, the performance and evaluation of further tests on different, natural and recycled construction materials and construction material mixtures and on hydraulically lime-treated soils according to the technical test specification is necessary.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	7	4.2.9	Auflast	21
1.1	Problemstellung	7	4.2.10	Tragfähigkeitsprüfung	21
1.2	Ziel der Forschungsarbeit	7	4.3	Festlegung der Probenkennwerte	21
1.3	Vorgehensweise	8	4.3.1	Allgemeines	21
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	8	4.3.2	Probengröße	21
2.1	Allgemeine Frostbegriffe	8	4.3.3	Größtkorn	22
2.2	Allgemeine Begriffe zum Frosthe- bungsversuch	9	4.3.4	Einbaudichte, Einbauwassergehalt und Verdichtungsmethode	22
2.3	Abkürzungen und Formelzeichen	9	4.3.5	Wassergehalt der Probe	22
<b>3</b>	<b>Frostempfindlichkeit von Böden</b>	10	4.3.6	Aufbereitung des Probenmaterials	22
3.1	Definition der Frostempfindlichkeit	10	4.4	Neu entwickeltes Frosthebungs- gerät	23
3.2	Theoretische Ansätze zur Erklärung von Frosthebungen	10	<b>5</b>	<b>Beschreibung des Ring- versuches</b>	25
3.3	Historische Entwicklung der Frostkriterien	12	5.1	Allgemeines	25
3.4	Prüfungen zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit	14	5.2	Beschreibung der Frosthebungs- geräte der Versuchsteilnehmer	25
3.5	Frosthebungsversuche	16	5.2.1	Versuchsteilnehmer TA, TB, TC, TD	25
3.5.1	Allgemeines	16	5.2.2	Versuchsteilnehmer TE	25
3.5.2	Beschreibung der Frosthebungs- versuche in D/A/CH	16	5.2.3	Versuchsteilnehmer TF	26
3.5.3	Bewertung der Frosthebungs- versuche in A/CH	17	5.2.4	Versuchsteilnehmer TG	27
<b>4</b>	<b>Entwicklung und Erprobung des Frosthebungsgerätes</b>	18	5.3	Weitere auf dem deutschen Markt befindliche Prüfgeräte	27
4.1	Allgemeines	18	5.4	Beschreibung der untersuchten Böden und Baustoffgemische	28
4.2	Festlegung der Randbedingungen für den Versuchsablauf	19	5.4.1	Bodenmechanische Eigenschaften	28
4.2.1	Allgemeines	19	5.4.2	Frostempfindlichkeit	28
4.2.2	Wirkungsrichtung des Frostes	19	5.5	Arbeitsanweisung	30
4.2.3	Wasserzufuhr	19	<b>6</b>	<b>Auswertung des Frosthebungs- ringversuches</b>	32
4.2.4	Temperaturbedingung für die Befrostung und vertikaler Temperaturgradient	19	6.1	Allgemeines	32
4.2.5	Temperaturbedingungen für den Tauprozess	20	6.2	Beschreibung der Versuchs- durchführung der einzelnen Teilnehmer	33
4.2.6	Geschwindigkeiten für Frostein- dringung und Auftauprozess	20	6.2.1	Allgemeines	33
4.2.7	Versuchsdauer	20	6.2.2	Teilnehmer TA	33
4.2.8	Anzahl der Frost-Tau-Zyklen	21	6.2.3	Teilnehmer TB	33
			6.2.4	Teilnehmer TC	34
			6.2.5	Teilnehmer TD	34
			6.2.6	Teilnehmer TE	34
			6.2.7	Teilnehmer TF	35
			6.2.8	Teilnehmer TG	36

6.3	Materialbezogene Auswertung	36	7.4.4	Versuchsdauer	58
6.3.1	Allgemeines	36	7.5	Parameter des Frosthebungsversuches	58
6.3.2	Quarzit	36	7.5.1	Messgenauigkeit der zu bestimmenden Kenngrößen	58
6.3.3	Basalt	37	7.5.2	Wassergehalt	58
6.3.4	Lavaschlacke	38	7.5.3	Quellung in der Temperierungsphase und Hebungen	59
6.3.5	RC-Beton mit Ziegel	38	7.5.4	Tragfähigkeitsprüfung nach Befrostung	59
6.3.6	BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel	39	7.5.5	Kornverteilung nach Befrostung	59
6.3.7	Elektroofenschlacke (EOS)	39	<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	60
6.3.8	SE-Boden	40	8.1	Allgemeines	60
6.3.9	F3-Boden	41	8.2	Versuchsvorbereitung und -durchführung	60
6.3.10	F3-Boden mit Kalkhydrat	41	8.3	Bewertung der Frostempfindlichkeit	61
6.4	Auswertung der Einzelparameter	42	<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	62
6.4.1	Allgemeines	42	<b>10</b>	<b>Anlagenhinweis</b>	63
6.4.2	Zusätzlich aufgebrachte Schläge beim Einbau	42	<b>11</b>	<b>Literatur</b>	63
6.4.3	Quellung in der Temperierungsphase	44		Normenverzeichnis	65
6.4.4	Maximale Frosthebung	46		Prüfvorschriften-, Merkblätter- und Richtlinienverzeichnis	66
6.4.5	Verbleibende Resthebung	47			
6.4.6	Maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit	47			
6.4.7	Beginn der Eislinsenbildung	48			
6.4.8	Wassergehalt	49			
6.4.9	CBR-Werte	50			
6.4.10	Kornverteilung nach Befrostung	50			
6.5	Zusammenfassende Beurteilung der Versuchsergebnisse	51			
<b>7</b>	<b>Bewertung des neuen Frosthebungsgerätes und Änderungsvorschläge</b>	55			
7.1	Allgemeines	55			
7.2	Probenvorbereitung und Einbau der Proben in den Prüfzylinder	55			
7.3	Frosthebungsgerät	56			
7.4	Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung	57			
7.4.1	Kontakt des Temperaturfühlers in Probenmitte	57			
7.4.2	Temperaturbedingung für die Befrostung und vertikaler Temperaturgradient	57			
7.4.3	Geschwindigkeit der Frosteindringung	57			

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Seit einigen Jahren werden im Zuge der Umsetzung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes verstärkt rezyklierte Baustoffe und industrielle Nebenprodukte nach den TL BuB E-StB im Ober- und Unterbau des Straßenbaus eingesetzt. Praxiserfahrungen und Studien über das Langzeitverhalten, insbesondere über das Frostverhalten, dieser Baustoffe fehlen. In Deutschland existiert zurzeit kein genormtes Prüfverfahren, mit dem das Frostverhalten der industriellen Nebenprodukte und der rezyklierten Baustoffe unter realitätsnahen Bedingungen untersucht werden kann. Zur Bestimmung ihrer Frostsicherheit werden gemäß ZTV E-StB daher die Kriterien zur Untersuchung der Frostempfindlichkeit für Böden und veränderlich feste Gesteine sowie die Kriterien zur Bestimmung der Frostbeständigkeit von Fels angewendet.

Die Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Böden und veränderlich festen Gesteinen erfolgt anhand der Korngrößenverteilung und der plastischen Eigenschaften durch die Zuordnung zu Frostempfindlichkeitsklassen. Hierdurch kann das Frostverhalten des gesamten Korngemisches beurteilt werden. Die Frostbeständigkeit der einzelnen Gesteinskörner wird nach den TL Gestein-StB durch die Prüfung der Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 bzw. durch die Prüfung des Widerstandes gegen Frost-Tauwechsel nach DIN EN 1367-1 beurteilt. Wenn sowohl die Frostunempfindlichkeit als auch die Frostbeständigkeit nachgewiesen werden, werden industrielle Nebenprodukte und rezyklierte Baustoffe als frostsicher eingestuft.

Für Bodenverfestigungen bzw. Bodenverbesserungen fein- und gemischtkörniger Böden wird entsprechend den ZTV E-StB der Nachweis des Frostwiderstandes gefordert. Dieser Nachweis wird auf der Grundlage der Technischen Prüfvorschriften für Boden und Fels in den Teilen B 11.1 „Eignungsprüfungen für Bodenverfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln“ bzw. Teil B 11.5 „Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat“ erbracht.

Diese Prüfverfahren sind aber sowohl für rezyklierte Baustoffe und industrielle Nebenprodukte als auch für mit Bindemitteln behandelte Böden nicht realitätsnah genug, um die Frostbeanspruchung in der Straße zu simulieren und die Frostsicherheit

der Baustoffe zuverlässig zu bewerten. Forschungsarbeiten in der Bundesanstalt für Straßenwesen an rezyklierten Baustoffen bestätigen ebenfalls, dass die konventionellen Prüfverfahren zu Aussagen über ihr Frostverhalten nicht geeignet sind (GUTH, 1992; MOTZKE, 2001).

Im Rahmen einer Diplomarbeit (WIELAND, 2003) an der Hochschule Anhalt (Dessau) wurden Frosthebungsversuche an verschiedenen Materialien auf der Grundlage ausländischer Prüfvorschriften (ÖNORM B 4810; SN 670321a) durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse konnten in einer weiterführenden Forschungsarbeit (WEINGART; WIELAND, 2005) umgesetzt und vertieft werden. In dieser Arbeit sind die geräte- und messtechnischen Voraussetzungen sowie die Randbedingungen für einen wirklichkeitsnahen Frosthebungsversuch ermittelt worden.

## 1.2 Ziel der Forschungsarbeit

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde eine Versuchs- und Messeinrichtung erprobt, mit der die Frostbeanspruchung in der Straße realitätsnah simuliert werden kann. Grundlage für diese Messeinrichtung waren die Rahmenbedingungen, die durch die Forschungsarbeit von WEINGART; WIELAND (2005) festgelegt und beschrieben wurden.

Mit dieser neuen Versuchs- und Messeinrichtung wird die Weiterentwicklung des Frosthebungsversuches dahingehend angestrebt, dass er als Routineprüfung geeignet ist. Die Erkenntnisse sollen in eine Prüfvorschrift für Eignungsprüfungen an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten einfließen, um deren Frostverhalten unter wirklichkeitsnahen Beanspruchungen zu untersuchen. Festzulegen sind die Probenvorbereitung, die Versuchsrandbedingungen und die genaue Versuchsdurchführung. Zur anschließenden Beurteilung der Frostempfindlichkeit sind geeignete Parameter und deren Grenzwerte festzulegen, durch die eine Klassifizierung der Frostempfindlichkeit der beprobten Materialien möglich ist.

Mit dem Nachweis der Sicherheit gegenüber Frosthebungen könnten Bedenken gegenüber alternativen rezyklierten Baustoffen, industriellen Nebenprodukten und Bodenverbesserungen ausgeräumt werden. Ein erhöhter Einsatz dieser Baustoffe im Straßenbau ist aus Gründen des Umweltschutzes

zur Schonung der natürlichen Ressourcen und der Einsparung von Deponieraum unumgänglich.

### 1.3 Vorgehensweise

Erster Schritt war ein Literaturstudium über das Frostverhalten verschiedener Materialien im Straßenbau unter besonderer Berücksichtigung der unterschiedlichen Prüfverfahren und Bewertungen der Frostsicherheit. Hierzu war der Abschlussbericht zum FE 05.136 „Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel“ von besonderer Bedeutung.

Auf Grundlage der Erkenntnisse der Arbeit von WEINGART; WIELAND (2005) wurde die neue Versuchs- und Messeinrichtung zur Durchführung des Frosthebungsversuches zunächst für die BAST hergestellt. Der Prototyp wurde durch die Befrostung unterschiedlicher Böden getestet und optimiert. Die Entwicklung umfasste auch die Erstellung einer automatischen Auswertesoftware.

Im Anschluss an die Entwicklung dieses Messgerätes wurden Vergleichsuntersuchungen mit anderen Instituten durchgeführt. Neben der BAST als Organisator haben die folgenden Institute und Labore teilgenommen (in alphabet. Reihenfolge):

- Hochschule Anhalt Dessau, Fachbereich Architektur und Bauwesen,
- Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Lehrgebiet Geotechnik,
- Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau,
- Technische Universität München, Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau,
- Technische Universität Graz, Institut für Bodenmechanik und Grundbau,
- TPA – Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GmbH, Wien.

Von vier Teilnehmern wurde das neu entwickelte Frosthebungsgerät verwendet, drei Teilnehmer führten die Versuche mit anderen Frosthebungsgeräten durch. Die Rahmenbedingungen wurden dabei von der BAST festgelegt, um eine Vergleichbarkeit aller Versuchsergebnisse zu ermöglichen. Hierzu wurde eine detaillierte „Arbeitsanweisung zum Frosthebungsversuch im Rahmen des Ring-

versuches“ aufgestellt, die die einzelnen Schritte des Versuchsablaufes für das neue und die älteren Prüfgeräte exakt beschreibt.

Es wurden acht Materialien ausgewählt, durch die die Bandbreite der im Straßenbau eingesetzten Tragschichtmaterialien erfasst sowie unterschiedliche frostempfindliche Böden untersucht werden sollten. Einflüsse durch inhomogenes Versuchsmaterial wurden durch sorgfältige Aufbereitung und Teilung der Böden im Großdrehleiter minimiert.

Planung, Organisation, Durchführung und Auswertung des Ringversuches erfolgten gemäß den Merkblättern über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 3 und 4.

Abschließend erfolgte eine Bewertung der Eignung des neuen Frosthebungsgerätes für die Untersuchung von RC-Baustoffen, die Beurteilung der Ergebnisse und die Erarbeitung einer Prüfvorschrift für Eignungsprüfungen an kalkbehandelte Böden, rezyklierten Baustoffen und industriellen Nebenprodukten.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Allgemeine Frostbegriffe

Frosteindringungstiefe:

Tiefe, bis zu der Boden und Baustoffgemische bei Frost gefrieren.

Frostempfindlichkeit:

Eigenschaft von Böden oder Baustoffgemischen, die Gefügeveränderungen oder Schädigungen durch Frost unterliegen.

Frostindex FI:

Unterschied zwischen dem Maximum und dem Minimum der Temperatursummenkurve einer Kälteperiode.

Frostperiode:

Folge von mehreren Tagen mit mittlerer Lufttemperatur unter dem Gefrierpunkt.

Kälteperiode:

Frostperiode oder Folge von Frostperioden, die im Abstand von so wenigen Tagen mit Tauwetter aufeinanderfolgen, dass keine tiefgreifende Änderung der Frosteindringung stattfindet.

0°C-Isotherme:

Geometrischer Ort mit gleichen Temperaturverhältnissen von 0° C. Bei idealisierten Bedingungen weist die Isotherme in der Probe einen etwa horizontalen Verlauf auf.

Wärmestrom:

pro Zeiteinheit übertragene Wärmemenge.

Wärmestromdichte:

Änderung der thermischen Energie bezogen auf einen bestimmten Querschnitt pro Zeiteinheit.

## 2.2 Allgemeine Begriffe zum Frosthebungsversuch

Boden:

Begriff wird nachfolgend zur Beschreibung von natürlichen Böden und Baustoffgemischen verwendet.

CBR-Wert:

„California Bearing Ratio“ gemäß DIN EN 13286-47 bzw. TP BF-StB, Teil B 7.1.

CBRF-Wert:

CBR-Wert nach der Befrostung, bestimmt nach einer 24-stündigen Auftauphase.

Frosteindringtiefe:

Tiefe, bis zu der die Probe bei der Befrostung gefriert.

Frosteindringung:

Von der Kälteerzeugungsquelle (meist Probenoberfläche) ausgehendes fortschreitendes Gefrieren der Probe.

Maximale Frosthebung:

Differenz zwischen Probenhöhe zu Beginn und am Ende der Befrostung.

Resthebung:

Differenz zwischen der Probenhöhe nach dem vollständigen Auftauen und der Probenhöhe bei Beginn der Befrostung.

Hebungskoeffizient:

Quotient aus der Höhe der Resthebung und der maximalen Frosthebung.

Offenes System:

System, in dem während des gesamten Versuches ein unbegrenztes Wasserangebot herrscht.

Geschlossenes System:

System, in dem das Wasserangebot zu bestimmten Versuchsperioden begrenzt ist.

## 2.3 Abkürzungen und Formelzeichen

CBR „California Bearing Ratio“ gemäß DIN EN 13286-47 bzw. TP BF-StB, Teil B 7.1

CBR<sub>0</sub> CBR-Wert vor Befrostung

CBR<sub>F</sub> CBR-Wert nach Befrostung und 24-stündiger Auftauphase

CBR<sub>W</sub> CBR-Wert nach 24-stündiger Wasserlagerung

FI Frostindex auf der Basis der Lufttemperatur  $T_L$  [°C · d] (Gradtage)

FI<sub>0</sub> Frostindex auf der Basis der Oberflächentemperatur  $T_0$  [°C · d] (Gradtage)

K Kelvin, Einheit der absoluten Temperatur  $0\text{ °C} = 273\text{ K}$

$k_f$  Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

$k_r$  Wasserdurchlässigkeit gemäß DIN 18130, Teil -zY-MS-MZ-7 [m/s] bei 10 °C

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit [W/m · K]

$\lambda_u$ : ungefroren;  $\lambda_f$ : gefroren

$L_w$  latente volumetrische Fusionsenergie des Wassers

$\rho_w$  Saugspannung des Porenwassers im gefrierenden Boden

$\rho_a$  Rohdichte des Bodens [Mg/m<sup>3</sup>]

$\rho_d$  Trockendichte des Bodens [g/cm<sup>3</sup>]

$\rho_s$  Korndichte des Bodens [g/cm<sup>3</sup>]

$\rho_{ssd}$  Rohdichte des Baustoffes auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis [Mg/m<sup>3</sup>]

$\rho_E$  Dichte von Eis bei 0 °C:  
 $\rho_E = 0,911\text{ g/cm}^3$

$\sigma_{iw}$  Grenzflächenspannung an der Eis-Wasser-Grenzfläche

$\rho_{Pr}$  Proctordichte [g/cm<sup>3</sup>]

$\rho_W$	Dichte von Wasser bei 0 °C: $\rho_W = 0,99987 \text{ g/cm}^3$
$\Delta\rho_W$	Saugspannung im gefrierenden Boden
T	Temperatur [°C]
$T^*$	Gefriertemperatur des Porenwassers
$T_0^*$	Gefriertemperatur von freiem Wasser: 273,15 K
$T_f$	Gefriertemperatur $T_f = 0 \text{ °C}$ für Wasser
$\Delta T$	Temperaturdifferenz [K]
$WA_{24}$	Wasseraufnahme nach 24 Stunden [%]
w	Wassergehalt des Bodens [M.-%]
$w_{Pr}$	Wassergehalt des Bodens bei optimaler Proctordichte [M.-%]

### 3 Frostempfindlichkeit von Böden

#### 3.1 Definition der Frostempfindlichkeit

Ein Boden wird im Straßenbau als frostempfindlich definiert, wenn während der Gefrierphase Hebungen in einer Größenordnung entstehen, die den Straßenaufbau schädigen, und wenn während der Tauphase Setzungen und ein Verlust der Tragfähigkeit auftreten. Welcher dieser drei Prozesse der bestimmende Faktor für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit eines Bodens ist, ist abhängig von den lokalen Klimaverhältnissen, den Bodeneigenschaften und der Empfindlichkeit des Bodens gegenüber dem Einfluss des Frostes. Die Beurteilung der Frostempfindlichkeit basiert normalerweise auf der Frosthebung.

Im deutschen Sprachgebrauch ist die Frostempfindlichkeit von der Frostbeständigkeit zu unterscheiden. Durch die Frostbeständigkeit wird die stoffliche Veränderung des Festgesteins durch die Beanspruchung durch Frost-Tauwechsel beschrieben, die zu einer Absplitterung oder dem Zerbrecchen der Einzelkörner bzw. des Felses führen.

#### 3.2 Theoretische Ansätze zur Erklärung von Frosthebungen

Für das Auftreten von Frosthebungen müssen die folgenden drei generellen Anforderungen gegeben sein (ANDERSON et al. 1984):

- Der anstehende Boden gefriert,
- der gefrierende Boden ist frostempfindlich und
- in der Frostzone steht Wasser zur Verfügung bzw. Wasser kann nachgesaugt werden.

Boden gefriert, wenn die Temperatur des im Boden vorhandenen Porenwassers unter den Gefrierpunkt von Wasser fällt. Die Frosthebungen entstehen zum einen dann, wenn das im Boden vorhandene Porenwasser durch das Gefrieren eine Volumenzunahme um 9 % erfährt und keine Freiräume für die Volumenausdehnung zur Verfügung stehen. Dieser Vorgang wird als „in-situ-freezing“ bezeichnet (TAKAGI, 1980; BOOTH, 1981) und ist vom Wassergehalt, vom Sättigungsgrad und vom Porenanteil des Bodens abhängig.

Größeren Anteil an den Frosthebungen hat zum anderen die Zuwanderung von Wasser aus tieferen Bodenschichten, das zum Gefrierbereich wandert und sich in Form von wachsenden Eislinsen oder -schichten akkumuliert. Dieser Vorgang wird „segregation freezing“ genannt (TAKAGI, 1980; BOOTH, 1981).

Frosteindringung und Frosthebung werden durch Wechselwirkungen zwischen Wärme- und Porenwasserfluss bestimmt. In der Gefrierzone befinden sich die Wärmestromdichte zwischen gefrorenem und ungefrorenem Boden und die beim Gefrieren von Wasser frei werdende Wärmeenergie in einem thermischen Gleichgewicht. Der Wärmefluss durch den gefrorenen Boden wird durch die folgenden Parameter beeinflusst:

- den Wärmefluss vom ungefrorenen zum gefrorenen Boden,
- die durch das gefrierende Porenwasser freigesetzte Wärmeenergie,
- die durch die Bildung von Eislinsen durch zuwanderndes Wasser in der Gefrierzone freigesetzte Wärmeenergie.

Die Wärmekompensation durch Gefriervorgänge kann also aufgeteilt werden zwischen dem in-situ gefrierenden Porenwasser und der Segregation

von Eis durch die Migration von Wasser, die durch das Segregationsvermögen des gefrierenden Bodens bestimmt wird (ARAKAWA, 1977). Neben der bodenspezifischen Frostempfindlichkeit wird die Frosthebung durch die Bedingungen des Gefriervorganges, d. h. die Abkühlungsgeschwindigkeit und die Auflast in der Gefrierzone und den Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens zwischen der Wasserquelle und der Gefrierzone, beeinflusst (KONRAD, 1980).

Zur physikalischen Erläuterung und Modellierung der Abläufe bei der Frosthebung durch eine Zuwanderung des Porenwassers zur Gefrierzone existieren verschiedene Ansätze. Gemäß EVERETT (1961) ist der Wassertransport durch die Grenzflächenspannung an der Eis-Wasser-Grenzfläche bedingt.

$$\Delta\rho_w = 2\sigma_{iw}/r \quad [1]$$

mit

$\Delta\rho_w$ : Saugspannung im gefrierenden Boden

$\sigma_{iw}$ : Grenzflächenenergie an der Eis-Wasser-Grenzfläche

r: äquivalenter Porenradius des Bodens

Durch die Differenz der Druckpotenziale zwischen dem ungefrorenen Porenwasser und dem wachsenden Eiskristall entsteht ein Druckgefälle, durch das Porenwasser zum Eiskristall fließt. Die Saugspannung ist proportional zur Oberflächenspannung und zum Radius der konkaven Grenzschicht. Diese ist wiederum bedingt durch die Porengröße des gefrierenden Bodens.

Die Ausbreitungstemperatur der Eislinienbildung wird durch die Kelvin-Gleichung als Funktion des Porenradius beschrieben:

$$T^* - T_m^* = \Delta T = 2 T_m^* \sigma_{iw}/L_w r \quad [2]$$

mit

$T_m^*$ : Auftautemperatur des Eises über einer ebenen Oberfläche

$L_w$ : latente volumetrische Fusionsenergie des Wassers

r: Krümmungsradius der Eis-Wasser-Grenzfläche oder Porenradius

Neben diesem so genannten kapillaren Ansatz erklärt ein zweiter Ansatz die Entstehung der Saug-

spannung durch die Abkühlung des Wasserfilms zwischen den mineralischen Aggregaten und Eis unter eine Temperatur von 0 °C (MILLER, 1972; KEINONEN, 1977). Gemäß der Clausius-Clapeyron-Gleichung ist die Saugspannung proportional zum Absinken der Gefriertemperatur. Vergleiche mit Laborversuchen zeigen, dass dieser thermodynamische Ansatz realistischer als der kapillare Ansatz ist (ANDERSON et al. 1984; WILLIAMS, 1967).

$$\rho_w = L_w \ln T^*/T_0^* \quad [3]$$

mit

$\rho_w$ : Saugspannung des Porenwassers im gefrierenden Boden

$L_w$ : latente volumetrische Fusionsenergie des Wassers

$T^*$ : Gefriertemperatur des Porenwassers

$T_0^*$ : Gefriertemperatur von freiem Wasser, 273,15 K

Das Gefrieren eines Bodens geschieht also nicht bei genau festgelegter Temperatur und Gefriereebene, sondern graduell in einer Gefrierzone, die abhängig vom Porenwassertemperatur-Porenwasserdruckprofil ist. KONRAD (1980) konnte nachweisen, dass der Gefrierprozess in den größten Poren in Übereinstimmung mit der Kelvin-Gleichung beginnt. Im Anschluss gefriert das Wasser bei abnehmender Temperatur und zunehmenden Saugspannungen in kleineren Porenradien mit abnehmender Wasserdurchlässigkeit.

TAKAGI (1980) erklärt den Prozess der Zuwanderung des Porenwassers zum Gefrierbereich auf Grund der Saugspannung durch die Wanderung der Wassermoleküle über die Hydrathülle der Bodenteilchen zum Gefrierbereich. Die Menge der transportierten Wassermoleküle ist damit abhängig von der Wasserleitfähigkeit der Hydrathüllen. Sie ist in nichtbindigen Böden gering, da die Hydrathüllen auf Grund der geringen Oberflächenladung nur schwach gebunden und dünn sind. Da sie bei Frost vollständig gefrieren, ist dann keine Leitfähigkeit mehr vorhanden. Bei bindigen Böden sind die Hydrathüllen dicker und fester gebunden. Da sie auch bei tiefen Temperaturen nicht vollständig gefroren sind und dadurch ein längerer Wassertransport zum Gefrierbereich vorhanden ist, ist die Frostempfindlichkeit bindiger Böden höher.

Unterschiedliche Faktoren beeinflussen die Bindungsstärke der Hydrathüllen und damit den Wassertransport zur Gefrierzone. Im Allgemeinen nimmt die Dicke der Hydrathülle mit kleiner werdender Oberflächenladungsdichte, zunehmender Größe und Wertigkeit der adsorbierten Moleküle, zunehmender Elektrolytkonzentration der Porenraumlösung und abnehmender Temperatur ab (VOIGT, 1994).

Neben den Bodeneigenschaften beeinflussen aber auch die klimatischen und hydrologischen Eigenschaften des Standortes die Eislinsenbildung, die wiederum die Frostempfindlichkeit bedingt.

Die Frosteinwirkung muss so stark und anhaltend genug sein, dass die Frostfront tief genug in den Boden eindringen kann. Durch einen hohen Grundwasserstand wird ein permanentes Wasserangebot sichergestellt, was zu größeren Eislinsenbildungen führt. Bei einer geringen Wasserdurchlässigkeit des Bodens steigt die kapillare Steighöhe an und damit auch der Abstand, bei dem ein Nachsaugen des Grundwassers zum Gefrierbereich noch möglich ist. Bei Böden mit einer sehr geringen Wasserdurchlässigkeit ist die nachgesaugte Wassermenge jedoch so gering, dass keine größere Eislinsenbildung mehr möglich ist und die Frostempfindlichkeit wieder abnimmt.

### 3.3 Historische Entwicklung der Frostkriterien

Seit den frühen 30er Jahren des letzten Jahrhunderts beschäftigen sich Wissenschaftler weltweit mit dem Problem des Bodenfrostes und dessen Auswirkungen auf die Gründung von Bauwerken. Die Bedeutsamkeit dieser Problematik spiegelt sich in der Vielzahl an Forschungsprojekten und Veröffentlichungen wider.

*Anmerkung:*

*Nachfolgend werden jeweils die Fachausdrücke, Symbole und Einheitenbezeichnungen der einzelnen Autoren wiedergegeben. Sie stimmen mit den heute üblichen Terminologien teilweise nicht überein.*

Allgemein existiert eine Unterscheidung zwischen frostempfindlichen und nicht-frostempfindlichen Böden. Frostempfindliche Böden zeigen unter Frosteinwirkung eine Tendenz zur Hebung in einer

für Bauwerke unverträglichen Größenordnung. Sie enthalten normalerweise einen größeren Feinkornanteil. Das gebräuchlichste und älteste Kriterium zur Abschätzung der Frostempfindlichkeit eines Bodens ist daher seine Kornverteilung (CASAGRANDE, 1931; BESKOW, 1935; CHAMBERLAIN, 1981), aber auch zahlreiche andere Parameter zur Klassifikation wurden diskutiert und eingesetzt. Generell wird dabei impliziert, dass die Frostempfindlichkeit eine bodenspezifische Charakteristik ist.

Eine ausführliche Literaturlauswertung zur „Vergleichenden Beurteilung der gebräuchlichen Frostkriterien für Frostschutz-Kies-Sande anhand der Originalveröffentlichungen“ wurde von JESSBERGER (1976) im Rahmen eines Forschungsauftrages durchgeführt. Ziel war die Überprüfung der Anforderungen an Frostschutzmaterial gemäß den ZTVE-StB 65, nach denen Frostschutzmaterial nicht mehr als 3 Gew.-% der Körnung  $d < 0,02$  mm enthalten durfte.

Nach der Überprüfung und Bewertung der Originalveröffentlichungen werden von JESSBERGER Kriterien zur näherungsweisen Erfassung der Tragfähigkeitsabnahme des Bodens infolge Frosteinwirkung bzw. nach dem Auftauen mittels eines einfachen Untersuchungsverfahrens vorgestellt.

Die Arbeiten werden von ihm schwerpunktmäßig zusammengefasst, wobei ausdrücklich darauf hingewiesen wird, dass durch die verkürzte Wiedergabe und den fehlenden Kontext die Gefahr von Verfälschungen der ursprünglichen Meinung besteht. Nachfolgend werden die wesentlichen Arbeiten kurz beschrieben.

Die Arbeiten, deren Frostkriterium im Wesentlichen auf der Korngrößenverteilung basiert, werden als eine Gruppe zusammengefasst. Das älteste bekannte Frostkriterium dieser Gruppe wurde von CASAGRANDE (1931) aufgestellt. Ausgehend von empirischen Untersuchungen kommt er zu dem Schluss, dass beträchtliche Eislinsenbildungen in gleichförmigen Böden zu finden sind, wenn diese mehr als 3 Gew.-% der Körnung  $< 0,02$  mm enthalten, und in sehr ungleichförmigen Böden, wenn diese mehr als 10 Gew.-% der Körnung  $< 0,02$  mm enthalten. Keine Eislinsenbildung wurde in Böden mit weniger als 1 Gew.-% der Körnung  $< 0,02$  mm beobachtet, auch wenn das Grundwasser bis zur Frostlinie reichte.

DÜCKER (1939) untersucht zahlreiche Böden in einem von ihm entwickelten Frosthebungsgerät.

Zunächst fordert er eine Verschärfung des Frostkriteriums von CASAGRANDE in dem Sinn, dass die 3 Gew.-%-Grenze unabhängig vom Ungleichförmigkeitsgrad gelten soll. In weiterführenden Studien kommt er zu dem Schluss, dass eine Grenzziehung zwischen „frostgefährlichem“ und „nicht frostgefährlichem“ Bodenmaterial nicht möglich ist und dass vielmehr die mineralogische und chemische Zusammensetzung des Feinkorns das frostquantitative Verhalten bestimmt (DÜCKER, 1956). CASAGRANDES Frostkriterium stelle nur einen ersten Anhalt für die Frostempfindlichkeit von Böden dar.

Von DÜCKER (1956) wird die Frostgefährlichkeit F als Quotient aus der Frosthebung H und der Frosteindringung E eingeführt.

$$F = H/E \times 100 [\%]$$

Er gibt an, dass durch den Wert  $F = 3 \%$  eine Grenze zwischen frostgefährlich und nicht frostgefährlich gegeben ist. Die frostgefährlichen Eigenschaften eines Bodens seien durch diesen Faktor F „eindeutig und quantitativ festgelegt“. Bei seinen Laborversuchen stellt er jedoch bei denselben Böden unterschiedliche Hebungen fest, wenn mit verschiedenen Temperaturen befrosten wird. Damit handelt es sich also nicht um eine „eindeutige und quantitative Festlegung“ der Bodeneigenschaften.

SCHAIBLE (1957) kritisiert die Vorgehensweise, das Problem der Frostschäden mit einigen feststehenden Methoden vorwiegend in Laboratorien zu untersuchen. Sein Ansatz geht von der Untersuchung zahlreicher Frostschäden aus. Er vergleicht die Kornverteilungen des Straßenunterbaus mit den aufgetretenen Schäden und stellt eine Einschätzung der Frost- und Tauempfindlichkeit auf. Seine Unterteilung der Böden in 5 Schadensgruppen erfolgt anhand der prozentualen Anteile der Körnungen  $< 0,002 \text{ mm}$  und  $> 2 \text{ mm}$ .

Die intensive Beschäftigung mit der Frostproblematik in der BASt in den 60er und 70er Jahren resultierte in zahlreichen Veröffentlichungen. Hervorzuheben sind hier FLOSS (1973) und FLOSS (1975). Diese Forschungsarbeiten sind die Grundlage für die Klassifikation der Frostempfindlichkeit in den ZTV E-StB seit 1976.

FLOSS (1973) weicht ebenfalls von der Zweiteilung von CASAGRANDE ab. Abhängig von der Bodenart nach DIN 18196 unterscheidet er drei Frostempfindlichkeitsklassen:

- nicht frostempfindliche Böden:  
grobkörnige Böden,  
gemischtkörnige Böden mit einem Kornanteil  $< 0,06 \text{ mm}$  von max. 8 Gew.-%,
- gering bis mittel frostempfindliche Böden:  
organische Böden (HN, HZ, F),  
ausgeprägt plastische Tone (TA),  
gemischtkörnige Böden mit einem Kornanteil  $< 0,06 \text{ mm}$  von max. 20 Gew.-%,
- sehr frostempfindliche Böden:  
leicht- bis mittelplastische Schluffe (UL, UM),  
leichtplastische Tone (TL),  
gemischtkörnige Böden mit einem Kornanteil  $< 0,06 \text{ mm}$  von max. 40 Gew.-%,  
organische Schluffe (OU).

Diese Klassifikation beruht also sowohl auf der Korngrößenverteilung als auch auf der Plastizität und dem Anteil an organischen Bestandteilen.

In einer weiteren Gruppe von Arbeiten werden die Kapillarität und die Durchlässigkeit des Bodens mit in das Frostkriterium einbezogen. Weiterhin wird die Höhe der Frostzone über dem Grundwasserspiegel berücksichtigt. Von KÖGLER, SCHEIDIG und LEUSSINK wurde nach vorbereitenden Arbeiten der einzelnen Autoren im Jahr 1936 das „Freiberger Frostkriterium aufgestellt“. Bei diesem Kriterium wird die Wassermenge betrachtet, die zur Frostfront geführt werden kann. Durch die kapillare Hubkraft, den Abstand zwischen freiem Grundwasserspiegel und Frostzone und die Durchlässigkeit des Bodens kann auf der Grundlage des Gesetzes von DARCY die Frosthebungsgeschwindigkeit bzw. bei gegebener Zeit auch die gesamte Frosthebung ausgerechnet werden. Mit der Gleichung werden jedoch viel zu hohe Frosthebungen ermittelt, so dass der experimentelle Nachweis des Freiberger Frostkriteriums nicht gelingt.

Sehr umfangreiche Versuche wurden von BESKOW (1938) durchgeführt. Er untersucht das Frosthebungsverhalten bestimmter Kornfraktionen. Die so gewonnenen Ergebnisse lassen sich jedoch nicht einfach auf polydisperse Böden übertragen. Seine Einteilung der Frostempfindlichkeit berücksichtigt sowohl die Kornverteilung als auch die Kapillarität des Bodens. Die von ihm untersuchten Böden aus Schweden bestätigen seine Festlegungen zwischen Bodeneigenschaften und Frostwirkung, obwohl die theoretischen Grundlagen über den Zusammenhang von Kapillarität und Durchlässigkeit auf die Frostwirkung nicht gesichert sind.

Eine Allgemeingültigkeit kann aus seinen Untersuchungen jedenfalls nicht abgeleitet werden.

RÜCKLI (1950) behandelt eine Vielzahl von Einzelfragen. Er beschreibt ein Frosthebungsgerät und definiert eine Gleichung für die Saugkraft, in die die Filtergeschwindigkeit der Grundwasserströmung, der Abstand der Eislinse vom Grundwasser und die Durchlässigkeit des Bodens eingehen. Sein „einfaches Verfahren zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit“ basiert im Wesentlichen auf dem von BESKOW entwickelten Kriterium. Daher gilt für sein Frostkriterium die gleiche Kritik wie bei BESKOW.

JESSBERGER (1976) folgert aus den von ihm durchgeführten Vergleichen, dass das von CASAGRANDE (1931) auf Grundlage der Kornverteilung aufgestellte Frostkriterium sich im Wesentlichen bewährt hat. Es sollte seiner Meinung nach auch nicht abgeschwächt werden, wenn es seine Allgemeingültigkeit behalten soll. Eine Überschreitung dieser Grenze hält er nur dann für möglich, wenn zusätzliche Untersuchungen im Hinblick auf die verminderte Tragfähigkeit des Bodens beim Auftauen durchgeführt werden.

Als Näherung zur Erfassung der Tragfähigkeitsabnahme des Bodens infolge Frosteinwirkung bzw. nach dem Auftauen des Bodens wurde von ihm ein Versuchsverfahren entwickelt. Unterschiedliche Böden wurden Frost-Tauwechselversuchen unterworfen und im Anschluss an die letzte Auftauphase CBRF-Versuche zur Bestimmung der Tragfähigkeit durchgeführt.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse schlägt er eine Klassifikation der Frostempfindlichkeit für eine Neufassung der ZTV E-StB vor. Ausgehend von der Bodenklassifikation nach DIN 18196 werden die Böden in vier Frostempfindlichkeitsklassen eingeteilt. Entscheidend ist hierbei neben der Bodenart der Kornanteil unter 0,06 mm in Gew.-%. Anhand der von FLOSS aufgestellten Relation zwischen CBR-Werten und  $E_{v2}$ -Werten ordnet JESSBERGER den einzelnen Frostempfindlichkeitsklassen Tragfähigkeiten in der Tauperiode zu (Tabelle 3.1).

Klasse	Frostempfindlichkeit	$E_{v2}$ [kp/cm <sup>2</sup> ]
F 1	nicht frostempfindlich	≥ 450
F 2	gering frostempfindlich	300-450
F 3	mittel frostempfindlich	150-300
F 4	sehr frostempfindlich	50-150

**Tab. 3.1:** Frostempfindlichkeit und Tragfähigkeit in der Tauperiode nach JESSBERGER (1976)

Durch diese Korrelation der Frostempfindlichkeitsklassen zur Tragfähigkeit in der Tauphase wird den Forderungen der ZTV E-StB an die Tragfähigkeit des Unterbaues logisch entsprochen. JESSBERGERs Vorschlag konnte sich jedoch nicht durchsetzen.

### 3.4 Prüfungen zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit

Von der International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMFE) wurde in den 80er Jahren ein „Technical Committee on Frost“ (TC-8) gebildet, um sich der Problematik der Frostempfindlichkeit von Böden zu widmen. Eine internationale Forschergruppe bearbeitet grundlegende Fragen zur Definition und Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Böden und erarbeitete einen Vorschlag zur Durchführung von Frosthebungsversuchen (ISSMFE, 1989).

Angestrebt wird eine Vorgehensweise zur Einschätzung der Frostempfindlichkeit von Böden, die in drei Stufen von schnellen, weniger genauen Methoden zu genauen, aber aufwändigen Bestimmungen führt. Diese Methode geht auf einen Vorschlag von CHAMBERLAIN (1981) zurück.

Im Einzelnen sieht der Vorschlag der ISSMFE (1989) die folgende Vorgehensweise vor: Auf der 1. Stufe wird anhand einer Klassifizierung der Kornverteilungskurve eingeschätzt, ob der Boden frostempfindlich ist oder nicht. Diese erste Einschätzung wird auf der 2. Stufe verbessert, indem Bodeneigenschaften und hydraulische Eigenschaften berücksichtigt werden. Die Frostempfindlichkeit wird über Indexwerte der Bodeneigenschaften eingeschätzt. Die hierzu erforderlichen Laborversuche müssen durchgeführt werden, wenn die Kornverteilungskurven keine eindeutige Einschätzung der Frostempfindlichkeit ermöglichen.

Erst in einer 3. Stufe werden Frosthebungsversuche vorgeschlagen, die eine genaue Prognose über die tatsächlich zu erwartenden Frosthebungen erlauben, aber auch aufwändig und langwierig sind.

Diese 3-stufige Vorgehensweise zur Abschätzung der Frostempfindlichkeit ist in der ÖNORM B 4811 „Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau. Beurteilung der Frostsicherheit“ praktisch umgesetzt. Die Bestimmung der Frostempfindlichkeit erfolgt dreistufig, be-

ginnend mit schnellen, einfachen und preiswerten Verfahren hin zu aufwändigeren Methoden.

Die Prüfverfahren sind in der ÖNORM B 4810 enthalten. Im ersten Schritt wird das zu untersuchende Material mit  $d \leq 63$  mm mit modifizierter Proctor-dichte in die Proctorform eingebaut. Anschließend wird der Anteil  $\leq 0,063$  mm durch Nasssiebung und bei einer Parallelprobe der Anteil  $\leq 0,02$  mm durch Sedimentation mittels Aerometer-Methode bzw., falls diese nicht angewandt werden kann, ebenfalls mittels Nasssiebung bestimmt.

Falls der Anteil  $\leq 0,063$  mm  $\leq 4$  M.-% ist, wird das Material als frostunempfindlich eingestuft. Wenn der Anteil  $\leq 0,063$  mm  $> 4$  M.-% ist, muss der Anteil  $\leq 0,02$  mm näher betrachtet werden. Ist dieser Anteil  $\leq 3$  M.-%, wird das Material ebenfalls als frostunempfindlich eingestuft.

Im Bereich des Anteils  $\leq 0,02$  mm zwischen  $> 3$  M.-% und  $\leq 8$  M.-% wird der Anteil der aktiven Mineralien röntgendifraktometrisch bestimmt und durch eine prozentuale Bestimmung der aktiven Mineralien bzw. deren Gemische bewertet.

Bei einem Anteil  $\leq 0,02$  mm von  $> 8$  M.-% sind Frosthebungsuntersuchungen obligatorisch.

Die Schweizer Norm SN 670119-NA „Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Strassenbau. Ungebundene Gemische“ sieht für Gemische mit einem Feinanteil  $< 0,063$  mm von mehr als 3 M.-% eine Prüfung der „Frostbeständigkeit“ mittels Frosthebungsversuchs gemäß SN 670321a vor.

Die ZTV E-StB unterscheiden zwischen der Frostempfindlichkeit von Böden und veränderlich festen Gesteinen sowie nach einer Bodenbehandlung mit Bindemitteln und der Frostbeständigkeit von Fels.

Die Frostbeständigkeit von Fels wird nach TL Gestein-StB beurteilt. Die Widerstandsfähigkeit gegen Frost wird durch die Prüfung der Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 bestimmt. Wenn die so bestimmte Wasseraufnahme 0,5 M.-% überschreitet, erfolgt die Prüfung des Widerstandes gegen Frost-Tauwechsel nach DIN EN 1367-1. Durch die Bewertung der Versuche werden frostbeständige von nicht-frostbeständigen Gesteinskörnungen unterschieden.

Die Einteilung der Böden in Frostempfindlichkeitsklassen nach der Korngrößenverteilung und den plastischen Eigenschaften der Bodenarten erfolgt

entsprechend der Zuordnung zu den Bodengruppen gemäß DIN 18196. Die Böden werden in drei Frostempfindlichkeitsklassen untergliedert (Tabelle 3.2). Für gemischtkörnige Böden der Bodengruppen ST, GT, SU und GU ist ein Ungleichförmigkeitskriterium aufgenommen worden, wodurch diese Böden von der Frostempfindlichkeitsklasse F 2 in die Klasse F 1 wechseln können (Bild 3.1).

Falls sich hinsichtlich der Klassifikation der Frostempfindlichkeit Zweifel ergeben, können diese durch Frosthebungsversuche oder mineralogische Untersuchungen abgeklärt werden. Regelwerke für die Durchführung der Frosthebungsversuche und

	Frostempfindlichkeit	Bodengruppen (DIN 18196)
F 1	nicht frostempfindlich	GW, GI, GE SW, SI, SE
F 2	gering bis mittel frostempfindlich	TA OT, OH, OK ST <sup>1)</sup> , GT <sup>1)</sup> SU <sup>1)</sup> , GU <sup>1)</sup>
F 3	sehr frostempfindlich	TL, TM UL, UM, UA OU ST*, GT*, SU*, GU*

1) zu F 1 gehörig bei einem Anteil an Korn unter 0,063 mm von 5,0 M.-% bei  $C_U \geq 15,0$  oder 15,0 M.-% bei  $C_U \leq 6,0$ . Im Bereich  $6,0 < C_U < 15,0$  kann der für eine Zuordnung zu F 1 zulässige Anteil an Korn unter 0,063 mm linear interpoliert werden (siehe Bild 3.1)

Tab. 3.2: Frostempfindlichkeitsklassen nach ZTV E-StB

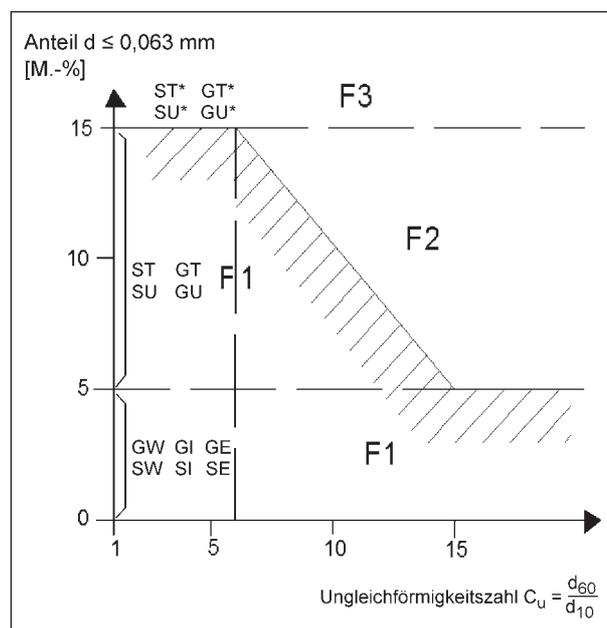


Bild 3.1: Frostempfindlichkeitsklassen gemäß ZTV E-StB

die Klassifizierung der Ergebnisse werden in den ZTV E-StB nicht angegeben.

Die Frostbeständigkeit von Böden und Baustoffen nach den TL BuB E-StB, die u. a. rezyklierte Baustoffe und industrielle Nebenprodukte umfassen, wird nach den TP Gestein-StB bestimmt, da verschiedene Bestandteile in diesen Baustoffgemischen durch Frost-Tauwechsel in kleinere Kornfraktionen zerfallen können. Die Frostempfindlichkeit dieser Baustoffgemische wird in Ermangelung genauerer Kenntnisse nach den Frostkriterien für Böden und veränderlich feste Gesteine, d. h. der Korngrößenverteilung und den plastischen Eigenschaften, beurteilt.

Bei mit Bindemittel behandelten fein- und gemischtkörnigen Böden gelten die Anforderungen der ZTV E-StB. Bei einer Bodenverfestigung mit hydraulischen Bindemitteln wird für den Nachweis der Frostunempfindlichkeit gefordert, dass die Hebung der Probe nach Frost-Tauwechsellagerung gemäß den TP BF-StB 11.1 im Verhältnis zur Ausgangshöhe der Probe kleiner oder gleich 1 ‰ ist.

Bei einer Bodenverfestigung mit Baukalken muss die Druckfestigkeit nach Frostbeanspruchung mindestens  $0,1 \text{ N/mm}^2$  betragen. Der Nachweis wird gemäß den TP BF-StB, Teil B 11.5 durchgeführt.

Bei einer qualifizierten Bodenverbesserung des Planums (Verringerung der Frostempfindlichkeitsklasse F3 zu F2) muss zum Nachweise der Frostunempfindlichkeit gemäß den TP BF-StB, Teil B 11.5 nachgewiesen werden, dass die einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen Lagerung  $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$  ist. Alternativ kann nachgewiesen werden, dass der CBR-Wert gemäß den TP BF-StB, Teil 7.1 nach 28 Tagen  $\geq 40 \%$  ist.

## 3.5 Frosthebungsversuche

### 3.5.1 Allgemeines

Der Begriff des Frosthebungsversuches hat sich für solche Versuche etabliert, bei denen eine Bodenprobe von oben befroren wird, während die Unterseite in einem temperierten Wasserbad ungefroren bleibt und ständig Wasser nachsaugen kann. Dadurch wird eine Nachbildung der in-situ-Verhältnisse unter Laborbedingungen erreicht. Die hydraulischen und thermischen Randbedingungen werden so festgelegt, dass eine Eislinsenbildung und damit eine Frosthebung der Probe möglich sind. Häufig

wird nach dem Auftauen der Probe die Tragfähigkeit durch die Bestimmung des  $\text{CBR}_F$ -Wertes bestimmt.

Zur Bestimmung der Frosthebung wurden zahlreiche Prüfgeräte entwickelt, die im zeitlichen Versuchsablauf und in den Randbedingungen stark voneinander abweichen. Eine Darstellung verschiedener seit dem Jahr 1939 entwickelter Frosthebungsversuche ist in WEINGART, WIELAND (2005) enthalten.

Die unterschiedliche Durchführung der Frosthebungsversuche und die Kriterien zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Böden stehen untereinander in einer Wechselbeziehung. Versuchsabhängige Unterschiede sind daher ein Grund für die unterschiedlichen Kriterien zur Bewertung der Kennwerte, mittels derer die Frostempfindlichkeit eines Bodens beurteilt werden soll. Weitere Gründe sind die unterschiedliche Beurteilung der Kennwerte und dadurch bedingt die unterschiedliche Festlegung der Grenzwerte für einzelne Frostklassen.

Von der ISSMFE wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Interpretation der Frosthebungsversuche hauptsächlich qualitativ ist. Da außerdem die einzelnen Versuchsgeräte in vielen Randbedingungen differieren, ist ein Vergleich der Versuchsergebnisse sehr schwierig.

### 3.5.2 Beschreibung der Frosthebungsversuche in D/A/CH

Nachfolgend werden die Frosthebungsversuche gemäß der Schweizer Norm SN 670321a, der österreichischen Norm B 4810 und dem Entwurf der deutschen technischen Prüfvorschrift TP BF-StB, Teil FHV vorgestellt und Gemeinsamkeiten und Unterschiede herausgestellt. Andere europäische Frosthebungsversuche werden nicht näher betrachtet, da ihre Versuchsparameter deutlich von denen der drei vorgenannten Versuche abweichen.

Der von WEINGART, WIELAND (2005) entwickelte Entwurf für eine Prüfvorschrift für den Frosthebungsversuch entspricht im Grundsatz der österreichischen Norm B 4810 bzw. der Schweizer Norm SN 670321a. In den Versuchsdetails weichen die einzelnen Vorgaben jedoch voneinander ab, wie der Gegenüberstellung der wichtigsten Randbedingungen (Tabelle 3.3) entnommen werden kann.

Bei allen drei Versuchsdurchführungen wird die Probe im Anschluss an eine 24-stündige Wasserla-

gerung gefroren. Eine Auflast von etwa 5 kN/m<sup>2</sup> simuliert die Belastung des Bodens durch eine ca. 20 cm mächtige Fahrbahndecke.

Der Versuch nach SN 670321a wird in einem geschlossenen System durchgeführt, was die Bestimmung des Wasserverbrauches in den einzelnen Versuchsphasen ermöglicht. Die beide anderen Versuche werden in einem offenen System durchgeführt. Die Probe steht in einem temperierten Wasserbad, von der Probenunterseite her kann während des gesamten Befrostungsvorganges unbegrenzt Wasser nachgesaugt werden.

Bei der Befrostung nach der SN 670321a wird die Probe über die Deckplatte mit einer Temperatur von -7,5 °C für 24 Stunden befroren.

In der ÖNORM B 4810 wird die Befrostung so gesteuert, dass sich nach einem Zeitraum von 96 Stunden die 0°C-Isotherme in Probenmitte einstellt. Diese Einstellung wird über 72 Stunden gehalten.

Der Entwurf der TP BF-StB, Teil FHV sieht zwei Befrostungsvarianten vor:

Bei Variante A wird die Befrostungstemperatur so geregelt, dass die 0°C-Isotherme nach vier Tagen eine Tiefe von 57,5 mm, d. h. die Probenmitte, erreicht. Bei Variante B wird der Probekörper 7 Tage mit einer konstanten Temperatur von -4 °C befroren.

Die Auftauphase dauert bei allen Versuchen 24 Stunden.

Bei allen drei Versuchen ist die maximale Hebung zu bestimmen. Die ÖNORM B 4810 und der Entwurf der TP BF-StB, Teil FHV sehen ferner die Bestimmung der Quellung in der Temperierungsphase, die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit und die Korngrößenverteilung nach der Versuchsdurchführung vor. Der CBR<sub>F</sub>-Wert wird gemäß ÖNORM B 4810 und SN 670321a bestimmt. Der Versuch nach Schweizer Norm sieht zusätzlich die Bestimmung des Hebungskoeffizienten (Quotient  $r/f$  der maximalen Hebung  $f$  während der Befrostung und der nach einem 24-stündigen Auftauen verbleibenden Resthebung  $r$ ), des Wasserverbrauches in den einzelnen Phasen und die Bestimmung von Wassergehalten in unterschiedlichen Bereichen der Probe vor. Die Wassergehaltsbestimmungen in verschiedenen Höhen der Probe sind auch im Entwurf der TP BF-StB, Teil FHV vorgesehen.

### 3.5.3 Bewertung der Frosthebungsversuche in A/CH

Die Beurteilung des Frosthebungsversuches erfolgt in Österreich nach der ÖNORM B 4811. Ein Boden wird als „frostsicher“ bewertet, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Hebungsrate (Hebung zwischen dem 7. und dem 8. Tag des Versuches), d. h. maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit < 1 mm,
- maximale Frosthebung < 15 mm,
- Abweichung der Einzelwerte der Parallelversuche vom Mittelwert < ±2 mm.

Der CBR<sub>F</sub>-Wert wird zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit nicht berücksichtigt.

In der Schweiz ist die Prüfung der „Frostbeständigkeit“ für Gemische mit einem Feinanteil > 3 M.-% erforderlich. Die Prüfung erfolgt mittels CBR<sub>F</sub>-Versuchs gemäß SN 670321a und mittels CBR-Versuchs gemäß SN 670320b.

Es werden die zwei folgenden Anforderungen an die Frostbeständigkeit gestellt:

- $CBR_2 / CBR_1 \geq 0,5$  und
- $CBR_F / CBR_1 \geq 0,5$  mit:

CBR<sub>1</sub>: CBR-Wert, der unmittelbar nach Verdichtung mit modifizierter Proctordichte ermittelt wird

CBR<sub>2</sub>: CBR-Wert, der nach Einbau der Probe mit modifizierter Proctordichte und 4-tägiger Wasserlagerung ermittelt wird

CBR<sub>F</sub>: CBR-Wert nach Befrostung

Absolute Grenzwerte für die CBR<sub>F</sub>-Werte existieren nicht.

In der revidierten Schweizer Norm SN 670321a wird auf eine Angabe der Frostempfindlichkeitsskala mit Hebungskoeffizienten verzichtet. In der Vorgängerversion, der SN 670321, waren indikative Größen für die Beurteilung der Hebungskoeffizienten angegeben, mittels derer die Frostempfindlichkeit abgeschätzt werden konnte. Diese Angaben ließen sich beim Einsatz in der Praxis aber nicht genügend genau verifizieren und wurden teilweise missbräuchlich interpretiert.

Einen Überblick über die Randbedingungen und Bewertungskriterien von Frosthebungsversuchen

	ÖNORM B 4810	SN 670321a	Entwurf TP BF – StB, Teil FHV	
Probenmaterial: max. Korngröße	< 22,4 mm	< 31,5 mm	< 22,4 mm	
Verdichtung des Probekörpers	einfache Proctordichte	modifizierte Proctordichte	einfache Proctordichte	
Aufbau des Prüfgerätes	5 Ringscheiben	konischer Zylinder aus Epoxidharz	5 Ringscheiben aus Teflon	
Abmessungen des Probekörpers	h = 150 mm d = 150 mm	h = 127 mm d = 152/158 mm	h = 125 mm d = 150 mm	
Auflast	5 kN/m <sup>2</sup>	4,82 kN/m <sup>2</sup>	5 kN/m <sup>2</sup>	
zeitlicher Versuchs- ablauf	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anpassung: 24 h</li> <li>Absenkung der T: 96 h</li> <li>Halten der 0°C-Isotherme: 72 h</li> <li>Auftauphase: 24 h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Anpassung: 24 h</li> <li>Befrostung: -7,5 °C für 24 h</li> <li>Auftauphase: 24 h</li> </ul>	<b>Variante A:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Anpassung: 24h</li> <li>Absenkung der T: 96 h;</li> <li>Halten der 0°C-Isotherme: 72 h</li> <li>Auftauphase: 24 h</li> </ul>	<b>Variante B:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Anpassung: 24h</li> <li>Befrostung: -4 °C für 7 Tage</li> <li>Auftauphase: 24 h</li> </ul>
Temperaturen	Wasserbad: + 4,0 °C ± 0,5 K; 0°C-Isotherme in Probenmitte	Wasserbad: - 1,5 °C; Deckplatte: - 7,5 °C	Wasserbad: + 1,5 °C ± 0,5 K; Variante A: 0°C-Isotherme in Probenmitte Variante B: Kühlkopf: - 4 °C	
Höhe des Wasserbades	10 – 20 mm über Probenunterkante	25 mm über Topfboden	10 ± 2,5 mm über Probenunterkante	
Zu bestimmende Parameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quellung in der Temperierungsphase</li> <li>maximale Hebung</li> <li>Hebungsrate (maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit)</li> <li>CBR<sub>F</sub>-Wert</li> <li>Korngrößenverteilung nach Versuchsdurchführung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>maximale Hebung</li> <li>Hebungskoeffizient</li> <li>Wasserverbrauch in den einzelnen Phasen</li> <li>Wassergehalte: <ul style="list-style-type: none"> <li>im Bereich der deutlichsten Frostlinsenebildung</li> <li>im nicht gefrorenen Boden</li> <li>in einer vertikalen Scheibe der Probe</li> <li>CBR<sub>F</sub>-Wert</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quellung in der Temperierungsphase</li> <li>maximale Hebung</li> <li>maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit</li> <li>Wassergehalte: <ul style="list-style-type: none"> <li>unter dem CBR-Stempel</li> <li>in Probenmitte</li> <li>an der Probenunterseite</li> </ul> </li> <li>Korngrößenverteilung nach Versuchsdurchführung</li> </ul>	
Bewertung der Frostempfindlichkeit	<ul style="list-style-type: none"> <li>maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit &lt; 1 mm</li> <li>maximale Frosthebung &lt; 15 mm</li> <li>Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert &lt; ± 2 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Koeffizient CBR<sub>F</sub>/CBR<sub>1</sub> ≥ 0,5 und</li> <li>Koeffizient CBR<sub>2</sub>/CBR<sub>1</sub> ≥ 0,5</li> </ul>	noch festzulegen	

Tab. 3.3: Vergleich der österreichischen und der Schweizer Norm mit dem Entwurf der deutschen TP BF-StB, Teil FHV

gemäß den österreichischen, den eidgenössischen und den deutschen Anforderungen enthält Tabelle 3.3.

## 4 Entwicklung und Erprobung des Frosthebungsgerätes

### 4.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der Frosthebungsuntersuchungen sind sehr stark von den Versuchsbedingungen abhängig. Um vergleichbare Prüfergebnisse zu erhalten, ist es daher sehr wichtig, die Rahmenbedingungen so genau wie möglich festzulegen.

Oberstes Ziel bei der Festlegung der Rahmenbedingungen war eine optimale Anpassung der Versuchsbedingungen an die ungünstigsten Verhältnisse in-situ.

Durch die Festlegung der Prüfgrößen werden die Bedingungen für die Herstellung der Versuchsausrüstung und die Gestaltung der Probekörper, einschließlich der Probenkennwerte, festgelegt.

Auf Grundlage dieser Geräteparameter wurden von der FH Dessau und der Firma Reinhardt Schulze Metallbau, Dessau, in langjähriger Entwicklungsarbeit Konstruktionspläne und die Verfahrensweise für ein Frosthebungstischgerät entwickelt. Der Prototyp wurde in der FH Dessau getestet und hatte sich in ersten Versuchen bewährt, bevor das neu entwickelte Frosthebungsgerät zuerst von der BAST und anschließend von der TU Bochum und der HTW Dresden beschafft wurde. Die übrigen Teilnehmer an den Vergleichsuntersuchungen setzten für ihre Versuche ihre bestehenden Geräte ein, die in den Kapiteln 5.2.2 bis 5.2.4 beschrieben werden.

Der nachfolgend beschriebene Versuchsablauf wurde auf Grund der von WEINGART; WIELAND (2003) beschriebenen Vorüberlegungen, die auf einer detaillierten Literaturstudie basieren, festgelegt. Dieser Prüfablauf entspricht in den wesentlichen Grundzügen der österreichischen Normung des Frosthebungsversuches (ÖNORM B 4810, Punkt 8).

## 4.2 Festlegung der Randbedingungen für den Versuchsablauf

### 4.2.1 Allgemeines

Für den Versuchsablauf mussten die nachfolgend aufgeführten Größen festgelegt werden:

- Wirkungsrichtung des Frostes,
- offenes oder geschlossenes System,
- Temperaturbedingung für die Befrostung und vertikaler Temperaturgradient,
- Temperaturbedingungen für den Tauprozess,
- Geschwindigkeiten für die Frosteindringung und den Auftauprozess,
- Versuchszeiten,
- Anzahl der Frost-Tau-Zyklen,

- Auflast,
- Tragfähigkeitsprüfung.

Zwischen einigen dieser Größen besteht wiederum ein direkter oder indirekter Zusammenhang.

Die Festlegung der Lage der 0°C-Isotherme, die Frosteindringgeschwindigkeit und der vertikale Temperaturgradient haben von den hier aufgeführten Randbedingungen die größten Auswirkungen auf den Versuchsablauf.

### 4.2.2 Wirkungsrichtung des Frostes

Der Frost wirkt auf Straßenkonstruktionen bzw. auf die Oberfläche des anstehenden Bodens in der Regel von oben ein. Ein seitliches Eindringen, z. B. bei Brücken, Böschungen oder Dämmen, stellt einen Sonderfall dar, der für die Durchführung des Standardfrosthebungsversuches nicht betrachtet wird.

Für die Versuchsdurchführung wurde daher eine eindimensionale Befrostung von oben gewählt. Diese Variante ist auch die Grundlage für den Wassernachschub im gewählten offenen System (Kapitel 4.2.3).

### 4.2.3 Wasserzufuhr

Für die Wasserzufuhr wurde ein offenes System mit unkontrollierter Wasserzufuhr gewählt. Dadurch kann über den gesamten Versuchszeitraum Wasser von unten in die Probe nachgesaugt werden. Durch die unkontrollierte Wasserzufuhr kann die hierfür verbrauchte Wassermenge nicht volumetrisch bestimmt werden, was für die vorliegende Aufgabenstellung jedoch auch nicht erforderlich ist.

### 4.2.4 Temperaturbedingung für die Befrostung und vertikaler Temperaturgradient

Als Befrostungsvariante wurde die Befrostungsvariante A des Entwurfs der TP BF-StB, Teil FHV gewählt. Sie entspricht prinzipiell der Frosthebungsprüfung nach ÖNORM B 4810, Punkt 8. Die Befrostung erfolgt mit geregelter Temperatur zur gezielten Beeinflussung der Frosteindringgeschwindigkeit. Die Frosteindringtiefe erreicht innerhalb von 4 Tagen die Probenmitte, d. h. eine Tiefe von 57,5 mm.

Die 0°C-Isotherme verbleibt anschließend für einen längeren Zeitraum konstant auf diesem Höheniveau. Durch die unveränderte Lage wird bei vorliegender Frostempfindlichkeit des Bodens die Eis-

linsenbildung begünstigt. Der Abstand zwischen Wasserspiegel und der 0°C-Isotherme ist während dieses Zeitraumes ebenfalls annähernd konstant. Die thermophysikalischen Eigenschaften des Probenmaterials sind für diesen Versuchsablauf nicht relevant.

Es sind eine ständige Kontrolle der Frosteindringgeschwindigkeit und eine entsprechende Nachregelung der Befrostungstemperatur erforderlich.

Der Temperaturgradient in der Probe wird wesentlich beeinflusst durch die Befrostungstemperatur auf der Probenoberfläche und die Temperatur des Wasserbades, die auf +1,5 °C festgelegt wurde. Der Temperaturgradient errechnet sich aus dieser Wasserbadtemperatur und der automatisch geregelten Befrostungstemperatur. Bei einer Befrostungstemperatur von -3 °C, die bei den praktischen Versuchen einen Durchschnittswert darstellt, ergibt sich eine Temperaturdifferenz von 4,5 K. Bei einer Probenhöhe von 125 mm entspricht dies einem Temperaturgradienten von 0,36 K/cm.

Die Forschungsarbeit von WEINGART; WIELAND (2003) umfasste die Berechnung von Temperaturgradienten basierend auf den Temperaturdaten des Deutschen Wetterdienstes, des Straßen-Wetter-Informationsdienstes sowie den Temperaturdaten eines Versuchsfeldes bei Dessau. Es wurden Temperaturgradienten von 0,24 bis 0,62 K/cm errechnet. Tiefer liegende Schichten zeigten kleinere Temperaturgradienten als näher an der Oberfläche befindliche Schichten. Somit ist der ermittelte Temperaturgradient von ca. 0,36 K/cm als repräsentativ und realistisch zu beurteilen.

#### 4.2.5 Temperaturbedingungen für den Tauprozess

Für den Versuch wurde eine Auftautemperatur von +10 °C, die von oben über den Kühlkopf auf die Probenoberfläche aufgebracht wird, gewählt.

Durch diesen Auftauprozess von oben soll eine möglichst ungünstige Situation derart simuliert werden, dass ein Tragfähigkeitsverlust in der wasserangereicherten oberen Schicht erreicht wird, ohne dass das Tauwasser die Möglichkeit hat, durch die noch gefrorenen unteren Schichten abzufließen. Ein unter diesen Bedingungen bestimmter  $CBR_F$ -Wert ist ein möglicher Parameter zur Charakterisierung der Frostempfindlichkeit des untersuchten Probenmaterials.

#### 4.2.6 Geschwindigkeiten für Frosteindringung und Auftauprozess

Die Frosteindringgeschwindigkeit [mm/d] hat einen großen Einfluss auf die Frosthebung. Generell verursacht ein langsam eindringender Frost bei einem frostempfindlichen Korngemisch größere Hebungen als eine höhere Frosteindringgeschwindigkeit.

Die Befrostung erfolgt mit einer veränderlichen Temperatur derart, dass die Frosteindringgeschwindigkeit über 96 Stunden ca. 14 mm/d beträgt. Nach diesem Zeitraum hat die 0°C-Isotherme die Tiefe von 57,5 mm erreicht und wird für weitere 72 Stunden in dieser Tiefe aufrechterhalten.

Für die Auftauphase wurde ein Zeitraum von 24 Stunden gewählt. Die Auftaugeschwindigkeit ist abhängig von den thermophysikalischen Eigenschaften des Probenmaterials.

Von HEITZER (1981) wurde festgestellt, dass die Auftaugeschwindigkeit bei hoher Eislinnenbildung bei ansonsten gleichen Bedingungen größer als bei geringer Eislinnenbildung ist. Vergleichsversuche ergaben bei Auftautemperaturen von +5 °C bis +10 °C eine günstige Tauzeit von ca. 24 Stunden. Bei den durchgeführten Frosthebungsversuchen war der Tauprozess generell nach circa 8 Stunden abgeschlossen, sodass der gewählte Zeitraum von 24 Stunden für die Auftauphase in jedem Fall ausreichend war.

#### 4.2.7 Versuchsdauer

Der Versuchsablauf kann in vier Phasen unterteilt werden:

- Temperierungsphase,
- Absenkphase
- Befrostungsphase,
- Tauphase.

Bei der Festlegung der Dauer der einzelnen Phasen muss auch die Wirtschaftlichkeit des Versuches betrachtet werden. Der ganze Frosthebungsversuch sollte nicht zu viel Zeit in Anspruch nehmen.

Für die Akklimatisierung der Probe in der Temperierungsphase wird ein Zeitraum von 24 Stunden angesetzt. In diesem Zeitraum stellt sich durch die Einstellung der Temperatur in der Prüfkammer, dem

Kühlkopf und dem Wasserbad auf  $+1,5\text{ °C} \pm 0,5\text{ K}$  über die gesamte Probe eine einheitliche Temperatur ein. Außerdem können sich die Wasserverhältnisse in der Probe neu stabilisieren. Falls in diesem Zeitraum Quellvorgänge stattfinden, müssen die hierdurch hervorgerufenen Hebungen von der späteren Frosthebung subtrahiert werden.

Dieser Zeitraum entspricht dem in der ÖNORM B 4810, Teil 8 vorgesehenen Zeitraum. Untersuchungen von HEITZER (1981) ergaben keine verstärkte Eislinnenbildung bei einer 4-tägigen Wasserlagerung, sodass die 24-stündige Lagerung als ausreichend zu betrachten ist.

Die Befrostung umfasst die Absenkphase mit Absenkung der  $0\text{°C}$ -Isotherme in Probenmitte (96 h) und der Befrostungsphase, während der die  $0\text{°C}$ -Isotherme in dieser Tiefe für weitere 72 h aufrechterhalten wird (Kapitel 4.2.6). Die gesamte Befrostung nimmt einen Zeitraum von 7 Tagen in Anspruch. Die Tauphase dauert 24 h.

Damit dauert ein Frosthebungsversuch insgesamt 9 Tage. Die erforderlichen Vorarbeiten und Nachuntersuchungen sind hierin nicht enthalten.

#### 4.2.8 Anzahl der Frost-Tau-Zyklen

Der Versuch wird mit einem Frost-Tau-Zyklus durchgeführt. Dies entspricht der Versuchsdurchführung der meisten genormten Frosthebungsversuche.

Aus der Literatur ist bekannt, dass mehrere Frost-Tau-Zyklen die Frosthebung verändern. Der Einfluss ist vor allen Dingen bei veränderlich festen Gesteinen festzustellen. Durch die Festlegung gleicher Versuchsbedingungen ist jedoch ein aussagekräftiger Vergleich der Ergebnisse zu erwarten.

#### 4.2.9 Auflast

Der Frosthebungsversuch wird mit einer Auflast von  $0,5\text{ N/cm}^2$  durchgeführt. Diese Auflast wird durch die Gesamtmasse von 9 kg von Edelstahlplatte, Isolierplatte und Kühlkopf gebildet.

Diese Auflast simuliert die Belastung des zu untersuchenden Materials durch eine ca. 20 cm dicke Tragschicht oder Betondecke. Dadurch wird die Frosthebung verringert und eine Konsolidierung des Probenmaterials während der Tauphase bewirkt.

#### 4.2.10 Tragfähigkeitsprüfung

Zur Prüfung der Tragfähigkeit wird unmittelbar nach der Auftauphase ein CBR-Versuch an der untersuchten Probe durchgeführt. Der so bestimmte  $\text{CBR}_F$ -Wert (Tragindex) wird mit dem Ergebnis eines CBR-Versuches, der an einer unbefrostenen Referenzprobe durchgeführt wurde ( $\text{CBR}_0$ -Wert), verglichen.

Der CBR-Versuch wird in Anlehnung an TP BF-StB, Teil B 7.1 bzw. DIN EN 13286-47:2004 durchgeführt.

Durch diese Kombination des Frosthebungsversuches mit dem CBR-Versuch ist eine Abstimmung der Versuchsapparaturen und der Versuchsdurchführung erforderlich. Durch die CBR-Vorschrift ergeben sich Geometrie und Größe des Probenkörpers (Zylinder mit  $h = 125\text{ mm}$  und  $d = 150\text{ mm}$ ) und eine maximale Korngröße von 22,4 mm. Weiterhin ist der CBR-Versuch auf der bei der Verdichtung unten liegenden Seite der Probe durchzuführen, wozu die Probe gedreht werden muss.

Beim CBR-Versuch sind die Randbedingungen für die Wasserlagerung zur Ermittlung des Schwellwertes genau festgelegt. Hierzu wird die Probe bei freiem Zutritt des Wassers zur Ober- und Unterseite des Probekörpers 96 Stunden bei konstanter Wasserhöhe und einer Wassertemperatur von  $20\text{ °C} \pm 2\text{ K}$  gelagert. Diese Anforderungen der DIN EN 13286-47:2004 werden beim Frosthebungsversuch nicht übernommen. Er stellt somit eine spezielle Form der CBR-Prüfung dar.

### 4.3 Festlegung der Probenkennwerte

#### 4.3.1 Allgemeines

Die Festlegung der Probenkennwerte erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM B 4810. Zu den einzelnen Aspekten existieren teilweise umfangreiche Untersuchungen von STRASSER (2001) und BRANDL (1977).

#### 4.3.2 Probengröße

Die Probenabmessung entspricht der Abmessung zur Durchführung des CBR-Versuches gemäß DIN EN 13286-47. Hierzu ist die Proctorform B gemäß DIN EN 13286-2 für ungebundene und gebundene Tragschichten mit einer Höhe von 125 mm und einem Durchmesser von 150 mm einzusetzen.

### 4.3.3 Größtkorn

Die Abmessung der Probengröße (Proctorform B) zur Durchführung des CBR-Versuches bedingt die Begrenzung des zulässigen Größtkorns auf 22,4 mm.

Die Kornfraktion  $\geq 22,4$  mm kann bei Korngemischen für Schichten ohne Bindemittel einen erheblichen prozentualen Anteil (für Körnungen größer 0/45 mm mehr als 53 %) annehmen. Untersuchungen von STRASSER et al. (2001) ergaben jedoch, dass eine Erhöhung des Größtkorns keinen signifikanten Einfluss auf die Größe der Frosthebungen im Vergleich zum Standardversuch (Größtkorn gemäß ÖNORM B 4810  $\leq 31,5$  mm) hat. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Beschränkung des Frosthebungsversuches auf die Kornfraktion  $< 22,4$  mm eine qualitative Abschätzung der Frostempfindlichkeit erlaubt, durch die die Frostempfindlichkeit auf Grund des erhöhten Feinkornanteils eventuell zu hoch, d. h. auf der sicheren Seite liegend, eingeschätzt wird.

### 4.3.4 Einbaudichte, Einbauwassergehalt und Verdichtungsmethode

Die Einbaudichte der Probe ist von den Einbaubedingungen, d. h. vom Einbauwassergehalt und von der aufgebrachtten Verdichtungsenergie durch die gewählte Verdichtungsmethode, abhängig. Durch den Einbauwassergehalt und die Verdichtungsenergie sind wiederum die Größe der Frosthebung und die Tragfähigkeit nach Befrostung und Tauperiode abhängig. Diese Zusammenhänge sind von BRANDL (1977) dargelegt worden.

Der Einbau der Proben bei den Vergleichsuntersuchungen erfolgt mit Standard-Proctorverdichtung nach DIN EN 13286-2 mit der Standard-Proctorenergie von insgesamt ca.  $0,60 \text{ MJ/m}^3$  in drei Lagen. Auf den beiden unteren Lagen sind die jeweils 22 Schläge auszuführen, auf der oberen Lage sind so viele Schläge auszuführen, dass die 3. Teilprobe mit dem oberen Rand des Prüfzylinders abschließt.

*Anmerkung:*

*Gemäß der ÖNORM B 4810 sind zum Erreichen der geforderten Standard-Proctorenergie auf den drei Einbaulagen jeweils 27 Schläge auszuführen, da diese Prüfformen eine Höhe von 150 mm haben.*

I. d. R. entspricht der Einbauwassergehalt dem optimalen Wassergehalt, der mittels Proctorversuchs nach DIN EN 13286-2 ermittelt wird. Weiterhin ist die Masse der mit optimalem Wassergehalt einzubauenden Probe zu ermitteln. Die Masse jeder der drei Einbaulagen entspricht jeweils  $1/3$  der gesamten Feuchtmasse.

Falls Wasser schon beim optimalen Wassergehalt austritt, kann dieser geringfügig reduziert werden.

Nach Einbau des Materials wird die Probe um  $180^\circ$  gedreht. Durch die hier vorhandene glatte Probenoberfläche wird ein optimaler Kontakt des Kühlkopfes mit dem zu untersuchenden Material erreicht.

### 4.3.5 Wassergehalt der Probe

Der Einbauwassergehalt ist auf Grund der gravimetrischen Verteilung des Wassers über die Probenhöhe nicht konstant. Bestimmbar ist jedoch nur der mittlere Einbauwassergehalt zum Zeitpunkt des Einbaus der Probe in das Frosthebungsgerät.

Der mittlere Einbauwassergehalt der Probe gilt daher als Ausgangswassergehalt für den Frosthebungsversuch. Die nachgesaugte Wassermenge in der Temperierungsphase bleibt unberücksichtigt, da sie im offenen System nicht messbar ist.

### 4.3.6 Aufbereitung des Probenmaterials

HEITZER (1981) stellte fest, dass die Böden für die Durchführung der Frosthebungsversuche einen natürlichen Zustand aufweisen sollten. Chemisch aktive Mineralien sind ionisiert und von adsorptiv gebundenem Wasser umgeben. Diese Bestandteile bestimmen das Frostverhalten des Bodens mit und sie verändern ihr Verhalten, wenn ihnen das Wasser entzogen wird. Da bei der Trocknung der Böden auch das adsorptiv gebundene Wasser ausgetrieben wird, könnten sich bei der Wiederbefeuchtung u. U. die Ionenbelegung und der Hydratisierungsgrad der Minerale gegenüber dem Naturzustand wesentlich ändern. Getrocknete oder luftgetrocknete Böden, die anschließend wieder befeuchtet werden, sind daher nach HEITZER (1981) für Frostversuche nicht geeignet.

Für die Durchführung des Frosthebungsversuches sollten die Bodenproben daher mit dem natürlichen Wassergehalt verwendet werden.

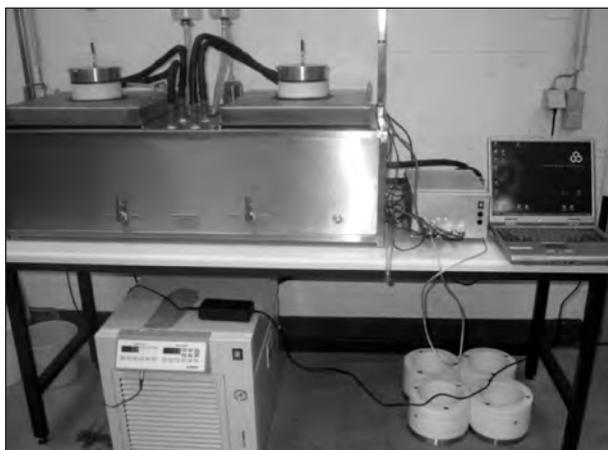
Abweichend von dieser Forderung ist bei feinkörnigen Böden eventuell eine Aufbereitung erforderlich. Um eine gleichmäßigen Wasserverteilung und, falls erforderlich, eine gleichmäßige Kalkverteilung zu erzielen, muss die Probe in diesem Fall bei niedriger Temperatur getrocknet ( $60\text{ °C}$ ) und in Krümel  $< 2\text{ mm}$  zerkleinert werden. Anschließend wird die erforderliche Wasser- und ggf. Kalkmenge untergemischt und die so aufbereitete Probe für 24 h gelagert, wodurch eine homogene Wasser- und Kalkverteilung erzielt wird. Da die Probenvorbereitung stets gleich ist, kann von einer Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Frosthebungsversuche ausgegangen werden. Für die Versuchsbewertung ist die Feststellung von HEITZER (1981) dagegen zu berücksichtigen.

#### 4.4 Neu entwickeltes Frosthebungsgerät

Auf der Grundlage der unter 4.3 beschriebenen Randbedingungen wurde von der Firma Reinhardt Schulze Metallbau, Dessau, zusammen mit der Hochschule Anhalt (FH) die nachfolgend beschriebene Versuchseinrichtung entwickelt (Bilder 4.1 bis 4.4).

Der Frosthebungsversuch wird in einem offenen System durchgeführt. Die Lagerung der Probezylinder im Wasserbad ermöglicht eine unbegrenzte Wasseraufnahme bzw. -abgabe.

Die Prüf- oder Großklimakammer ist in zwei separate Bereiche unterteilt, von denen jeder einen Prüfzylinder aufnehmen kann. In dieser Klimakammer wird eine konstante Temperatur von  $+1,5\text{ °C} \pm 0,5\text{ K}$  eingestellt.



**Bild 4.1:** Versuchseinrichtung mit Klimakammer für zwei Prüfzylinder

In jedem separaten Bereich der Prüfklimakammer wird der Wasserpegel mit isolierten Zu- und Ablaufschläuchen auf  $10\text{ mm} \pm 2,5\text{ mm}$  über der Unterkante des Prüfkörpers eingestellt. Der konstante Wasserstand wird durch einen Überlauf gewährleistet. Die Temperatur des Wassers wird indirekt über ein Kühlsystem auf konstant  $+1,5\text{ °C} \pm 0,5\text{ K}$  gehalten. Die Temperaturmessung erfolgt direkt im Wasserbad. Für das Wasserbad wird entmineralisiertes Wasser verwendet.



**Bild 4.2:** Kühlkopf mit integrierter Isolierplatte



**Bild 4.3:** Edelstahlplatte des Kühlkopfes



**Bild 4.4:** Prüfzylinder, gelochte Grundplatte und Einbauhilfe

Die Prüfzylinder bestehen aus 5 einzelnen Ringscheiben aus Teflon mit einem Innendurchmesser  $d_i = 150 \text{ mm}$  und einer Zylinderhöhe  $h = 25 \text{ mm}$ . Sie sind genutet und können mit der gelochten Grundplatte lösbar verbunden werden (Bild 4.4).

Dadurch entsteht eine Multiringzelle, deren Abmessungen der des Proctortopfes Form B entsprechen. Das Teflon-Material und die Aufteilung der Multiringzelle in einzelnen Ringscheiben ermöglichen eine weitgehend reibungsfreie Hebung der Probe während der Befrostung. Durch die Materialwahl wird außerdem die Wärmeleitung möglichst gering gehalten.

Im mittleren Ring befindet sich eine Öffnung zur Aufnahme eines Temperaturfühlers, mit dem die Temperatur in der Probenmitte bestimmt wird. Der Temperaturfühler ist für einen Temperaturbereich von  $-5 \text{ °C}$  bis  $+15 \text{ °C}$  mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,15 \text{ K}$  ausgelegt.

Die Prüfkörper werden auf einer gelochten Grundplatte, die eine Wasseraufnahme von der Probenunterseite ermöglicht, in die Prüfkammer eingebracht. Die Durchlässigkeit der Grundplatte beträgt  $\geq 10^{-2} \text{ m/s}$ . Um den Austrag von Feinkorn zu verhindern, wird auf die Grundplatte ein Filterpapier gelegt.

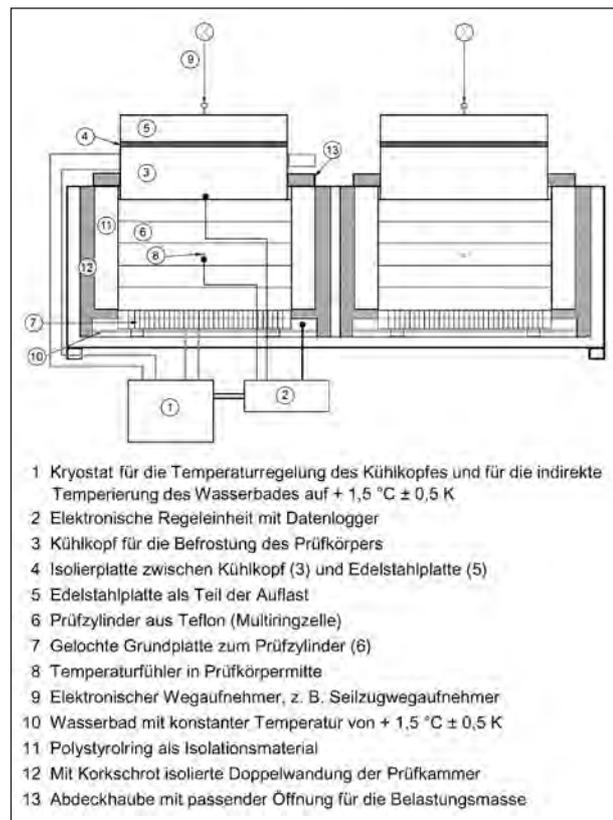
Ein Polystyrolring mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda \leq 0,15 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  isoliert die Probe.

Das Befrosten des Prüfkörpers erfolgt über einen Kühlkopf aus Kupfer ( $\varnothing 147 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ), der auf die Oberseite der Probe aufgelegt wird. Die Temperaturmessung erfolgt direkt am Kühlkopf. Über eine Belastungsmasse, bestehend aus Kühlkopf, Isolierplatte (Styrodur,  $30 \text{ mm}$  dick,  $\lambda = 0,035 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) und Edelstahlplatte mit einer Gesamtmasse von  $9 \text{ kg}$ , wird eine Auflast von  $0,5 \text{ N/cm}^2$ , bezogen auf den Innendurchmesser des Prüfzylinders von  $150 \text{ mm}$ , aufgebracht.

Die sich bei Quellung und Befrostung einstellenden Hebungen werden über einen elektronischen Wegaufnehmer mit einer Messgenauigkeit von mindestens  $\pm 0,01 \text{ mm}$  (Seilzugwegaufnehmer), zum Gebrauch bei Frostbedingungen, gemessen.

Die Versuchseinrichtung ist in Bild 4.5 schematisch dargestellt.

Die gesamten während der Versuchsdurchführung in Intervallen von  $5 \text{ Minuten}$  gewonnenen Mess-



**Bild 4.5:** Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung für den Frosthebungsversuch

werte werden in einem Datenlogger automatisch erfasst und gespeichert.

Eine gerätespezifische Software stellt die Versuchswerte grafisch dar (Bild 4.6). Auf der Abzisse ist der zeitliche Ablauf des Frosthebungsversuches über den erforderlichen Zeitraum von  $9 \text{ Tagen}$  aufgetragen. Auf den beiden Ordinaten werden die Temperatur in  $^{\circ}\text{C}$  und die ermittelten Frosthebungen in  $\text{mm}$  dargestellt. Aufgetragen werden die folgenden Messkurven, die zur besseren Unterscheidung farblich unterschiedlich dargestellt werden:

- die Wasserbadtemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- die Probenmittentemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- die Kühlkopftemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ],
- die Hebung an der belasteten Probenoberfläche [ $\text{mm}$ ], die auf der Oberseite des Kühlkopfes gemessen wird.

Zur Ergänzung ist die theoretisch anzustrebende Solltemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ] in Probenmitte dargestellt. Senkrechte Unterteilungen visualisieren die einzelnen Phasen des Versuchsablaufes:

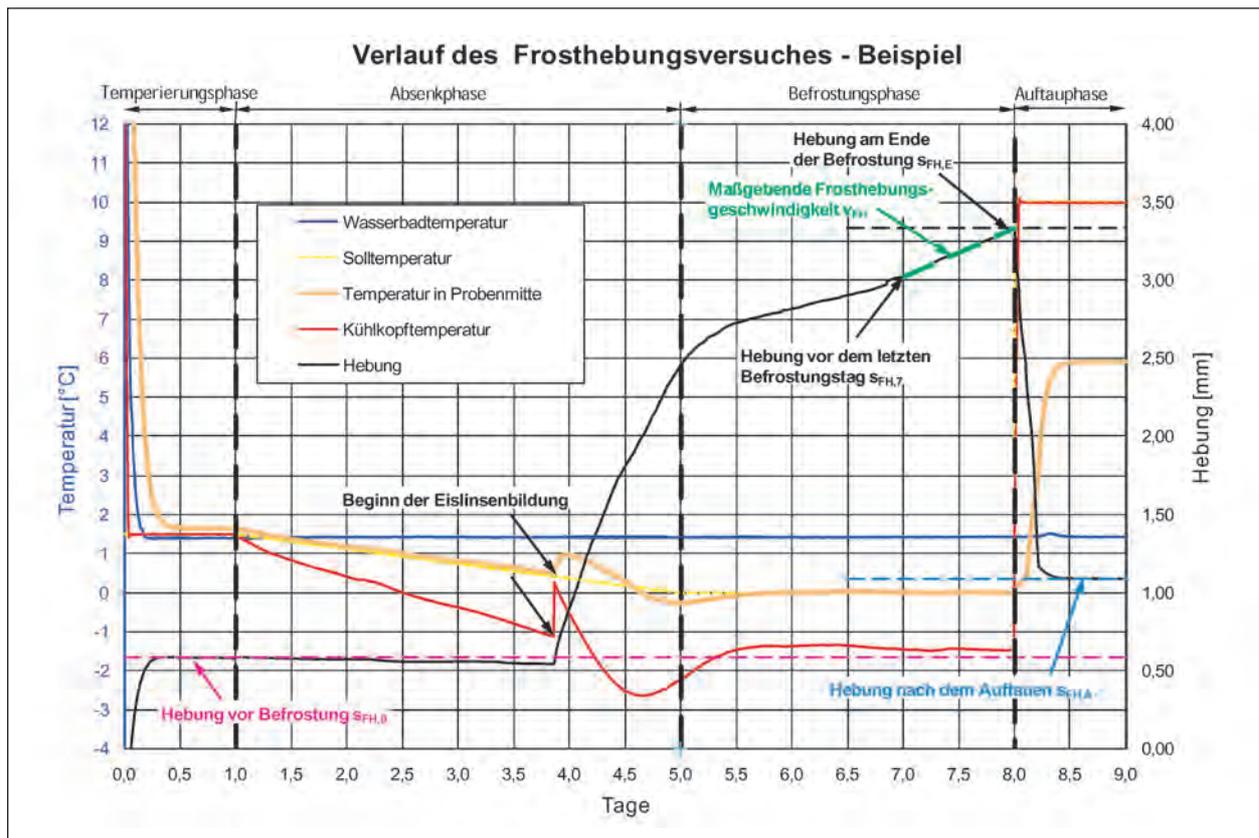


Bild 4.6: Grafische Darstellung des Versuchsablaufes

- Tag 0 bis 1: Temperierungsphase. Die Temperatur der Umluft in der Prüfkammer, der Kühlkopf und das Wasserbad werden auf  $+ 1,5 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$  temperiert.
- Tag 1 bis 5: Absenkphase. Die Temperatur wird so geregelt, dass die  $0 \text{ °C}$ -Isotherme am 5. Tag eine Tiefe von  $57,5 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$  (Probenmitte) erreicht
- Tag 5 bis 8: Befrostungsphase. Die  $0 \text{ °C}$ -Isotherme wird für drei Tage in einer Tiefe von  $57,5 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$  (Probenmitte) gehalten.
- Tag 8 bis 9: Auftauphase. Die Temperatur des Kühlkopfes beträgt  $+ 10 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$ .

Der Darstellung des Temperaturverlaufes in Probenmitte kann der Zeitpunkt der Eislinsenbildung entnommen werden. Durch diesen Prozess wird Wärme freigesetzt, was eine Nachregulierung der Kühlkopftemperatur zur Folge hat. Bei beiden Temperaturverläufen ist dieser Zeitpunkt durch einen Ausschlag nach oben zu erkennen, im vorliegenden Beispiel nach etwa 3,8 Tagen.

## 5 Beschreibung des Ringversuches

### 5.1 Allgemeines

Da die Versuche anonymisiert ausgewertet werden, werden die Frosthebungsgeräte der Versuchsteilnehmer ebenfalls ohne Angabe der Namen beschrieben. Die Versuchsteilnehmer (T) werden mit Großbuchstaben (A, B, C ...) beschrieben.

### 5.2 Beschreibung der Frosthebungsgeräte der Versuchsteilnehmer

#### 5.2.1 Versuchsteilnehmer TA, TB, TC, TD

Von diesen vier Ringversuchsteilnehmern wurde das neu entwickelte und in Kapitel 4.4 beschriebene Frosthebungsgerät verwendet.

#### 5.2.2 Versuchsteilnehmer TE

Vom Versuchsteilnehmer TE wurden die Frosthebungsversuche in einem 2-Kammer-Klimaschrank durchgeführt (Bild 5.1 und 5.2).

Die Bodenproben werden in ein Wasserbad gestellt, damit sie während der Versuchsdauer über einen Filterstein Wasser aufnehmen oder abgeben können. Das Wasserbad ist mit einem Vorratsbehälter an der Außenseite des Klimaschranks verbunden. Seitlich wird der obere Teil der Versuchszylinder oberhalb des Wasserbades mit einer Wärmedämmung versehen, sodass zwei thermisch getrennte Kammern entstehen. In der Regel wird die obere Kammer auf die gewünschte Gefriertemperatur eingestellt und die Temperatur des Wasserbades wird konstant gehalten. Frost kann somit nur eindimensional von oben auf die Proben wirken.

Die Zuluft der oberen Kammer kann zwischen  $-40\text{ °C}$  und  $+180\text{ °C}$  temperiert werden und wird über zwei Ventilatoren durch die Rückwand des Prüfraumes eingeblasen. Das zweite Kühlaggregat für die Temperierung des Wasserbades arbeitet im Temperaturbereich von  $-30\text{ °C}$  bis  $+30\text{ °C}$ . Die konditionierte Zuluft der unteren Kammer, d. h. unterhalb der eingebauten Wasserwanne, wird durch

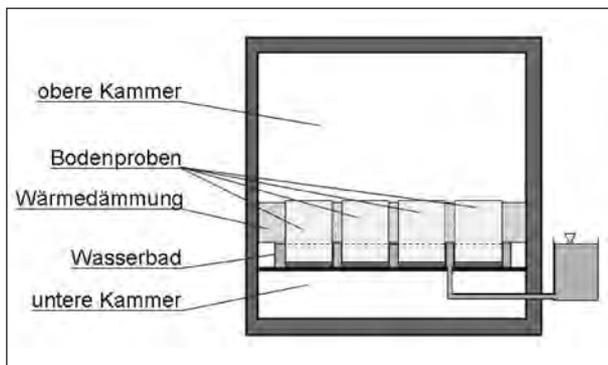


Bild 5.1: Prinzipskizze des Klimaschranks, Versuchsteilnehmer TE



Bild 5.2: Foto des geöffneten Klimaschranks, Versuchsteilnehmer TE

zwei Öffnungen im Boden des Prüfraums eingeblasen. Ein beweglich angeordneter Wärmefühler im Inneren der Wanne ermöglicht die Steuerung der Wassertemperatur durch entsprechende Regelung der Zuluft des zweiten Kühlaggregates auf der Wannenseite.

Der Frosthebungsverlauf wird kontinuierlich mit Wegaufnehmern auf der Probenoberseite gemessen und aufgezeichnet.

Zur Minimierung der Wandreibung während der Frosthebung werden Proben in Form leicht konischer Stahl-„Zylinder“ mit einer Höhe von 125 mm, einem Durchmesser der Oberseite von 150 mm und einem Durchmesser der Unterseite von 145 mm verwendet.

In der Versuchseinrichtung können jeweils 4 Probekörper gleichzeitig untersucht werden.

### 5.2.3 Versuchsteilnehmer TF

Das Prüfgerät des Versuchsteilnehmers TF (Bild 5.3) entspricht den Vorgaben der österreichischen Prüfvorschrift RVS 11.062. Es besteht aus einer isolierten Wanne mit einer Breite von 100 cm und einer Höhe von 43 cm für die Befrostung von zwei Prüfkörpern. Die Prüfkörperformen werden durch fünf Ringe mit einem Innendurchmesser von 150 mm gebildet, die zusammengesetzt 150 mm hoch sind.

Die Proben werden von oben mittels eines Kühlkopfes beaufschlagt und mit einer Last von insgesamt 9 kg, entsprechend einer Auflast von  $0,5\text{ N/cm}^2$ , versehen. Sie werden seitlich gegeneinander und gegen die Außenwand bis zur Prüfkörperoberkante mit Korkschröt abgedichtet.

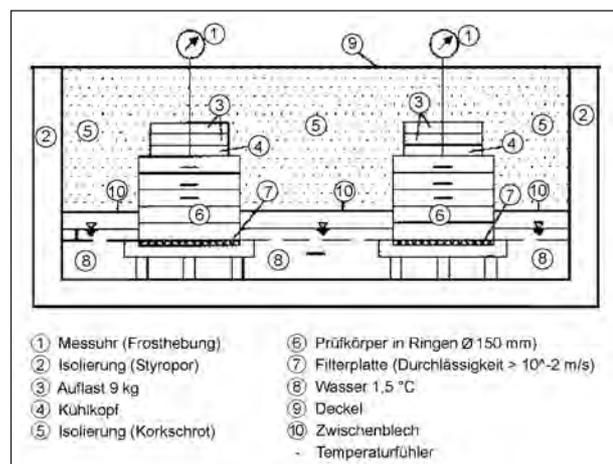


Bild 5.3: Frostprüfgerät des Versuchsteilnehmers TF

Die Temperaturmessfühler werden ( $4 \pm 0,5$ ) cm vom Prüfkörper rand eingebaut, und zwar 1,5 cm bis 3 cm unterhalb der Oberfläche, in halber Höhe des Prüfkörpers und dazwischen. Zwei weitere Messfühler werden zur Prüfung der Wassertemperatur an die Prüfkörperunterseite sowie an die Filterplatte gelegt.

Die Probenkörper werden auf eine Filterplatte mit einer Durchlässigkeit von  $> 10^{-2}$  m/s in ein Wasserbad (Temperatur + 1,5 °C) eingebaut, dessen Wasserhöhe 10 mm bis 20 mm über der Prüfkörperunterkante eingestellt wird.

Die Frosthebung wird an einer Messuhr in unterschiedlichen zeitlichen Abständen von max. 24 Stunden abgelesen. Der 10 Tage dauernde Frosthebungsversuch erfordert also auch am Wochenende manuelle Ablesungen. Die Auflösung des Versuchsdiagrammes ist daher geringer als beim neu entwickelten Frosthebungsgerät und der Zeitpunkt, an dem die 0°C-Isotherme in Probenmitte erreicht wird, kann nicht exakt bestimmt werden.

#### 5.2.4 Versuchsteilnehmer TG

Der Frosthebungsstand des Versuchsteilnehmers TG besteht aus drei Parallelständen (Bild 5.4). Das Wasser wird aus einem temperierten Becken in die Edelstahlwannen der einzelnen Prüfstände gepumpt und kann frei abfließen.

Die Prüfkörper werden durch Einbau des zu untersuchenden Bodens in sieben Teflonscheiben, die zusammengesetzt eine Probenform mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 133 mm ergeben, erzeugt. Sie werden vom Wasserspiegel aufwärts bis zur Probenkörperoberkante mit Polystyrol gedämmt. Die Kältezufuhr erfolgt von



Bild 5.4: Versuchsstand des Versuchsteilnehmers TG

oben durch einen Kühlkopf, der gleichzeitig als Auflast dient. Sein Gewicht beträgt 9 kg, was einer Auflast von 0,5 N/cm<sup>2</sup> entspricht.

Die Kühlköpfe werden paarweise von einem Kryostaten bedient, dessen Temperatur händisch, i. d. R. zweimal täglich, geregelt wird. Als Kältemedium dient Glykol. Die Hebung wird auf jedem Kühlkopf, der mit Korkgranulat isoliert wird, mit einem Weg-aufnehmer gemessen. Die Temperatur wird an vier Stellen im Prüfkörper sowie an der Prüfkörperunterseite mittels Thermodrähten gemessen. Die Daten der Temperaturmessungen sowie der Hebungsmessungen werden automatisch erfasst und digital gespeichert.

### 5.3 Weitere auf dem deutschen Markt befindliche Prüfgeräte

Von der Firma Schleibinger Geräte, Teubert und Greim GmbH, ist die „Schleibinger Bodenfrostzelle“ entwickelt worden, mit der die Bestimmung des CBR<sub>F</sub>-Wertes gemäß der SN 670 321a durchgeführt wird. Dieses Gerät wurde von keinem der Ringversuchsteilnehmer eingesetzt, wird jedoch vollständigheitshalber vorgestellt (Bild 5.5).

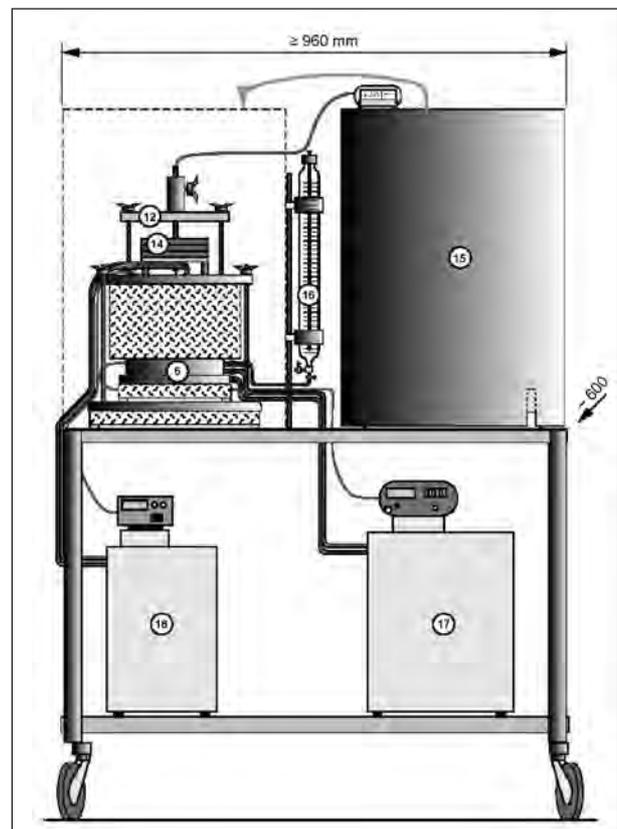


Bild 5.5: Schleibinger Bodenfrostzelle

Die Frosthebungen werden während der 24-stündigen Befrostung kontinuierlich mit einer Genauigkeit von besser als 3 µm aufgezeichnet. Die Kühlaggregate besitzen eine Kälteleistung von 0,13 kW, eine Heizleistung von 1,8 kW (Temperaturbereich -10 °C bis +100 °C) bei einer Temperaturkonstanz von 0,02 K.

Der dazugehörige Datenlogger erlaubt die Erfassung der Messdaten von bis zu acht Längentastern und zwei Temperatursensoren. Die Einbindung der Elektronik ins Netzwerk erlaubt den ständigen Zugriff auf die Messdaten, die bis zu vier Wochen in einem internen Speicher aufgezeichnet werden.

## 5.4 Beschreibung der untersuchten Böden und Baustoffgemische

### 5.4.1 Bodenmechanische Eigenschaften

Die Prüfmateriale wurden seitens der BAST beschafft, deren Kenndaten ermittelt und damit die Einbaubedingungen festgelegt.

Es wurden insgesamt acht Materialien unterschiedlicher Spezifikationen ausgewählt, mit denen die Bandbreite der im Straßenbau eingesetzten Trag-schichtmaterialien erfasst sowie ergänzend unterschiedliche frostempfindliche Böden einbezogen werden.

Folgende Ausgangsmaterialien wurden ausgewählt (kursiv: nachfolgend verwendete Abkürzungen):

- a) Schottertragschichtmaterial (Quarzit) 0/32 mm („*Quarzit*“),
- b) Frostschutzmaterial (Basalt) 0/32 mm („*Basalt*“),
- c) Frostschutzmaterial (Lavaschlacke) 0/32 mm („*Lavaschlacke*“),
- d) RC-Beton 0/45 mm\*) („*RC-Beton mit Ziegel*“),
- e) Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm\*) („*BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel*“),
- f) Elektroofenschlacke 0/32 mm („*EOS*“),
- g) Grobkörniger Boden („*SE-Boden*“),
- h) F3-Boden (Lößlehm) („*F3-Boden*“),
- i) RC-Ziegelmaterial 0/45 mm (nur als Beimischung verwendet).

Die mit \*) gekennzeichneten Materialien wurden ausgewählt, um sie kornguppenweise mit jeweils 30 M.-% RC-Ziegelmaterial (Material i) zu mischen.

Da das Größtkorn für die Frosthebungsversuche sowie für den anschließenden CBR-Versuch auf 22,4 mm begrenzt ist, wurde an allen Materialien das Grobkorn > 22,4 mm abgesiebt. Danach wurden die Materialien sorgfältig gemischt und im Großdrehteiler geteilt.

Anschließend wurden bei jedem Material die folgenden Untersuchungen durchgeführt:

- Korngrößenverteilung gemäß DIN EN 933-1 und DIN 18123,
- Bestimmung der Korndichte gemäß DIN 18124,
- Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen gemäß DIN EN 1097-6,
- Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit gemäß DIN 18130 Teil –ZY-MS-MZ-Abschnitt 7,
- Proctordichte gemäß DIN 18127 (150X),
- CBR-Versuch gemäß TP BF-StB, Teil B 7,
- Bestimmung der Kennwerte des F3-Bodens:
  - Fließ- und Ausrollgrenze gem. DIN 18122-1,
  - Glühverlust gemäß DIN 18128,
- Bodenverbesserung mit Kalkhydrat gemäß TP BF-StB Teil B 11.5.

Es wurden jeweils zwei Kornverteilungskurven von jedem Material durchgeführt. Ihre Auswertung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Einzelkurven, die vermutlich auf die gute Probenteilung und die sorgfältige Versuchsdurchführung zurückzuführen ist.

Im Prüfbericht (Anlage 1) sind die Ergebnisse aller Versuche ausführlich und in Tabelle 5.1 zusammengefasst dargestellt.

### 5.4.2 Frostempfindlichkeit

Die Bewertung der Frostempfindlichkeit nach dem Feinkornanteil  $\leq 0,063$  mm gemäß ZTV E-StB erfolgt sowohl für natürliche Böden als auch für rezyklierte Baustoffe und industrielle Nebenprodukte, für die z. Zt. noch kein anderes Kriterium existiert.

In Bild 5.6 ist die grafische Zuordnung zu den Frostempfindlichkeitsklassen F1 bis F3 über die beiden maßgeblichen Kriterien „Ungleichförmigkeitszahl“ und „Anteil  $\leq 0,063$  mm“ gemäß ZTV E-StB dargestellt.

Bezeichnung lang	Kurzbezeichnung	Korndichte (DIN 18124)				Rohdichte und Wasseraufnahme (DIN EN 1097-6)				Wasserdurchlässigkeit (DIN 18130 Teil -ZY-MS-MZ-7)		Proctordichte (DIN 18127)		CBR-Wert (TP BF-StB, Teil B 7.1)		Kornanteil < 0,063 (< 0,02) mm	Ungleichförmigkeitszahl	Boden- gruppe gemäß DIN 18196
		$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\rho_a$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{ssd}$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	WA <sub>24</sub> [%]	$k_r$ [m/s]	$\rho_{Pr}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$w_{Pr}$ [%]	CBR <sub>0</sub> [%]	CBR <sub>w</sub> [%]	[M.-%]	[-]						
Materialien, an denen die Frosthungsuntersuchungen durchgeführt wurden: (*): Material wurde aus den unten aufgeführten Komponenten zusammengesetzt)																		
Schottertragschichtmaterial 0/22 mm	Quarzit	2,701	2,685	2,657	0,6	$3,1 \cdot 10^{-5}$	2,040	9,8	98,8	74,0	5,3 (4,5)	54,3	GI					
Frostschutzmaterial (Basalt) 0/22 mm	Basalt	3,113	3,048	2,988	1,0	$6,7 \cdot 10^{-4}$	2,525	4,3	135,6	59,6	4,0 (1,8)	19,3	GI					
Frostschutzmaterial (Lavaschlacke) 0/22 mm	Lavaschlacke	3,047	2,645	2,375	7,4	$8,0 \cdot 10^{-4}$	1,648	11,7	51,3	46,5	3,3 (1,4)	25,5	GI					
RC-Beton mit 30 M.-% Ziegelmaterial *)	RC-Beton	2,604	2,553	2,338	6,3	$2,3 \cdot 10^{-4}$	1,729	11,8	83,8	89,1	2,6 (-)	21,1	GW					
Brechsand-Splitt-Gemisch 0/8 mm mit 30 M.-% Ziegelmaterial *)	BS-Splitt-Gemisch	2,910	2,929	2,745	3,6	$7,0 \cdot 10^{-5}$	1,973	12,3	84,8	83,0	5,3 (2,6)	24,6	SI					
Elektroofenschlacke 0/22 mm	EOS	2,929	2,584	2,335	4,1	$7,8 \cdot 10^{-4}$	1,784	9,4	89,6	78,5	3,9 (-)	32,0	GW					
Grobkörniger Boden (SE)	SE-Boden	2,641	-	-	-	$5,3 \cdot 10^{-5}$	1,756	13,4	15,3	14,4	0,2 (-)	2,7	SE					
F3-Boden (Lößlehm)	F3-Boden	2,673	-	-	-	-	1,830	14,8	5,7	4,7	83,0 (45,0)	-	TM					
F3-Boden mit 4 M.-% Kalk	F3-Boden mit Kalk	-	-	-	-	-	1,727	18,4	105,0	91,4	-	-	-					
Einzelkomponenten																		
RC-Beton		2,584	2,567	2,419	4,1	-	-	-	127,1	121,6	2,0 (-)	19,2	GW					
RC-Ziegelmaterial		2,561	2,517	2,172	11,6	-	-	-	-	-	3,7 (1,0)	23,8	GW					

Tab. 5.1: Ergebnisse der Vorversuche an den Frosthebungsmaterialien (Mittelwerte)

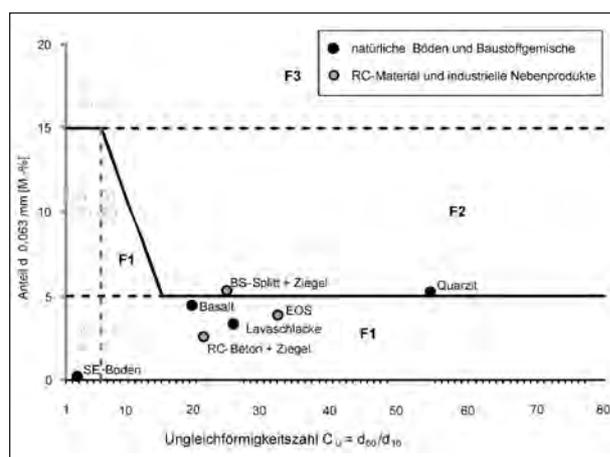


Bild 5.6: Zuordnung der Ausgangsmaterialien zu den Frostempfindlichkeitsklassen gemäß ZTV E-StB

Anmerkung: Die Zuordnung der RC-Baustoffe (RC-Beton, BS-Splitt-Gemisch, EOS) erfolgt vergleichsweise.

Die Baustoffe entsprechen der Frostempfindlichkeitsklasse F1 mit Ausnahme von Quarzit und dem BS-Splitt-Gemisch, die mit 5,3 M.-% beide geringfügig über dem erlaubten Kornanteil  $\leq 0,063$  mm

von 5,0 M.-% liegen und damit gerade die Grenze zwischen Frostempfindlichkeitsklasse F1 und Frostempfindlichkeitsklasse F2 überschreiten.

Die Frostempfindlichkeit gemäß ÖNORM B 4811 (Kapitel 3.3) kann nur ungefähr abgeschätzt werden, da vor Bestimmung der Feinanteile (Tabelle 5.1) nicht die gemäß ÖNORM B 4810 vorgeschriebene Einbaubeanspruchung mit modifizierter Proctorenergie durchgeführt wurde. Eine Übertragung auf rezyklierte Baustoffgemische bzw. industrielle Nebenprodukte ist nicht möglich, da die Bestimmung der Frostsicherheit gemäß ÖNORM B 4811 nur bei natürlichen Gemische anwendbar ist.

Von der TPA Wien wurde eine röntgenografische Mineralanalyse des SE-Bodens, des BS-Splitt-Gemisches und des F3-Bodens durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

Nach den Feinanteilen  $\leq 0,063$  mm bzw.  $\leq 0,02$  mm und der Bestimmung der aktiven und nichtaktiven Minerale kann die Frostempfindlichkeit gemäß

Minerale [%]	SE-Boden	BS-Splitt-G.	F3-Boden
nichtaktive Minerale			
Quarz	21	54	59
Plagioklas	6	2	6
Kalifeldspat	2	4	5
Kalzit	35	26	0
Augit	0	6	0
aktive Minerale			
Kaolinit	6	2	12
Glimmer	25	7	14
Chlorit	5	0	4
zulässiger Anteil < 0,02 mm	5,8	7,4	6,2

Tab. 5.2: Ergebnisse der röntgenografischen Mineralanalyse

ÖNORM B 4811 (Kapitel 3.4) folgendermaßen abgeschätzt werden:

- Beim Quarzit liegt der Feinkornanteil  $\leq 0,063$  mm über dem erlaubten Grenzwert von 4 M.-%, der Kornanteil  $\leq 0,02$  mm liegt gleichfalls über dem erlaubten Grenzwert von 3 M.-%. Da keine Tonmineralanalyse durchgeführt wurde, kann über die Frostempfindlichkeit von Quarzit keine Aussage getroffen werden.
- Der Feinkornanteil  $\leq 0,063$  mm von Basalt liegt über dem Grenzwert von 4 M.-%. Da der Kornanteil  $\leq 0,02$  mm 1,8 M.-% beträgt und damit unter dem Grenzwert von 3 M.-% liegt, wird der Basalt als „frostsicher“ klassifiziert.
- Die Lavaschlacke und der SE-Boden sind „frostsicher“, da die Feinkornanteile  $\leq 0,063$  mm bei der Böden weniger als 4 M.-% betragen.

Die Ergebnisse der Tonmineralanalyse des SE-Bodens sind also für die Beurteilung nicht maßgebend, da auf Grund der Kornverteilung der Anteil aktiver Tonminerale theoretisch 100 % betragen kann.

- Der F3-Boden und der kalkverbesserte F3-Boden sind frostempfindlich.
- Bei der nur theoretisch möglichen Übertragung der Kriterien auf die RC-Baustoffe ergeben sich folgende Einstufungen:
  - Die Feinanteile  $\leq 0,063$  mm des RC-Betons mit 30 M.-%, Ziegel und der EOS sind  $\leq 4$  M.-%.

Material	ZTV E-StB (Klasse)	ÖNORM B 4811 <sup>1)</sup>
Quarzit	F2	n. b.
Basalt	F1	ja
Lavaschlacke	F1	ja
RC-Beton mit Ziegel	F1	(ja) <sup>2)</sup>
BS-Splitt-Gem. mit Ziegel	F2	(ja) <sup>2)</sup>
EOS	F1	(ja) <sup>2)</sup>
SE-Boden	F1	ja
F3-Boden	F3	nein
F3-Boden mit Kalk	F2	n. b.

<sup>1)</sup> Frostempfindlichkeit: ja/nein/n. b. (nicht bestimmt)  
<sup>2)</sup> theoretische Einstufung der RC-Baustoffe

Tab. 5.3: Vergleich der Frostempfindlichkeitsabschätzung D/A

- Der Feinkornanteil  $\leq 0,063$  mm des BS-Splitt-Gemisches liegt mit 5,6 M.-% über dem erlaubten Grenzwert, der des Kornanteiles  $\leq 0,02$  mm beträgt 2,6 M.-%. Alle drei Korngemische würden somit gemäß ÖNORM B 4811 als „frostsicher“ bewertet.

In Tabelle 5.3 sind die Kriterien zur Abschätzung der Frostempfindlichkeit nach den ZTV E-StB und gemäß der ÖNORM B 4811 dargestellt. Sie sind wegen der Zweiteilung (ÖNORM B 4811) bzw. Dreiteilung (ZTV E-StB) nicht direkt miteinander vergleichbar. Die österreichische Bewertung wird hier so interpretiert, dass eine „nicht-frostsichere“ Einstufung gemäß ÖNORM B 4811 den Frostempfindlichkeitsklassen F2 und F3 gemäß ZTV E-StB entspricht.

Bei dieser Interpretation der Bewertung der Frostempfindlichkeit gemäß ZTV E-StB und der Bewertung der Frostsicherheit gemäß ÖNORM B 4811 gibt es nur beim BS-Splitt-Gemisch mit 30 M.-% Ziegelanteil einen Widerspruch. Bei Übertragung der Anforderungen der ÖNORM B 4811 auf diesen RC-Baustoff werden die Kriterien für eine „frostsichere“ Einstufung erfüllt. Gemäß den ZTV E-StB werden jedoch nur die Kriterien der Frostempfindlichkeitsklasse F2 erfüllt, da der Kornanteil  $< 0,063$  mm mit 5,3 M.-% knapp über dem Grenzkriterium von 5,0 M.-% liegt.

## 5.5 Arbeitsanweisung

Um möglichst exakt übereinstimmende Versuchsrandbedingungen zu erzielen, wurde von der BAST

eine detaillierte Arbeitsanweisung ausgearbeitet (Anlage 2). Sie wurde mit den Teilnehmern des Ringversuches abgestimmt und detailliert erläutert.

Grundlage der Arbeitsanweisung für den Frosthebungsringversuch ist der Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau, Teil „Frosthebungsversuch“ (TP BF-StB, Teil FHV), Befrostungsvariante A, mit Stand vom Dezember 2004.

Die Arbeitsanweisung basiert auf der Verwendung des neu entwickelten Frosthebungsgerätes. Von den Ringversuchsteilnehmern, die die Frosthebungsversuche mit anderen Geräten bzw. in Großklimakammern durchgeführt haben, musste diese Arbeitsanweisung entsprechend angepasst bzw. erweitert werden. Die Versuchsrandbedingungen mussten hierbei jedoch auf jeden Fall beibehalten werden, um die bestmögliche Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse zu erreichen. Die jeweilig erforderlichen Modifikationen sind in den Kapiteln 6.2.6 bis 6.2.8 aufgeführt.

Die Arbeitsanweisung ist folgendermaßen untergliedert:

- 1 Allgemeines
- 2 Versuchsbeschreibung
- 3 Mess- und Berechnungsgrößen, weitere Kennwerte
- 4 Versuchseinrichtung
- 5 Herstellung der Prüfkörper
  - 5.1 Materialien
  - 5.2 Probenvorbereitung
    - 5.2.1 Baustoffgemische und grobkörniger Boden (SE)
    - 5.2.2 F3-Boden und F3-Boden-Kalk-Gemisch
  - 5.3 Einbau der Probe in den Prüfzylinder
- 6 Einsetzen der Prüfzylinder in die Prüfkammer
- 7 Versuchsdurchführung
- 8 Ausbau und CBR-Versuch
- 9 Versuchsergebnisse und Prüfbericht
- 10 Schlussbemerkungen

Die einzelnen Arbeitsschritte sind detailliert beschrieben und bebildert.

In der Anlage 1 der Arbeitsanweisung werden die Einbaubedingungen, d. h. die Proctordichte, der optimale Wassergehalt, ein eventuell herabgesetzter Einbauwassergehalt, die Gesamtfeuchteinwaage der Probekörper und die Feuchteinwaage pro Einbaulage, für jedes Material angegeben.

In einer zweiten Anlage ist das Beispiel eines ausgefüllten Auswertungsprotokolls beigefügt. Die entsprechende Tabelle wurde den Teilnehmern digital zur Verfügung gestellt. Es sind die relevanten anzugebenden Kenngrößen des Frosthebungsversuches und des CBR-Versuchs nach Frostbeanspruchung mit der Einheit und der geforderten Genauigkeit (Nachkommastellen) angegeben.

Für jeden Versuch sind folgende Angaben erforderlich:

- Prüfstelle und Prüfpersonal,
- Probenmaterial,
- Versuchsbeginn und -ende.

Weiterhin sind die in Tabelle 5.4 aufgeführten Kenngrößen in der angegebenen Genauigkeit anzugeben (Bild 4.6).

Kenngröße	Kennzeichen	Einheit	Nachkommastellen
Probendurchmesser	$d_j$	mm	-
Probenhöhe	$h$	mm	-
Einbauwassergehalt	$w_E$	M.-%	1
Feuchtdichte nach Einbau	$\rho_E$	g/cm <sup>3</sup>	3
Trockendichte nach Einbau	$\rho_{dE}$	g/cm <sup>3</sup>	3
Nulleinstellung der Wegaufnehmer	$s_0$	mm	3
Hebung vor Befrostung	$s_{FH,0}$	mm	3
Hebung vor dem letzten Befrostungstag	$s_{FH,7}$	mm	3
Hebung am Ende der Befrostung	$s_{FH,E}$	mm	3
Hebung nach dem Auftauen	$s_{FH,A}$	mm	3
CBR-Versuch nach Frostbeanspruchung			
CBR-Wert nach dem Auftauen	$CBR_F$	%	1
Wassergehalt unter dem Stempel	$w_{A,o}$	M.-%	1
Wassergehalt in Probenmitte	$w_{A,m}$	M.-%	1
Wassergehalt an der Probenunterseite	$w_{A,u}$	M.-%	1

Tab. 5.4: Zu bestimmende Kenngrößen FHV

Bei Eingabe dieser Versuchswerte in das digitale Auswertungsprotokoll werden die nachstehenden Werte automatisch errechnet:

- Quellung in der Temperierungsphase  $\Delta s_0$  [mm]:  
 $\Delta s_0 = s_{FH,0} - s_0$ .
- Maximale Frosthebung  $\Delta s_{FH,max}$  [mm]:  
 $\Delta s_{FH,max} = s_{FH,E} - s_{FH,0}$ .
- Verbleibende Resthebung  $\Delta s_{FH,R}$  [mm]:  
 $\Delta s_{FH,R} = s_{FH,A} - s_{FH,0}$ .
- Maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit  $v_{FH}$  [mm/d]:  
 $v_{FH} = s_{FH,E} - s_{FH,7}$ .

Die Abnahme des CBR-Wertes durch Befrostung  $\Delta CBR$  [%] errechnet sich aus:

$$\Delta CBR = CBR_0 - CBR_F$$

Die CBR-Versuchsdurchführung und -auswertung erfolgen entsprechend den TP BF-StB, Teil B 7.1. Entsprechend dieser TP ist der CBR-Werte bei einer Stempel Eindringung von 2,5 mm anzugeben. Falls der CBR-Wert bei einer Stempel Eindringung von 5,0 mm größer als bei einer Eindringung von 2,5 mm ist, ist nach Versuchswiederholung und Bestätigung dieses Ergebnisses die Stempel Eindringung bei 5,0 mm anzugeben.

Im Anschluss an die CBR-Versuchsdurchführung wird am Prüfgut einschließlich der Proben, an denen die Wassergehalte bestimmt wurden, die Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1 mit nassem Abtrennen der Feinanteile durchgeführt.

Bei den beiden Betreuungsausschusssitzungen wurden nach den ersten Testversuchen folgende Ergänzungen zu den Vorgaben der Arbeitsanweisung beschlossen:

- An allen Materialien sind Doppelversuche durchzuführen.
- Um zu verhindern, dass das Versuchsende auf einen Freitag, Samstag oder Sonntag fällt, sind die Versuche jeweils an einem Montag oder Dienstag zu starten.
- Alle Versuche sind von einem erfahrenen Baustoffprüfer bzw. Laboranten durchzuführen, der auf Wunsch zu einer Einweisung in die BAST kommen kann.

- Alle Abweichungen von der Arbeitsanweisung bzw. alle Auffälligkeiten bei der Versuchsdurchführung müssen im Prüfbericht festgehalten werden.
- Bei einigen Materialien bestehen Schwierigkeiten beim Einbau der vorgegebenen Probenmenge in die Prüfformen. Ab der 2. Lage werden deutlich mehr als die 22 geforderten Schläge benötigt, um die entsprechende Prüfkörperhöhe zu erreichen. Es wurde beschlossen, auf der 2. und 3. Lage maximal je  $3 \cdot 6 = 18$  Schläge aufzubringen. Nach der 3. Lage ist der Prüfkörper ggf. durch Abgleichen auf Höhe zu bringen. Anschließend sind 6 Schläge zum Glätten der Prüfkörperoberfläche durchzuführen. Die zusätzlich benötigten Schläge sind zu notieren.
- Der ggf. verwendete Ausgleichssand wird bei der abschließenden Kontrollsiebung mitgesiebt. Der Anteil ist nicht aus der Körnungslinie herauszurechnen.
- Die CBR-Werte sind mit und ohne Tangentenabgleich (Nullpunktkorrektur) anzugeben.

## 6 Auswertung des Frosthebungsringversuchs

### 6.1 Allgemeines

Mit dem Frosthebungsringversuch sollen in erster Linie Handhabbarkeit, Funktion und Zuverlässigkeit des neu entwickelten Frosthebungsgerätes erprobt werden. Genauer zu untersuchen sind hierzu die praktische Durchführbarkeit, die Qualität der Prüfanweisung, Anforderungen an das Personal, Anforderungen an das Frosthebungsgerät und an Zubehör. Gemäß dem „Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 3: Planung, Organisation und Durchführung von Ringversuchen“ entspricht dies der Zielsetzung (a).

Tabelle 6.1 enthält eine Zusammenfassung aller von den Ringversuchsteilnehmern durchgeführten Versuche und deren Kurzbezeichnung. Zu diesem Zweck wurde jedem Frosthebungsversuch eine Versuchsnummer (Vx.y) zugeordnet. Die Versuche wurden anonymisiert, wozu den Versuchsteilnehmern (T) Kürzel (TA, TB, TC ...) zugeordnet wurden.

Von zwei Teilnehmern wurden nur Einzelversuche durchgeführt, ein weiterer Teilnehmer führte nur an

Material \ Teilnehmer	TA1	TA2	TB1	TB2	TC1	TC2	TD	TE	TF 1	TF2	TG1	TG2
Quarzit	V1.1	V1.2	V1.3	V1.4	V1.5 <sup>1)</sup>	V1.6 <sup>1)</sup>	V1.7	V1.8 <sup>2)</sup>	V1.9	V1.10	V1.11 <sup>1)</sup>	V1.12 <sup>1)</sup>
Basalt	V2.1	V2.2	V2.3	V2.4	V2.5		V2.7	V2.8 <sup>2)</sup>	V2.9	V2.10	V2.11 <sup>1)</sup>	V2.12 <sup>1)</sup>
Lavaschlacke	V3.1	V3.2	V3.3	V3.4	V3.5		V3.7	V3.8 <sup>2)</sup>			V3.11 <sup>1)</sup>	V3.12 <sup>1)</sup>
RC-Beton mit 30 M-% Ziegel	V4.1	V4.2	V4.3	V4.4	V4.5		V4.7	V4.8				
BS-Splitt-Gem. mit 30 M-% Ziegel	V5.1	V5.2	V5.3	V5.4	V5.5		V5.7	V5.8				
EOS	V6.1	V6.2	V6.3	V6.4	V6.5		V6.7	V6.8 <sup>2)</sup>			V6.11 <sup>1)</sup>	V6.12 <sup>1)</sup>
Grobkörniger Boden (SE)	V7.1	V7.2	V7.3	V7.4	V7.5	V7.6 <sup>2)</sup>	V7.7	V7.8 <sup>2)</sup>	V7.9	V7.10		
F3-Boden	V8.1	V8.2	V8.3	V8.4	V8.5		V8.7	V8.8	V8.9	V8.10		
F3-Boden mit Kalkhydrat	V9.1	V9.2	V9.3	V9.4	V9.5	V9.6	V9.7	V9.8 <sup>2)</sup>	V9.9 <sup>2)</sup>	V9.10 <sup>2)</sup>		

kein Versuch durchgeführt

1) keine grafische Darstellung vorhanden

2) Fehlversuch (Ausreißer), für die Auswertung nicht berücksichtigt

Tab. 6.1: Übersicht und Nummerierung der durchgeführten Frosthebungsversuche

drei der insgesamt 9 Materialien Doppelversuche durch. Falls Doppelversuche durchgeführt wurden, sind diese mit 1 und 2 beschrieben, falls Einzelversuche durchgeführt wurden, entfällt die Nummerierung.

Die Versuche der Teilnehmer TA, TB, TC und TD (Vx.1 bis Vx.7) wurden am neuen Frosthebungsgerät durchgeführt, die Versuche der Teilnehmer TE, TF und TG (Vx.8 bis Vx.12) wurden an anderen Geräten bzw. im Frostschränk durchgeführt. Einzelheiten zu den benutzten Geräten und zu konstruktionsbedingten Abweichungen von den vorgegebenen Randbedingungen sind in Kapitel 6.2.2 bis 6.2.8 aufgeführt.

Die Anlagen A3.1 bis A3.9 enthalten eine tabellarische Auflistung der Versuchsergebnisse der Auswertungsprotokolle gemäß der Vorgabe der „Arbeitsanweisung zum Frosthebungsversuch im Rahmen des Ringversuches“, Anlage 2. Die Ergebnisse sind nach den untersuchten Materialien und Baustoffgemischen zusammengefasst.

In den Anlagen A4.1 bis A4.10 sind die zeitlichen Verläufe der durchgeführten Frosthebungsversuche grafisch dargestellt, falls ein Diagramm vorhanden ist.

In den Anlagen A5.1 bis A5.9 sind die Ergebnisse der Frosthebungsversuche aller Ringversuchsteilnehmer, geordnet nach den Materialien, dargestellt.

Eine Bestimmung der Kornverteilung nach Durchführung des FHV wurde von den Teilnehmern TA, TB, TC und TF durchgeführt. Die sich daraus ergebenden Änderungen der Frostempfindlichkeitsklas-

se gemäß ZTV E-StB sind in den Kapiteln 6.3.2 bis 6.3.10 grafisch dargestellt.

Einige Versuche mussten aus unterschiedlichen Gründen, die in den Kapiteln 6.2.4 bis 6.2.8 erläutert sind, verworfen werden.

In Tabelle 6.1 sind die Bezeichnungen der durchgeführten Versuche aufgelistet. Indiziert sind Versuche ohne Versuchsdiagramm und Fehlversuche, die für die Auswertung nicht berücksichtigt wurden.

## 6.2 Beschreibung der Versuchsdurchführung der einzelnen Teilnehmer

### 6.2.1 Allgemeines

Nachfolgend werden Abweichungen von der Arbeitsanweisung, die z. B. gerätetechnisch bedingt sind, Besonderheiten während der Versuchsdurchführung und Auffälligkeiten beschrieben. Weiterhin wird begründet, warum Versuche verworfen wurden.

### 6.2.2 Teilnehmer TA

Alle Versuche wurden gemäß Arbeitsanweisung mit dem neuen Frosthebungsgerät durchgeführt. Die für den Einbau erforderlichen zusätzlichen Schläge wurden nicht bei allen Versuchen protokolliert.

### 6.2.3 Teilnehmer TB

Alle Versuche wurden gemäß Arbeitsanweisung mit dem neuen Frosthebungsgerät durchgeführt.

Es fehlt die Angabe der zusätzlich aufgebracht Schläge beim Einbau. Der Einbauwassergehalt wurde nicht bestimmt.

#### 6.2.4 Teilnehmer TC

Alle Versuche wurden gemäß Arbeitsanweisung mit dem neuen Frosthebungsgerät durchgeführt.

Nur an drei Materialien (Quarzit, SE-Boden und F3-Boden mit Kalkhydrat) wurden Doppelversuche durchgeführt.

Wegen eines technischen Fehlers konnten vom Versuch mit Quarzit keine Versuchsdiagramme geliefert werden.

Der Frosthebungsversuch am mit Kalkhydrat verbesserten F3-Boden wurde zweimal (jeweils in Doppelversuchen) durchgeführt. Wie in der Arbeitsanweisung vorgeschrieben, wurde der kalkverbesserte Boden 7 Tage in einer Nebelkammer bei  $\geq 98\%$  gelagert. Beim ersten Doppelversuch betrug die Luftfeuchte  $100\%$ . Da die maximalen Frosthebungen sehr groß waren, d. h. ca.  $15\text{ mm}$  betragen, wurde der Versuch unter Einhaltung der gleichen Versuchsrandbedingungen wiederholt. Die Luftfeuchtigkeit bei der Feuchtraumlagerung lag beim zweiten Doppelversuch bei  $98\%$ , die maximalen Frosthebungen betragen rund  $5,2\text{ mm}$  bzw.  $4,1\text{ mm}$ . Es ist also anzumerken, dass die gewählte Luftfeuchte während der Feuchtraumlagerung einen großen Einfluss auf die maximalen Frosthebungen hat.

#### 6.2.5 Teilnehmer TD

Alle Versuche wurden gemäß Arbeitsanweisung mit dem neuen Frosthebungsgerät durchgeführt.

Es wurden an allen Materialien Einzelversuche durchgeführt. Der Einbauwassergehalt und die Kornverteilung nach Befrostung wurden nicht bestimmt.

Bei den Frosthebungsversuchen mit den Materialien RC-Beton mit Ziegel, EOS und Sand bestanden Kontaktprobleme des Temperaturfühlers in Probenmitte. Durch die den Temperaturfühler umgebende isolierende Lufthülle wurden höhere Temperaturen als die im Boden tatsächlich vorhandenen gemessen. Dies hatte zur Folge, dass die automatische Temperaturregelung die Kühlkopftemperatur so nachregelte, dass Temperaturen von  $-10\text{ °C}$  bis  $-17\text{ °C}$  erreicht wurden. Die Proben wur-

den quasi „schockgefrostet“. Die Fehlversuche wurden wiederholt und nicht für die Vergleichsversuche berücksichtigt. Das Kontaktproblem des Temperaturfühlers wurde durch die Verwendung einer Wärmeleitpaste behoben.

*Anmerkung:*

*Bei den drei Fehlversuchen wurden kleinere maximale Frosthebungen gemessen als bei den korrekt durchgeführten Wiederholungen.*

#### 6.2.6 Teilnehmer TE

Es wurden von allen Materialien Einzelversuche durchgeführt.

Die Befrostung der Probekörper erfolgt im Unterschied zum neu entwickelten Frosthebungsgerät nicht über direkt auf der Probe aufliegende Kühlköpfe, sondern durch eine Temperierung der oberen Kammer des 2-Kammer-Klimaschranks. Zur Durchführung der Versuche wurde eine statische Auflast von  $p = 5\text{ kN/m}^2$  auf der Probenoberseite aufgebracht. Dies entspricht der Belastungsmasse durch den Kühlkopf des neuen Frosthebungsgerätes. Wie in diesem wirkt auch bei der Befrostung in der Klimakammer die Temperatur eindimensional von oben auf die Proben.

Ein weiterer Unterschied zum neuen Frosthebungsgerät besteht im Material und in der Form der Prüfzylinder. Die benutzten Prüfzylinder sind die einzigen, die nicht horizontal in ringförmige Segmente unterteilt sind. Sie bestehen aus Stahl und öffnen sich nach oben leicht konisch (Differenz des Durchmessers  $5\text{ mm}$  bei einer Gesamthöhe von  $125\text{ mm}$ ), um die Wandreibung während des Frosthebungsprozesses zu minimieren. Nach Einbau des Materials werden sie nicht über Kopf gedreht.

Im Unterschied zur perforierten Stahlplatte im neuen Frosthebungsgerät steht die Probenunterseite auf einem Filterstein im Wasserbad.

Es wurden keine Doppelversuche durchgeführt. Da jeweils vier Probekörper gleichzeitig untersucht werden, waren zur Untersuchung der 9 Materialien bzw. Baustoffgemische drei Versuchszyklen notwendig, die sich folgendermaßen zusammensetzten:

- Versuchszyklus 1:  
Quarzit, Basalt, EOS, Lavaschlacke.

- Versuchszyklus 2:  
F3-Boden, F3-Boden + 4 % Kalk, BS-Splitt-Gemisch, SE-Boden.
- Versuchszyklus 3:  
RC-Beton + Ziegel.

Aus den grafischen Versuchsauswertungen ist ersichtlich, dass im Versuchszyklus 1 und beim kalkbehandelten F3-Boden die 0°C-Isotherme in Probenmitte nicht erreicht wurde. Hier wurden Temperaturen von +0,3 °C bis +0,5 °C gemessen, die Probenoberseiten waren mit ca. -1,8 °C beaufschlagt. Bei den Materialien Quarzit, Basalt, Lavaschlacke, EOS und kalkbehandelter F3-Boden konnte daher keine Frosthebung bestimmt werden. Die geringen gemessenen Hebungen werden alleine durch eine Quellung in der Temperierungsphase hervorgerufen. Die Ergebnisse dieser fünf Versuche (V1.8, V2.8, V3.8, V6.8, V9.8) bleiben daher unberücksichtigt.

Bei der Befrostung des SE-Bodens, dessen maximale und bleibende Frosthebungen bei allen übrigen Versuchsteilnehmern die geringsten Hebungen zeigten, wurden sehr hohe maximale und verbleibende Hebungen und eine sehr hohe maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit bestimmt. Die zugehörige grafische Darstellung (V7.8, Anlage 4.7.4) lässt keine Auffälligkeiten erkennen. In Probenmitte wurde die 0°C-Isotherme erreicht und beibehalten und die Kühkopftemperatur ist ebenfalls unauffällig. Da die Messwerte um mehr als eine Zehnerpotenz über den Vergleichswerten der anderen Teilnehmer liegen, wird dieser Versuch statistisch nicht gewertet.

Der Einbauwassergehalt und die Kornverteilung nach Befrostung wurden nicht bestimmt.

Die Wassergehaltsbestimmung nach Bestimmung des CBR-Wertes erfolgte direkt unter dem Stempel sowie an der gesamten restlichen Probe, es wurde also nicht zwischen dem Wassergehalt in Probenmitte und an der Probenunterseite unterschieden. Bei den Materialien Quarzit, Basalt, Lavaschlacke und EOS wurde der Wassergehalt nur an der Gesamtprobe bestimmt, da das Material nach der Entfernung des CBR-Stempels seitlich einbrach.

### 6.2.7 Teilnehmer TF

Vom Versuchsteilnehmer TF wurden die Materialien Quarzit, Basalt, Lavaschlacke, SE-Boden, F3-Boden und F3-Boden mit Kalkhydrat befestet.

Die Versuche wurden in einem Prüfgerät gemäß RVS 11.062 unter Einhaltung der Vorgaben für den Ringversuch, insbesondere für die Temperatursteuerung, durchgeführt. Zwischen dem Prüfgerät des Teilnehmers TF und dem neuen Frosthebungsgerät bestehen folgende Unterschiede:

- Die Probenhöhe beträgt 150 mm.
- Die Probekörper werden nach Einbau des Materials nicht über Kopf gedreht.
- Die Probekörper stehen nicht auf einer perforierten Stahlplatte, sondern auf einem Filterstein mit gleicher Durchlässigkeit.
- Die Ablesung erfolgt nicht automatisch im Drei-Minuten-Takt, sondern manuell in Abständen von max. 24 Stunden. Der Beginn der Eislinnenbildung in Probenmitte kann daher nicht exakt bestimmt werden.

Zum Erreichen der Standard-Proctorenergie von ca. 0,6 MJ/m<sup>3</sup> sind wegen des abweichenden Volumens der Probekörper 27 Schläge pro Einbaulage erforderlich. Es wurden bis zu 40 zusätzliche Schläge, d. h. max. 22 Schläge mehr als die maximal erlaubte Anzahl von 18 Zusatzschlägen, aufgebracht.

Es wurden keine CBR-Versuche nach Befrostung durchgeführt.

Bei den Frosthebungsversuchen von Quarzit und Basalt sind die im Vergleich zu den anderen Teilnehmern sehr niedrigen Kühkopftemperaturen auffällig. Zu Versuchsende betragen diese Temperaturen beim Quarzit bei den Versuchen V1.9 und V1.10 -20 °C, beim Basalt (Versuche V2.9 und V2.10) -22 °C. Die Lage der 0°C-Isotherme in Probenmitte wurde bei allen Versuchen eingehalten. Beim Quarzit werden im Versuch V1.9 die höchsten der gemessenen maximalen Frosthebungen (7,55 mm) erreicht, Versuch V1.10 ist diesbezüglich nicht auffällig. Bei beiden Versuchen sind die verbleibenden Resthebungen überdurchschnittlich hoch (2,24 mm bzw. 2,08 mm). Beim Basalt ist nur die maximale Frosthebung von Versuch V2.9 überdurchschnittlich hoch (4,26 mm).

Sehr hoch sind die maximalen Frosthebungen und die verbleibenden Resthebungen beim kalkverbesserten F3-Boden (V9.9 und V9.10). Die Temperaturverläufe der Diagramme sind nicht auffällig, sodass der Grund für diese auffälligen Resultate nicht identifiziert werden kann. Da die maximalen Frosthebungen weit über den Mittelwerten der anderen

Resultate liegen, werden die beiden Versuche verworfen.

### 6.2.8 Teilnehmer TG

Vom Versuchsteilnehmer TG wurden Doppelversuche an Quarzit, Basalt, Lavaschlacke und EOS durchgeführt.

Das verwendete Prüfgerät entspricht prinzipiell dem neuen Frosthebungsgerät mit den folgenden Unterschieden:

- Die Probenhöhe beträgt 133 mm.
- Die Probekörper werden nach Einbau des Materials nicht über Kopf gedreht.
- Die Probekörper stehen nicht auf einer perforierten Stahlplatte, sondern auf einem Filterstein gleicher Durchlässigkeit.
- Die Prüfzylinder bestehen aus sieben Teflonscheiben.
- Die Temperatur der Kühlköpfe wird händisch, i. d. R. zweimal täglich, reguliert.
- Die Daten werden automatisch aufgezeichnet. Es ist jedoch keine Software zur Erstellung von Diagrammen vorhanden.

Der Einbauwassergehalt und die Kornverteilung nach Befrostung wurden nicht bestimmt.

## 6.3 Materialbezogene Auswertung

### 6.3.1 Allgemeines

Die Höhen der Probekörper sind unterschiedlich und liegen zwischen 125 und 150 mm. Zur Vergleichbarkeit der Messwerte wurden die Hebungen in ‰ bzw. die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit in ‰/d umgerechnet (Anlagen A3.1 - A3.9). Da sowohl die Mittelwerte (MW) als auch die Standardabweichungen (SD) aller Parameter stark variieren, werden die Ergebnisse in Anlehnung an die Vorgaben des „Merkblattes über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen“, Teil 6, mit nur einer Nachkommastelle angegeben.

Die materialbezogenen Ergebnisse der Frosthebungsversuche sind grafisch in den Anlagen A5.1 bis A5.9 dargestellt.

Insgesamt haben sieben Labore am Ringversuch teilgenommen, von nur zwei Laboren wurden Dop-

pelversuche aller Materialien durchgeführt. Einige Versuche wurden als „Ausreißer“ technisch begründet verworfen, sodass die Anzahl der für die Auswertung zur Verfügung stehenden Versuche zwischen 7 und 12 je Material schwankt. Daher sowie auf Grund der Zielsetzung des Ringversuches wurden alle Einzelversuche einzeln bewertet und keine Mittelwerte aus Doppelversuchen gebildet.

Wie im „Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 3“ erwähnt, ist es bei der vorliegenden Auswertung des Typs (a) wegen der unterschiedlichen Anzahl der Versuche und der geringen Teilnehmerzahl nicht möglich, zuverlässige Aussagen über Standardabweichungen unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen zu machen. Die Schlussfolgerungen beschränken sich daher im Wesentlichen auf Aussagen zur praktischen Durchführbarkeit, der Qualität der Prüfanweisung, Geräteaufwand und Robustheit sowie Einschränkungen für die Anwendung.

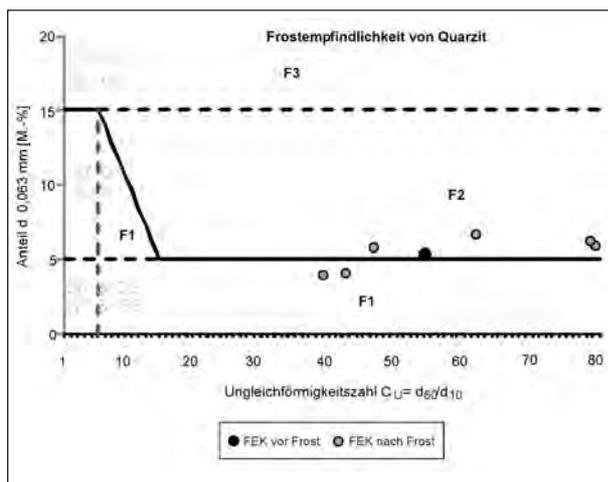
Die CBR-Werte wurden von den Teilnehmern TC, TF und TG nur ohne Nullpunktkorrektur bestimmt. Da die Abweichungen dieser Werte zu denen mit Nullpunktkorrektur unerheblich sind, wurden die nicht korrigierten CBR-Werte miteinander verglichen. Dadurch entfallen die Versuchsergebnisse des Teilnehmers TD, dessen CBR-Werte nur mit Nullpunktkorrektur vorliegen.

### 6.3.2 Quarzit

Die Ergebnisse des FHV am Quarzit zeigen neben denen des F3-Bodens die größten Werte bei den Quellungen in der Temperierungsphase (MW 4,3 ‰), der maximalen (MW: 32,3 ‰) sowie der verbleibenden Frosthebung (MW: 7,2 ‰). Die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit beträgt im Mittel 2,6 ‰/d. Die Standardabweichungen der Versuche im neuen Frosthebungsgerät sind geringer als die der in anderen Frosthebungsgeräten durchgeführten Versuche.

Eine Hebung der Probe, d. h. die Eislinsenbildung, beginnt nach durchschnittlich 4,3 Tagen mit geringen Abweichungen (SD: 0,4 Tage).

Beim Versuch V1.8 wird die 0°C-Isotherme in Probenmitte nicht erreicht. Ca. 4,8 Tage nach Versuchsbeginn ist eine Hebung der Probe festzustellen, die jedoch nur eine max. Frosthebung von 4,4 ‰ erreicht und damit weit unterhalb des MW liegt. Der Versuch wurde daher nicht gewertet.



**Bild 6.1:** Veränderung der Frostempfindlichkeit gemäß ZTV E-StB von Quarzit nach FHV

Auffällig sind die Versuche V1.9 und V1.10, die im Frosthebungsgerät gemäß ÖNORM 4810 durchgeführt wurden. Aus den Diagrammen können sehr hohe Kühlkopftemperaturen (ca.  $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) abgelesen werden (Kapitel 6.2.7). Quellung und maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit liegen hier weit unterhalb der jeweiligen MW, die verbleibende Resthebung ist dagegen annähernd doppelt so hoch wie der MW. Die Versuchswerte der maximalen Frosthebung der beiden Versuche differieren sehr stark ( $50,3\text{ }‰$  und  $28,1\text{ }‰$ ). Diese Auffälligkeiten resultieren in höheren Standardabweichungen der Versuche der Teilnehmer TE, TF und TG im Vergleich zu den Versuchen mit dem neuen Gerät.

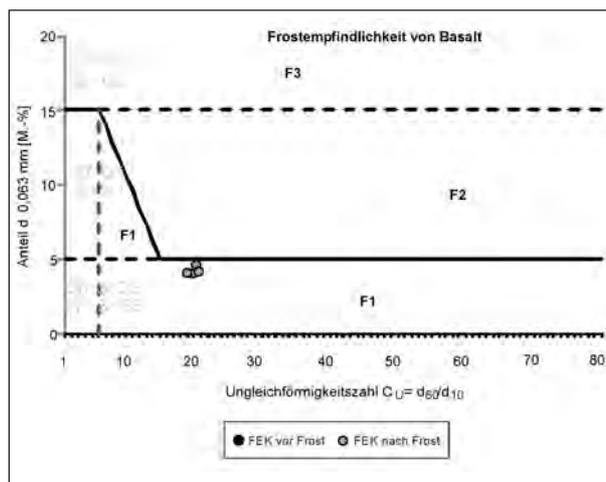
Im Vergleich zum Einbauwassergehalt von  $7,8\text{ M.-%}$  verringert sich der Wassergehalt nach Befrostung geringfügig. Er stimmt im Mittel gut überein, wenn die Untergliederung in vertikaler Richtung (oben, mittig, unten) außer Betracht gelassen wird. Hier ist die Tendenz uneinheitlich.

Auffällig ist eine Zunahme der CBR-Werte bei den Versuchen mit dem neuen Frosthebungsgerät. Die Versuche der Teilnehmer TF und TG zeigen dagegen eine einheitliche Abnahme der CBR-Werte von  $100\text{ }%$  auf  $40\text{ }%$  bis  $45\text{ }%$ .

Bei der Bewertung der Frostempfindlichkeit nach dem FHV zeigt sich eine geringe Kornverfeinerung (Anlage 6.1, Bild A10), die Tendenz ist jedoch uneinheitlich (Bild 6.1).

### 6.3.3 Basalt

Die absoluten Werte beim Basalt liegen bei allen Parametern im unteren Bereich, sind jedoch unein-



**Bild 6.2:** Frostempfindlichkeit gemäß ZTV E-StB von Basalt vor und nach FHV

heitlich. Die Quellung in der Temperierungsphase beträgt im Mittel  $2,4\text{ }‰$ , die max. Frosthebung  $17,7\text{ }‰$ , die verbleibende Resthebung  $3,0\text{ }‰$  und die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit liegt im Mittel bei  $1,5\text{ }‰/\text{d}$ . Die Standardabweichung der maximalen Frosthebung der Versuche mit den neuen Frosthebungsgeräten ist mit  $4,8\text{ }‰$  geringer als die der Versuche mit den anderen Geräten (SD:  $11,7\text{ }‰$ ), die anderen Standardabweichungen unterscheiden sich nur gering.

Die Eislinsenbildung beginnt im Mittel nach  $3,1$  Tagen mit einer geringen Standardabweichung von  $0,3$  Tagen.

Der Versuch V2.8 zeigt bei allen Hebungen die geringsten Werte, da die  $0^{\circ}\text{C}$ -Isotherme in Probenmitte nicht erreicht wurde. Der Versuch wurde daher verworfen.

Der Versuch V2.11 zeigt maximale Hebungen von nur  $1,5\text{ }‰$ , was die Ursache für die hohe Standardabweichung dieses Parameters bei den Geräten der Teilnehmer TE, TF und TG ist. Generell sind die Standardabweichungen der Versuche der neuen und der anderen Geräte jedoch vergleichbar und hoch.

Die Wassergehalte der ausgebauten Proben sind mit Werten um  $4\text{ M.-%}$  (oben und mittig) und um  $6\text{ M.-%}$  (unten), mit Ausnahme des Versuches V2.1, bei dem höhere Wassergehalte bestimmt wurden, vergleichbar. Der Einbauwassergehalt von  $\geq 4,3\text{ M.-%}$  nimmt damit im oberen und mittleren Probenbereich ab, im unteren zu.

Die CBR-Werte zeigen eine uneinheitliche Tendenz. Die Versuchsergebnisse der neuen Geräte

zeigen von einer Abnahme über fast keine Änderung bis hin zu einer Zunahme alle Änderungsmöglichkeiten, die der anderen Geräte zeigen eine Abnahme des CBR-Wertes zwischen 20 % und 50 %.

Die Kornverfeinerung nach Befrostung ist minimal, sodass alle Proben vor und nach Befrostung in die Frostempfindlichkeitsklasse F1 fallen (Bild 6.2). Auffällig ist die große Übereinstimmung der Kornverteilung (Anlage 6.1, Bild A11).

### 6.3.4 Lavaschlacke

Die Versuchsergebnisse der Lavaschlacke zeigen die niedrigsten Hebungen aller Versuche.

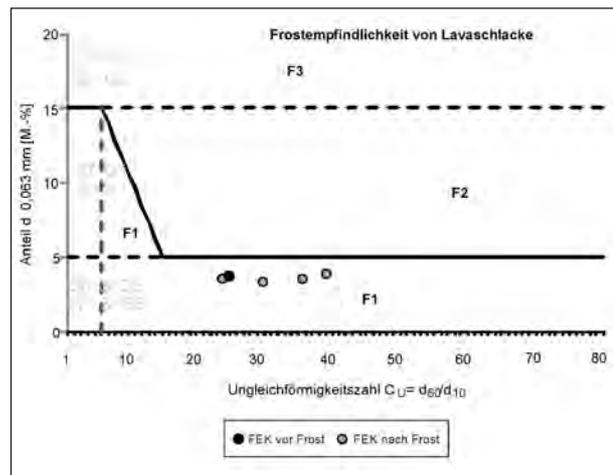
Im Mittel liegt die Quellung in der Temperierungsphase bei 2,0 ‰, die max. Frosthebung bei 4,0 ‰, die verbleibende Resthebung bei 0,7 ‰ und die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit bei 0,6 ‰/d. Die Standardabweichung der maximalen Frosthebung der Versuche mit den neuen Frosthebungsgeräten (SD: 1,1 ‰) ist höher als die der Versuche mit den anderen Geräten (SD: 0,5 ‰), die SD der Messwerte der anderen Parameter ist bei den Versuchen mit den neuen Frosthebungsgeräten geringer.

Beginn der Eislinsenbildung ist im Mittel nach 3,0 Tagen mit einer Standardabweichung von 1,0 Tagen. Ein früher Beginn ist bei den Versuchen V3.5 (2,0 Tage) und V3.7 (2,2 Tage) zu verzeichnen. Der Zeitpunkt des Beginns der Eislinsenbildung wirkt sich nicht auf die Höhe der Frosthebung aus.

Auffällig ist der nicht gewertete Versuch V3.8 (0°C-Isotherme in Probenmitte nicht erreicht), der die größten max. Frosthebungen (8,9 ‰) zeigt. Die Eislinsenbildung beginnt hier erst nach 4,4 Tagen.

Die beiden Versuche V3.11 und V3.12 zeigen im Vergleich zu den Ergebnissen der neuen Geräte hohe maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeiten (MW: 1,5 ‰/d), die verbleibenden Resthebungen sind dagegen negativ, d. h., die Probenhöhe nach dem Auftauen ist niedriger als vor der Befrostung nach Quellung.

Die Wassergehalte nach Befrostung stimmen bei den Versuchen im neuen Gerät sehr gut überein, er nimmt im Vergleich zum Ausgangswassergehalt ( $w_E \geq 9,3$  M.-%) zu. Es ist ein deutlich höherer Wassergehalt im unteren Probenbereich (MW: 14,9 M.-%) festzustellen. Die Wassergehalte der Versu-



**Bild 6.3:** Frostempfindlichkeit gemäß ZTV E-StB von Lavaschlacke vor und nach FHV

che V3.11 und V3.12 liegen deutlich unterhalb der Mittelwerte.

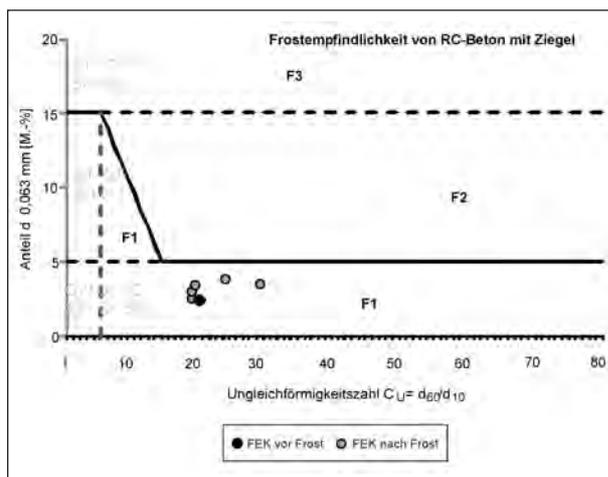
Die CBR-Werte der im neuen Gerät befestigten Proben nehmen nach Befrostung zu. Die beiden Versuche V3.11 und V3.12 zeigen eine geringfügige Abnahme des Eindringwiderstandes.

Gemäß dem Kornverteilungskriterium ändert sich die Frostempfindlichkeit nach Befrostung nicht, die Einordnung in die Klasse F1 bleibt bestehen (Bild 6.3).

### 6.3.5 RC-Beton mit Ziegel

Vom RC-Beton mit Ziegel wurden 6 Versuche mit dem neuen und nur ein Versuch mit einem anderen Gerät (V4.8, Frostschrank) durchgeführt. Im Mittel liegen die Hebungen mit 32,0 ‰ in der Größenordnung des Quarzits. Die Übereinstimmung der max. Frosthebung ist bei den im neuen Gerät durchgeführten Versuchen zufrieden stellend (MW: 28,2 ‰, SD: 7,5 ‰), auffallend ist die gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Teilnehmer TA (V4.1 und V4.2) und TB (V4.3 und V4.4). Beim Versuch V4.8 (Frostschrank) beträgt die max. Hebung dagegen 54,7 ‰. Gleiches gilt tendenziell für die verbleibende Resthebung.

Die maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten liegen ebenfalls in der Größenordnung der Versuche beim Quarzit (MW alle: 3,3 ‰/d). Lediglich Versuch V 4.8 zeigt eine sehr hohe maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit von 12,6 ‰/d, was der Grund für die hohe SD von 4,2 ‰/d bei Betrachtung aller Versuche ist.



**Bild 6.4:** Frostempfindlichkeit gemäß ZTV E-StB von RC-Beton mit Ziegel vor und nach FHV

Die Eislinnenbildung beginnt nach durchschnittlich 3,6 Tagen mit einer großen Spannweite (SD: 1,1 Tage) von 1,2 Tagen (V4.7) bis 4,7 Tagen (V4.2). Es kann kein Zusammenhang zwischen Frosthebungsbeginn und der Größe der Frosthebungen festgestellt werden.

Im Vergleich zum Einbauwassergehalt ( $w_{Pr} = 11,8$  M.-%) nehmen die Ausbauwassergehalte um ca. 2 M.-% zu. Die Wassergehalte nach Befrostung liegen zwischen 12,8 M.-% und 17,2 M.-% mit einer leichten Tendenz zur Zunahme im unteren Teil der Probe.

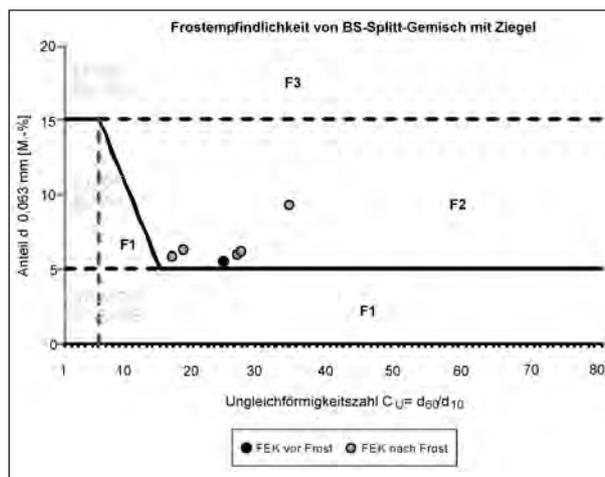
Die CBR-Werte nach Befrostung sind inhomogen und nehmen teils leicht ab, teils aber auch zu. Die größte Zunahme ist bei Versuch V4.5 mit 75 % zu verzeichnen.

Die Kornverteilung nach Befrostung zeigt eine geringfügige Zunahme der Feinanteile. Die Zuordnung des Materials in die Frostempfindlichkeitsklasse F1 gemäß den ZTV E-StB bleibt auch nach Befrostung unverändert (Bild 6.4).

### 6.3.6 BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel

Wie beim RC-Beton mit Ziegel wurden auch beim BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel sechs Versuche mit dem neuen und ein Versuch mit einem anderen Gerät (V5.8, Frostschrank) durchgeführt.

Die Größenordnung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Hebungen ist mit den Versuchswerten des Quarzits und des RC-Betons vergleichbar. Sie betragen für die max. Hebung im Mittel 26,6 ‰ (SD: 11,3 ‰) und für die verbleibende Resthebung im Mittel 4,9 ‰ (SD: 2,7 ‰).



**Bild 6.5:** Theoretische Bestimmung der Frostempfindlichkeit gemäß ZTV E-StB von BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel vor und nach FHV

Beim Versuch V5.7 ist die Quellung in der Temperierungsphase sehr gering. Maximale Frosthebung (48,0 ‰) und die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit (3,8 ‰/d) sind dagegen überdurchschnittlich groß. Die Eislinnenbildung beginnt schon nach 1,2 Tagen (MW: 3,6 Tage).

Quellung (-1,2 ‰), max. Hebung (15,2 ‰) und verbleibende Resthebung (0,5 ‰) sind beim Versuch V5.8 (Frostschrank) jeweils am kleinsten.

Die Wassergehalte steigen nach dem Einbau um ca. 5 M.-% auf Werte um 13 M.-% an. Es zeigt sich eine Zunahme des Wassergehaltes von der Probenober- zur -unterseite.

Die CBR-Werte nach Befrostung sind inhomogen. Es wurden sowohl Zu- als auch geringe Abnahmen gemessen.

Es ist eine leichte Tendenz zur Kornverfeinerung nach Befrostung feststellbar, durch die jedoch keine Änderung der Zuordnung zur Frostempfindlichkeitsklasse (F2) resultiert (Bild 6.5).

### 6.3.7 Elektroofenschlacke (EOS)

An der EOS wurden sechs Versuche mit dem neuen und drei mit einem anderen Gerät durchgeführt. Versuch V6.8 (Frostschrank) wurde verworfen, da die 0°C-Isotherme in Probenmitte nicht erreicht wurde und der Verlauf der Hebungskurve keinen Hinweis auf Eislinnenbildung zeigt.

Die Hebungen der EOS sind klein, zeigen jedoch relativ hohe Standardabweichungen. Die max. Frosthebung beträgt im Mittel 14,5 ‰ (SD: 6,1 ‰),

die verbleibende Resthebung beträgt im Mittel 2,1 ‰ (SD: 2,2 ‰).

Die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit ist sehr klein und beträgt im Mittel 0,7 ‰/d (SD: 0,6 ‰/d).

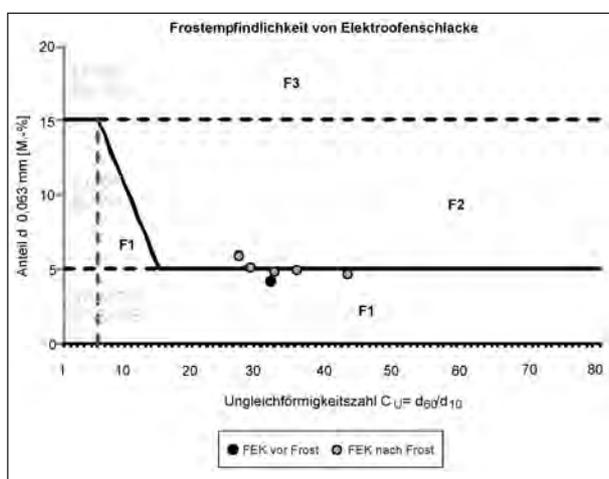
Die Frosthebung beginnt im Mittel nach 3,2 Tagen, die Spanne reicht jedoch von 2,2 Tagen (V6.3) bis zu 4,3 Tagen (V6.2). Bei den vorschriftsmäßig durchgeführten Versuchen, bei denen die 0°C-Isotherme in Probenmitte erreicht wurde, ist kein Zusammenhang zwischen dem Beginn der Eislinsenbildung und der Größe der Hebungen festzustellen.

Auffallend sind die Ergebnisse des Versuches V6.7 mit einer geringen Abflachung der Frosthebungskurve und daher vergleichsweise hoher maßgebender Frosthebungsgeschwindigkeit (1,6 ‰/d). Das Versuchsdiagramm zeigt ein Wellenmuster der Kühlkopftemperatur mit einer Frequenz von 24 Stunden. Es wird ein technisches Problem bei der Steuerung des Kühlkopfes vermutet.

Die Wassergehalte sind relativ homogen, im unteren Probenbereich kommt es zu einer Wassergehaltszunahme von 9,7 M.-% (Ausgangswassergehalt) auf im Mittel 12,8 M.-%.

Die CBR-Werte nehmen von 90 % auf 60 % bis 80 % nach der Befrostung ab, mit Ausnahme des Versuches V6.5, bei dem eine Zunahme um 110 % auf einen CBR-Wert von 200 % bestimmt wurde.

Es ist eine geringe Zunahme der Feinanteile nach Befrostung festzustellen, mit einer Ausnahme ändert sich die nur theoretische Zuordnung zur Frostempfindlichkeitsklasse F1 jedoch nicht (Bild 6.6).



**Bild 6.6:** Frostempfindlichkeit gemäß ZTV E-StB von EOS vor und nach FHV

### 6.3.8 SE-Boden

Der SE-Boden wurde außer vom Teilnehmer TG von allen Laboren untersucht (insgesamt 10 Versuche).

Der Temperaturverlauf von Versuch V7.6 zeigt, dass die 0°C-Isotherme in Probenmitte nicht erreicht wurde. Dies wird auch durch die geringen max. Hebungen von 0,1 ‰, die indirekt bestätigen, dass keine Eislinsenbildung stattgefunden hat, bestätigt. Der Versuch wird daher nicht gewertet.

Die max. Hebung und die verbleibende Resthebung von Versuch V7.8 (Frostschrank) liegen um mehr als eine Zehnerpotenz über den Mittelwerten der anderen Versuche, weshalb dieser Versuch als „Ausreißer“ gestrichen wird.

Die Quellung in der Temperierungsphase liegt mit im Mittel 3,7 ‰ beim Vergleich aller untersuchten Materialien im mittleren Bereich. Die max. Hebung (MW: 2,0 ‰), die verbleibende Hebung (MW: -0,1 ‰) und die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit (MW: 0,2 ‰/d) sind die jeweils kleinsten im Ringversuch bestimmten Werte.

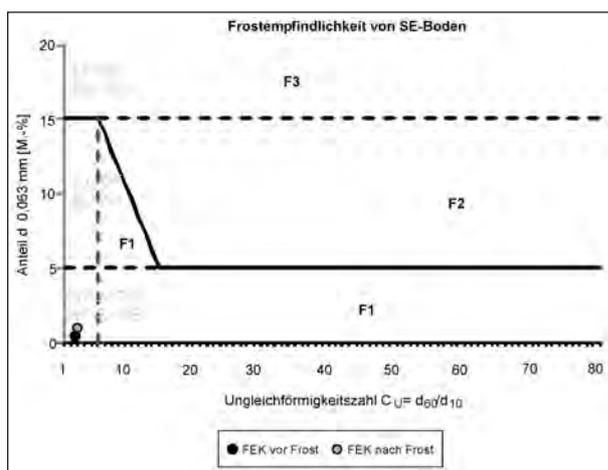
Bei fünf Versuchen (V7.1, V7.2, V7.3, V7.4, V7.6) ist die verbleibende Resthebung negativ, d. h., die Probenhöhe nach Befrostung ist kleiner als die zu Versuchsbeginn.

Die SD sind im Vergleich zu den anderen Materialien generell kleiner, im prozentualen Vergleich zu den beim SE-Boden gemessenen Werten sind sie jedoch hoch. Insbesondere bei der verbleibenden Resthebung (MW: -0,1 ‰, SD: 0,3 ‰) ist die Schwankungsbreite der Messwerte sehr hoch.

Die Eislinsen bilden sich mit im Mittel 4,4 Tagen (SD: 0,5 Tage) spät. Die Diagramme zeigen, dass die maximalen Frosthebungen in weniger als 24 Stunden nach Einstellung der 0°C-Isotherme in Probenmitte erreicht wurden.

In den Versuchen V7.9 und V7.10 (altes Gerät) wurden größere maximale Hebungen und eine größere maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit als im Mittel gemessen.

Die Wassergehalte steigen nach Befrostung vom Einbauwassergehalt von 11,4 M.-% auf Werte um 15 M.-% mit einer geringen Abnahme von der Probenober- zur -unterseite. Die Wassergehalte der Versuche V7.9 und V7.10 sind geringer, der Wassergehalt im oberen Teil der Probe nimmt hier sogar ab.



**Bild 6.7:** Frostempfindlichkeit gemäß ZTV E-StB von SE-Böden vor und nach FHV

Die CBR-Werte verändern sich nach der Befrostung nicht bzw. sie nehmen geringfügig zu, bei den Versuchen V9.5 und V9.6 wurde eine größere Zunahme von 50 bzw. 55 % bestimmt.

Der sehr geringe Feinkornanteil und die kleine Ungleichförmigkeitszahl verändern sich nach Befrostung nur wenig. Dadurch bleibt auch nach Befrostung die Einstufung des Baustoffes in die Frostempfindlichkeitsklasse F1 bestehen (Bild 6.7).

### 6.3.9 F3-Böden

Der Frosthebungsversuch am feinkörnigen Boden wurde außer vom Teilnehmer TG von allen Ringversuchsteilnehmern durchgeführt. Grund für die Auswahl des Bodens der Frostempfindlichkeitsklasse F3 war die Bestimmung von Messdaten zu Vergleichszwecken an einem frostempfindlichen Material gemäß ZTV E-StB. Hier sind definitionsgemäß hohe Frosthebungen zu erwarten, was praktisch bestätigt wird. Die MW der max. Frosthebung (50,6 ‰; SD: 31,9 ‰), der verbleibenden Resthebung (12,2 ‰; SD: 7,8 ‰/d) und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit (6,7 ‰/d; SD: 5,2 ‰/d) sind erwartungsgemäß die jeweils höchsten Messwerte im Vergleich aller untersuchten Materialien. Alle Messwerte streuen sehr stark und zeigen sehr hohe Standardabweichungen, die bei den neuen Frosthebungsgeräten höher als bei den anderen Geräten sind. Zu erwähnen sind die stetig ansteigenden Hebungen. Im Gegensatz zu den anderen Materialien ist in den Frosthebungsdiagrammen des F3-Bodens in den meisten Fällen keine oder keine deutliche Abflachung der Kurve zu erkennen, was sich in den hohen maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten widerspiegelt.

Beim Versuch V8.7 sind die maximalen Frosthebungen und die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit um ein Vielfaches höher als der Versuchsdurchschnitt. Die grafische Versuchsdarstellung (Anlage A4.7) zeigt eine stetig ansteigende Frosthebung, es ist keine Abflachung der Kurve erkennbar. Ein Grund hierfür konnte nicht festgestellt werden, die Probenmittentemperatur und die Kühlkopftemperatur sind nicht auffällig.

Die Eislinsenbildung beginnt nach 4,0 bis 4,8 Tagen (MW: nach 4,1 Tage) mit Ausnahme von Versuch V8.7, bei dem schon nach 1,9 Tagen eine Frosthebung stattfindet. Der Grund hierfür ist nicht bekannt.

Der Wassergehalt von mindestens 14,8 M.-% nach Einbau der Probe steigt nach Befrostung leicht an. Tendenziell ist der Wassergehalt im oberen Probenbereich höher, insbesondere bei den Versuchen, die nicht im neuen Frosthebungsgerät durchgeführt wurden.

Die CBR-Werte nach Befrostung nehmen von ursprünglich 5,5 % teilweise geringfügig auf 4,0 % ab, teilweise steigen sie aber auch um max. 6,0 %.

### 6.3.10 F3-Böden mit Kalkhydrat

Die Frosthebungsversuche beim kalkbehandelten Boden wurden von denselben Teilnehmern wie beim nicht kalkbehandelten Boden durchgeführt.

Beim Versuch V9.8 ist im Versuchsdiagramm (Anlage 4.8) keine Hebung durch Eislinsenbildung zu erkennen, was durch die geringe max. Hebung von 0,4 ‰ bestätigt wird. Die 0°C-Isotherme in Probenmitte wird kurzzeitig erreicht, aber nicht gehalten; die Temperatur steigt nach ca. 20 Stunden wieder auf positive Temperaturwerte an. Der Versuch wird daher als „Ausreißer“ verworfen.

Mit Ausnahme der Versuche V9.1, V9.2 und V9.8 komprimiert die in der Temperierungsphase eingebrachte Auflast die kalkbehandelten Probenkörper. Nach dem 1. Versuchstag ist die Differenz zur Einbauhöhe dadurch negativ.

Die Hebungen sind erwartungsgemäß kleiner als beim nicht kalkbehandelten Boden, aber die zweithöchsten aller untersuchter Materialien. Die maximalen Hebungen betragen im Mittel 36,8 ‰ (SD: 7,0 ‰), die verbleibenden Resthebungen sind 9,3 ‰ (SD: 4,7 ‰) groß. Die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit ist höher als die des unbehandelten Bodens, sie beträgt im Mittel 8,1 ‰/d

(SD: 2,5 ‰/d) und ist damit im Gesamtvergleich am höchsten. Grund hierfür ist wie beim F3-Boden der meist stetige Anstieg der Frosthebungskurve.

Die maximalen Frosthebungen beim kalkbehandelten F3-Boden (V9.9, V9.10) sind um ein Vielfaches höher als die maximalen Frosthebungen der übrigen Versuchsteilnehmer. Die beiden Versuche wurden daher als „Ausreißer“ gestrichen. Der Grund für die extremen Frosthebungen konnte nicht bestimmt werden.

Der Beginn der Eislinsenbildung (MW: 4,3 Tage) ist vergleichbar mit dem des nicht behandelten Bodens. Wie hier beginnt die Eislinsenbildung beim Teilnehmer TD (Versuch V9.7) sehr früh, d. h. schon nach 2,4 Tagen.

Die Wassergehalte von max. 18,6 M.-% bei Einbau nehmen nur geringfügig zu. Tendenziell ist der Wassergehalt im oberen Probenbereich höher.

Die CBR-Werte nehmen bei den Versuchen von ursprünglich 105 % ab bzw. bleiben gleich, streuen allerdings zwischen 28 und 105 %. Es ist eine deutlichere Abnahme bei den nicht im neuen Frosthebungsgerät durchgeführten Versuchen zu verzeichnen.

Vom Teilnehmer TC wurden insgesamt vier Versuche durchgeführt: Zwei Probekörper für eine Doppelbestimmung wurden nach der in der Arbeitsanweisung vorgeschriebenen 7-tägigen Feuchtraumlagerung bei 98 % Luftfeuchtigkeit gelagert (V9.5 und V9.6). Zwei weitere Probekörper wurden bei 100 % Luftfeuchtigkeit gelagert (V9.5a und V9.6a). Es ist nicht protokolliert, ob beide 7-tägigen Feuchtraumlagerungen bei der vorgeschriebenen Temperatur von  $+ 40 \text{ °C} \pm 2 \text{ K}$  erfolgten. Diese beiden Doppelversuche zeigen ein völlig anderes Frosthebungsverhalten: V9.5 und V9.6 zeigen keine signifikante Abflachung der Frosthebungskurve, die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit ist hoch (6,5 ‰/d und 5,2 ‰/d). Die maximale Frosthebung beträgt 42,4 ‰ und 33,7 ‰. Bei den Versuchen V9.5a und V9.6a verlaufen die Frosthebungskurven dagegen völlig anders: Nach einem kurzen, sehr steilen Anstieg von nur 24 Stunden flachen die Kurven stark ab. Die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit beträgt nur 4,4 ‰/d resp. 3,9 ‰/d. Die maximale Frosthebung beträgt dagegen 121,5 ‰ resp. 122,9 ‰. Der Zeitpunkt der Eislinsenbildung liegt bei allen vier Versuchen zwischen 3,8 und 4,4 Tagen.

## 6.4 Auswertung der Einzelparameter

### 6.4.1 Allgemeines

Ein Vergleich der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Quellung in der Temperierungsphase, der max. Frosthebung, der verbleibenden Resthebung und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit erlaubt Aussagen über die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der unterschiedlichen Frosthebungsgeräte.

Weiterhin werden die nach Befrostung bestimmten Wassergehalte, die CBR-Werte und die Kornverteilung nach Befrostung bewertet.

In Tabelle 6.4 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen für alle Versuche sowie getrennt für die Versuche im neuen Frosthebungsgerät und die Versuche der anderen Frosthebungsgeräte aufgelistet. Tabelle 6.3 enthält die entsprechenden Größen für die Abnahme der CBR-Werte nach Einbau und Befrostung.

Als zusätzliches Bewertungselement wurde der Beginn der Eislinsenbildung aus den Frosthebungsdiagrammen, sofern vorhanden, abgelesen und ausgewertet.

Zusätzlich zu der numerischen Darstellung in den Tabellen 6.3 und 6.4 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertungen in den Bildern 6.8 bis 6.13 grafisch dargestellt.

### 6.4.2 Zusätzlich aufgebrachte Schläge beim Einbau

Ziel des in der Arbeitsanweisung vorgeschriebenen Probeneinbaus war das Erreichen einer einheitlichen Einbaudichte und eines einheitlichen Einbauwassergehaltes. Hierzu wurde die gesamte vorher bestimmte Feuchtmasse des jeweiligen Probenmaterials zum Erreichen der optimalen Proctordichte lagenweise in die Probenform eingebaut (Kapitel 5.5).

Erste Voruntersuchungen zeigten, dass hierbei mehr Verdichtungsenergie aufgebracht werden muss als beim Einbau der gleichen Probenmenge im Proctortopf B. Es war daher vereinbarungsgemäß erlaubt, jeweils maximal 18 Zusatzschläge auf die 2. und 3. Einbaulage aufzubringen.

Diese Vereinbarung wurde allerdings getroffen, nachdem die Versuche V1.5, V1.6, V1.9, V1.10, V2.9 und V2.10 schon durchgeführt worden waren, sodass bei diesen Versuchen mehr Einbauenergie aufgebracht wurde.

Teilnehmer		TA1		TA2		TC1		TC2		TF1		TF2	
Volumen Topf [cm <sup>3</sup> ]		2266,33		2306,35		2253,62		2253,62		-		-	
zusätzliche aufgebrauchte Energie		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Quarzit	1. Lage	-	-	-	-	-	-	-	-	40	-	40	-
	2. Lage	-	-	-	-	40	118,18	30	103,03	40	148,15	40	148,15
	3. Lage	-	-	-	-	38	-	38	-	40	-	40	-
	Restmaterial [g]	-	-	-	-	0,00	-	0,00	-	-	-	-	-
Basalt	1. Lage	-	-	-	-	-	-			30	-	30	-
	2. Lage	18	63,64	18	63,64	12	45,45			30	111,11	30	111,11
	3. Lage	24	-	24	-	18	-			30	-	30	-
	Restmaterial [g]	0,00	-	0,00	-	115,05	-	-	-	-	-	-	-
Lavaschlacke	1. Lage	-	-	-	-	-	-						
	2. Lage	18	54,55	18	45,45	18	54,55						
	3. Lage	18	-	12	-	18	-						
	Restmaterial [g]	10,00	-	-	-	6,10	-	-	-	-	-	-	-
RC-Beton mit 30 M-% Ziegel	1. Lage	-	-	-	-	-	-						
	2. Lage	18	39,39	12	36,36	6	36,36						
	3. Lage	8	-	12	-	18	-						
	Restmaterial [g]	36,00	-	32,00	-	63,60	-	-	-	-	-	-	-
BS-Splitt-Gemisch mit 30 M-% Ziegel	1. Lage	-	-	-	-	-	-						
	2. Lage	18	54,55	12	45,45	6	36,36						
	3. Lage	18	-	18	-	18	-						
	Restmaterial [g]	13,00	-	-	8,00	81,36	-	-	-	-	-	-	-
EOS	1. Lage	-	-	-	-	-	-						
	2. Lage	12	36,36	12	-	0	9,09						
	3. Lage	12	-	12	-	6	-						
	Restmaterial [g]	78,00	-	62,00	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-
Grobkörniger Boden (SE)	1. Lage	-	-	-	-	-	-			0	-	0	-
	2. Lage	-	-	-	-	0	27,27	6	27,27	24	59,26	24	59,26
	3. Lage	-	-	-	-	18	-	12	-	24	-	24	-
	Restmaterial [g]	-	-	-	-	52,90	-	50,60	-	-	-	-	-
F3-Boden	1. Lage	-	-	-	-	-	-			0	-	0	-
	2. Lage	0	9,09	0	9,09	6	27,27			12	37,04	12	37,04
	3. Lage	6	-	6	-	12	-			18	-	18	-
	Restmaterial [g]	90,00	-	77,00	-	169,90	-	-	-	-	-	-	-
F3-Boden mit Kalkhydrat	1. Lage	-	-	-	-	-	-			12	-	12	-
	2. Lage	-	-	-	-	18	54,55	18	54,55	12	44,44	12	44,44
	3. Lage	-	-	-	-	18	-	18	-	12	-	12	-
	Restmaterial [g]	-	-	-	-	145,70	-	174,10	-	-	-	-	-
(1): Anzahl der Zusatzschläge													
(2): % der Standard-Proctorenergie													

Tab. 6.2: Zusätzlich aufgebrauchte Einbauenergie und überschüssiges Restmaterial

Die beim Einbau der Probe in die Prüfformen zusätzlich erforderlichen Schläge auf der 2. und 3. Einbaulage wurden von den Teilnehmern TA, TC und TF protokolliert. Von den Teilnehmern TA und TC wurde weiterhin die Masse des verbleibenden Restmaterials notiert (Tab. 6.2).

Die zusätzlich aufgebrauchte Einbauenergie erschwert den Vergleich der CBR<sub>F</sub>- mit den CBR<sub>0</sub>-Werten. Außerdem wird der Vergleich der Hebungen erschwert, da eine höhere Einregelung der Bodenteilchen wegen Unterschieden des Wassertransportes bei ansonsten gleichen Bedingungen das Frosthebungsverhalten verändert (BRANDL, 1977).

	MW alle	SD alle	MW neues FHG	SD neues FHG	MW andere FHG	SD andere FHG
CBR <sub>0</sub> -Wert – CBR <sub>F</sub> -Wert [%]						
Quarzit	-10,5	71,1	-59,9	58,2	48,6	19,7
Basalt	57,3	55,9	13,2	44,3	101,4	14,3
Lavaschlacke	-8,6	26,5	-22,5	23,4	14,6	8,1
RC-Beton mit 30 M.-% Ziegel	-6,3	36,7	-9,4	40,2	9,3	-
BS-Splitt-Gemisch mit 30 M.-% Ziegel	2,7	33,8	-2,0	35,5	26,3	-
EOS	4,3	47,2	-7,0	58,7	23,1	7,8
SE-Boden	-17,1	23,7	-18,8	25,5	-7,0	-
F3-Boden	-1,2	4,0	-2,8	3,7	1,5	3,2
F3-Boden + Kalk	62,6	31,6	45,7	22,7	85,2	29,8

Tab. 6.3: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der Abnahme der CBR-Werte nach Befrostung

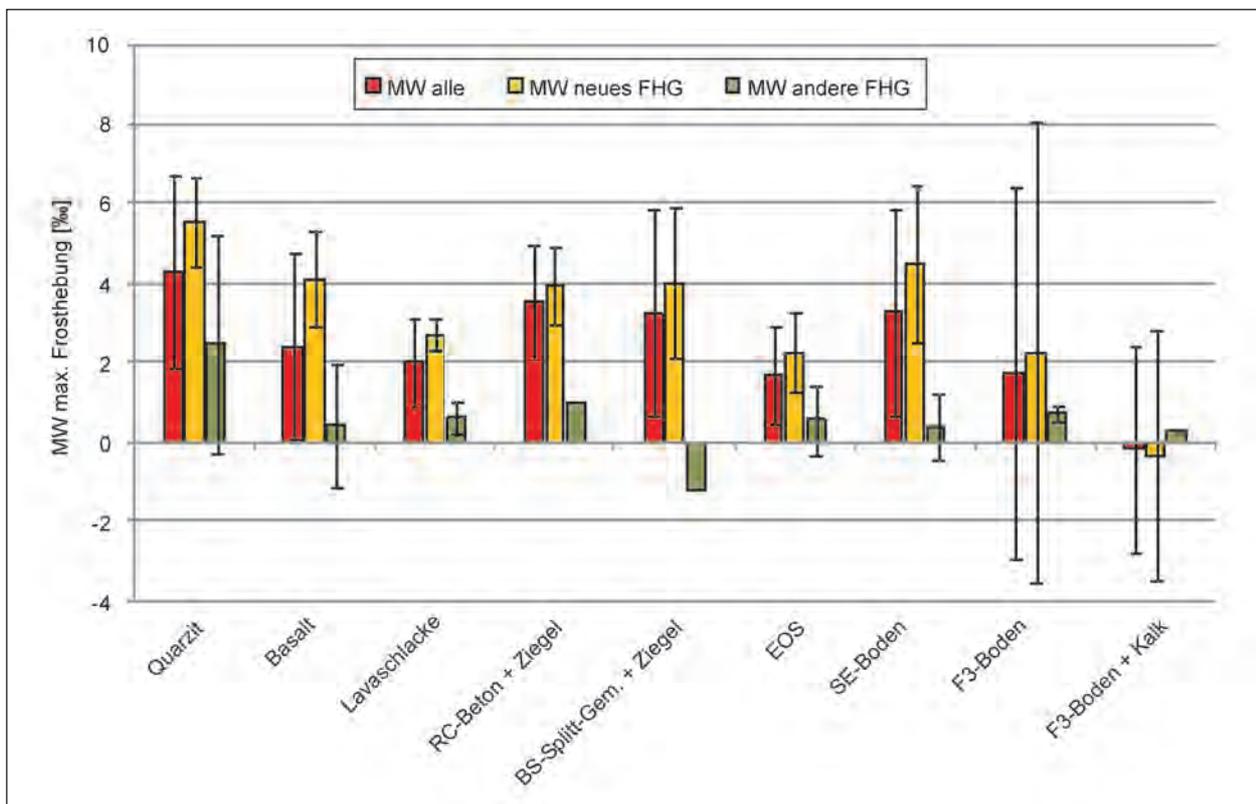


Bild 6.8: Mittelwerte und Standardabweichungen der Quellung in der Temperierungsphase [‰]

#### 6.4.3 Quellung in der Temperierungsphase

Die grafischen Hebevverläufe der Einzelversuche zeigen, dass die Temperierungsphase von 24 Stunden bei allen Materialien, abgesehen vom F3-Boden, ausreichend war, um einen Abschluss des Quellvorganges zu erreichen.

Die nach der Temperierungsphase bestimmten Quellungen variieren im Mittel zwischen minimal -0,2 ‰ (kalkverbesserter F3-Boden) und maximal

4,3 ‰ (Quarzit). Die im neuen Frosthebungsgerät gemessenen MW sind mit Ausnahme einer Setzung in der Temperierungsphase beim kalkverbesserten F3-Boden mit 2,3 ‰ bis 5,5 ‰ um den Faktor 2,2 bis 10,3 höher als die in den anderen Geräten gemessenen Setzungen (Bild 6.8).

F3-Boden und kalkverbesserter F3-Boden weisen sehr große Varianzen bei der Quellung in der Temperierungsphase auf, die sich in sehr hohen SD widerspiegeln. Abgesehen von diesen beiden Mate-

	MW alle	SD alle	MW neues FHG	SD neues FHG	MW andere FHG	SD andere FHG
Quellung in der Temperierungsphase [%]						
Quarzit	4,3	2,4	5,5	1,1	2,5	2,7
Basalt	2,4	2,3	4,1	1,2	0,4	1,5
Lavaschlacke	2,0	1,1	2,7	0,4	0,6	0,4
RC-Beton + Ziegel	3,5	1,4	4,0	1,0	1,0	-
BS-Splitt-Gem. + Ziegel	3,2	2,6	4,0	1,9	-1,2	-
EOS	1,7	1,2	2,3	1,0	0,6	0,9
SE-Boden	3,3	2,6	4,5	2,0	0,4	0,8
F3-Boden	1,7	4,6	2,3	5,8	0,7	0,2
F3-Boden + Kalk	-0,2	2,6	-0,3	3,2	0,3	-
Maximale Frosthebung [%]						
Quarzit	32,3	9,3	29,4	7,5	37,2	11,0
Basalt	17,7	7,8	18,9	4,8	15,9	11,7
Lavaschlacke	4,0	0,9	4,0	1,1	3,7	0,5
RC-Beton mit 30 M.-% Ziegel	32,0	12,1	28,2	7,5	54,7	-
BS-Splitt-Gemisch mit 30 M.-% Ziegel	26,6	11,3	28,5	11,1	15,2	-
EOS	14,5	6,1	16,3	6,1	9,1	0,5
SE-Boden	2,3	1,8	1,4	0,8	4,9	0,4
F3-Boden	50,6	31,9	53,6	35,6	44,7	28,7
F3-Boden + Kalk	36,8	7,0	36,8	7,0	-	-
Verbleibende Resthebung [%]						
Quarzit	7,2	4,1	5,5	2,2	10,1	5,3
Basalt	3,0	2,0	3,9	1,8	1,7	1,8
Lavaschlacke	0,7	1,5	1,5	0,5	-1,6	0,5
RC-Beton mit 30 M.-% Ziegel	5,7	2,7	4,9	1,7	10,8	-
BS-Splitt-Gemisch mit 30 M.-% Ziegel	4,9	2,7	5,6	2,1	0,5	-
EOS	2,1	2,2	2,8	2,1	0,0	0,0
SE-Boden	-0,1	0,7	-0,3	0,7	0,4	0,4
F3-Boden	12,2	7,8	11,7	7,5	13,1	10,2
F3-Boden + Kalk	9,3	4,7	9,3	4,7	-	-
Maßgebende FH-geschwindigkeit [%/d]						
Quarzit	2,6	1,5	3,3	0,9	1,4	1,7
Basalt	1,5	0,6	1,6	0,6	1,4	0,7
Lavaschlacke	0,6	0,6	0,3	0,2	1,5	0,2
RC-Beton mit 30 M.-% Ziegel	3,3	4,2	1,7	0,9	12,6	-
BS-Splitt-Gemisch mit 30 M.-% Ziegel	2,3	0,7	2,3	0,8	2,6	-
EOS	0,7	0,6	1,0	0,5	0,0	0,0
SE-Boden	0,2	0,3	0,1	0,2	0,6	0,1
F3-Boden	6,7	5,2	7,6	6,3	4,9	1,6
F3-Boden + Kalk	8,1	2,5	8,1	2,5	-	-
Wassergehalte nach Probenabbau, gemittelt über die gesamte Probe [%]						
Quarzit	6,1	1,4	6,0	0,4	6,3	2,2
Basalt	5,0	0,6	5,4	0,6	4,6	0,2
Lavaschlacke	11,5	1,1	12,0	0,4	10,7	1,4
RC-Beton mit 30 M.-% Ziegel	14,5	0,7	14,7	0,5	13,2	-
BS-Splitt-Gemisch mit 30 M.-% Ziegel	12,9	0,4	12,8	0,5	13,0	-
EOS	11,1	0,7	11,2	0,9	10,8	0,1
SE-Boden	14,7	1,2	15,2	0,5	13,6	1,5
F3-Boden	17,5	0,7	17,3	0,7	17,9	0,6
F3-Boden + Kalk	20,2	1,4	19,3	0,7	21,9	29,8

Tab. 6.4: Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) der Hebungen, der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit und der Wassergehalte nach Abbau

rialien liegen die SD aller Frosthebungsgeräte mit 1,1 ‰ (Lavaschlacke) bis 2,4 ‰ (Quarzit) zwischen 55 % und 96 % der Mittelwerte.

Die SD sinken auf 15 % bis 47 % ab, wenn nur die neuen Frosthebungsgeräte verglichen werden. Die SD der Versuche, die nicht im neuen Frosthebungsgerät durchgeführt wurden, sind bei Quarzit und Basalt vergleichsweise höher, über die anderen Materialien kann auf Grund der geringen Versuchsanzahl keine Aussage getroffen werden.

#### 6.4.4 Maximale Frosthebung

Anhand der Frosthebungskurven ist während der Befrostung eine deutliche Abflachung der Befrostungskurve erkennbar. Nach dem Erreichen des Wendepunktes reduziert sich die Frosthebungsgeschwindigkeit und die danach eintretenden Frosthebungen sind deutlich geringer als vorher.

Die MW der max. Frosthebungen (Bild 6.9) liegen zwischen minimal 2,3 ‰ (SE-Boden) und maximal 50,6 ‰ (F3-Boden).

Es können vier Gruppen gebildet werden: Lavaschlacke und SE-Boden zeigen mit MW von 4,0 ‰ und 2,3 ‰ sehr geringe maximale Frosthebungen.

Im mittleren Bereich liegen Basalt (17,7 ‰) und die EOS (14,5 ‰). Größere max. Frosthebungen zeigen Quarzit (32,3 ‰), RC-Beton (32,0 ‰) und BS-Splitt-Gemisch (26,6 ‰). Der kalkbehandelte F3-Boden (36,8 ‰) und der unbehandelte F3-Boden (50,6 ‰) zeigen sehr hohe max. Frosthebungen.

Neben diesen sehr hohen max. Frosthebungen sind beim F3-Boden die hohen SD von 28,7 ‰ bis 35,6 ‰ (63,0 bis 66,4 % der MW) auffällig. Die übrigen Materialien zeigen SD, die zwischen 19 % und 44 % der MW liegen mit Ausnahme des SE-Bodens, der bei einer sehr kleinen max. Frosthebung von 2,3 ‰ (MW) eine SD von 1,8 ‰ (78 % des MW) aufweist.

Die in den neuen Frosthebungsgeräten bestimmten maximalen Frosthebungen weichen nur geringfügig von den MW aller Geräte ab, die SD sind im Vergleich zu der Auswertung aller Versuche geringfügig besser.

Mit anderen Frosthebungsgeräten sind nur am Quarzit und Basalt jeweils vier Versuche durchgeführt worden. Der MW von Quarzit liegt mit 37,2 ‰ um 4,9 ‰ über dem MW aller Frosthebungsversuche an Quarzit, der MW von Basalt liegt geringfügig

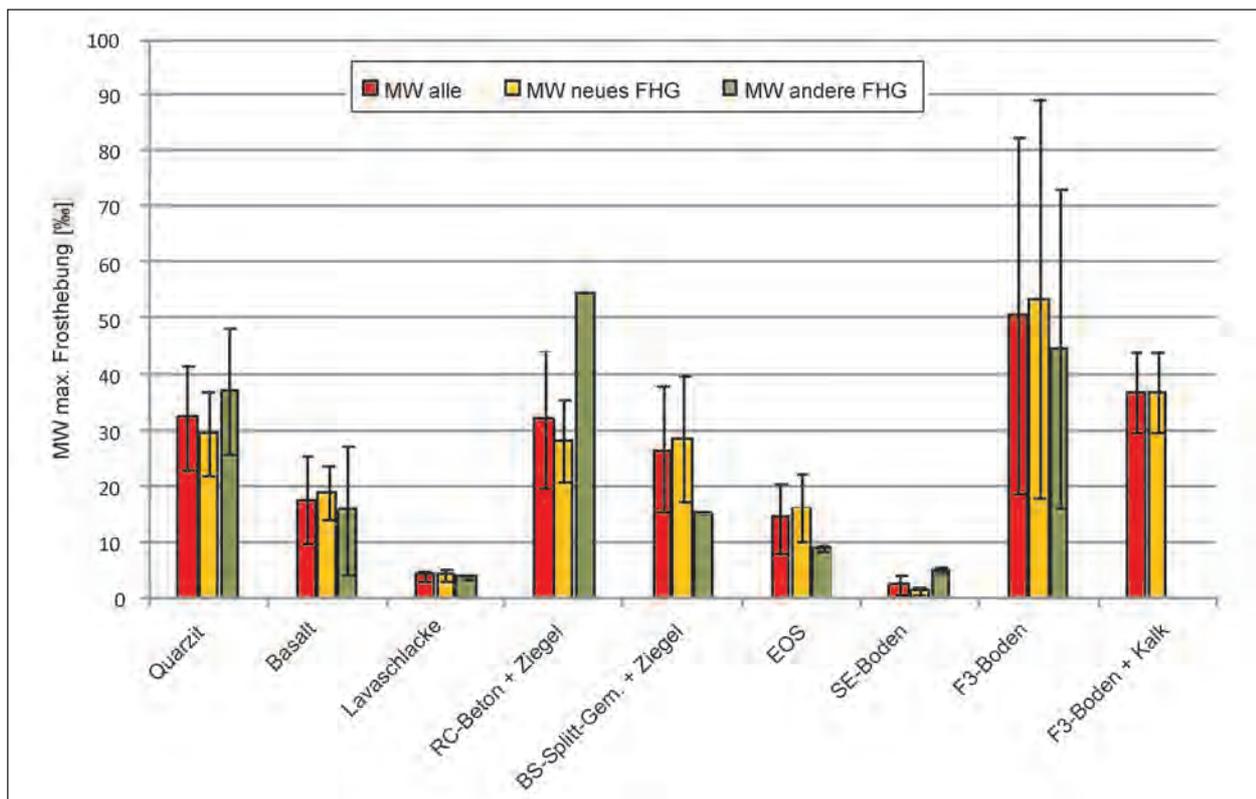


Bild 6.9: Mittelwerte und Standardabweichungen der maximalen Frosthebung [%]

unterhalb des allgemeinen MW von Basalt. Die SD der Versuchswerte der anderen Frosthebungsgeräte sind bei diesen beiden Materialien höher als die SD dieser Versuche an neuen Frosthebungsgeräte.

#### 6.4.5 Verbleibende Resthebung

Die MW der verbleibenden Resthebungen (Bild 6.10) liegen zwischen  $-0,1$  ‰ (SE-Boden) und  $12,2$  ‰ (F3-Boden). Es können die gleichen Gruppen wie bei der maximalen Frosthebung gebildet werden: Eine sehr geringe mittlere verbleibende Resthebung zeigt die Lavaschlacke ( $0,7$  ‰), der SE-Boden zeigt eine negative verbleibende Resthebung ( $-0,1$  ‰). Mittlere Werte erreichen der Basalt ( $3,0$  ‰) und die EOS ( $2,1$  ‰). Die verbleibenden Resthebungen von Quarzit ( $7,2$  ‰), RC-Beton ( $5,7$  ‰) und BS-Splitt-Gemisch ( $4,9$  ‰) erreichen ein höheres Niveau. Beim kalkbehandelten F3-Boden ( $9,3$  ‰) und beim unbehandelten F3-Boden ( $12,2$  ‰) wurden die höchsten MW bestimmt.

Die MW des neuen Frosthebungsgerätes weichen nur wenig von den Gesamt-MW ab. Die MW der anderen Frosthebungsgeräte zeigen höhere Abweichungen vom Gesamt-MW mit uneinheitlichen Tendenzen.

Die SD beträgt zwischen  $2,7$  ‰ (RC-Beton;  $47,2$  ‰ des MW) und im Vergleich zum MW sehr hohen  $0,7$  ‰ bei der Lavaschlacke ( $215,4$  ‰ des MW) und beim SE-Boden ( $608$  ‰ des MW). Die Standardabweichung ist also bei sehr geringen verbleibenden Resthebungen sehr groß, aber auch für Materialien mit größeren Hebungswerten ist sie unbefriedigend hoch. Die SD der Werte der neuen Geräte sind immer geringfügig niedriger als die SD aller Geräte.

#### 6.4.6 Maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit

Die ermittelten maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten sind materialspezifisch sehr unterschiedlich. Auf Grund des stetigen Anstieges der Frosthebung beim unbehandelten und beim kalkbehandelten F3-Boden sind bei beiden Materialien die MW der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit (Bild 6.11) mit  $6,7$  ‰/d und  $8,1$  ‰/d sehr hoch, beinhalten mit SD von  $5,2$  ‰/d bzw.  $2,5$  ‰/d allerdings auch große Unsicherheiten. Bei den übrigen Materialien betragen die maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten im Mittel zwischen  $0,2$  ‰ beim SE-Boden und  $3,3$  ‰/d beim RC-Beton mit hohen Varianzen.

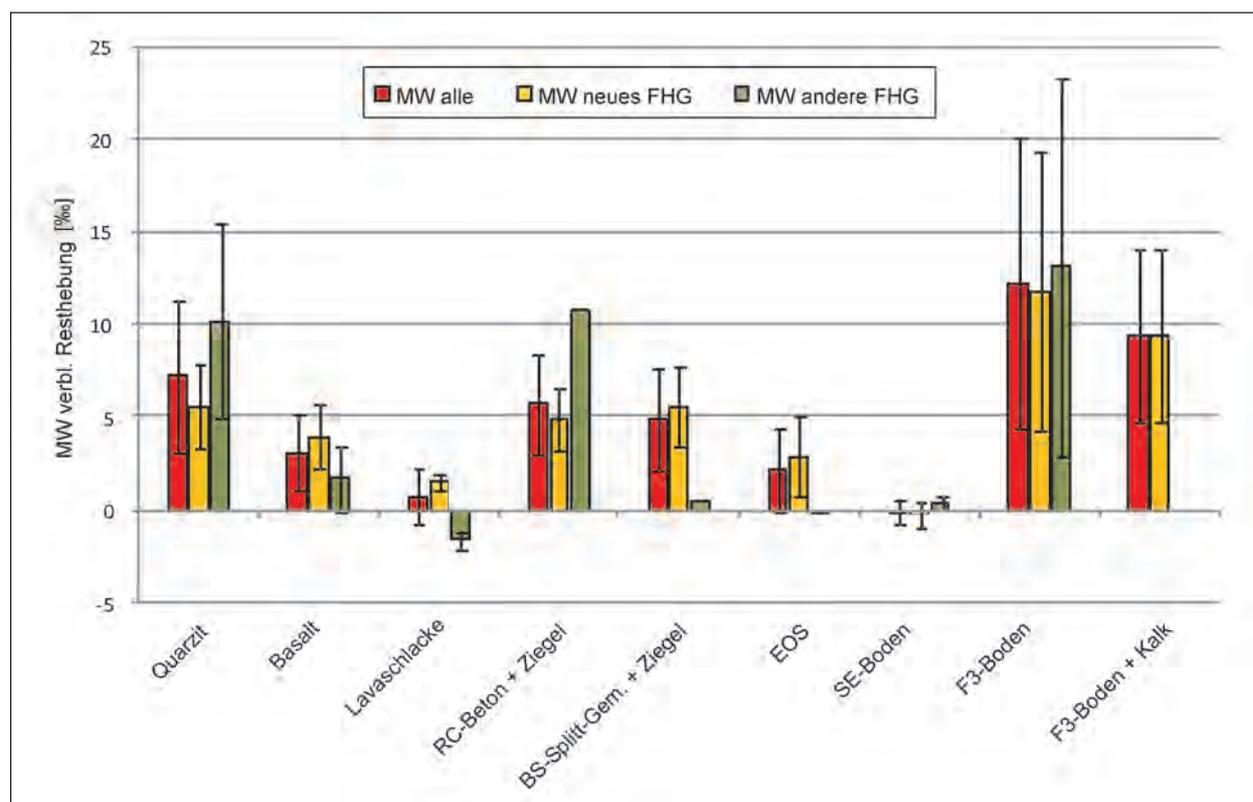
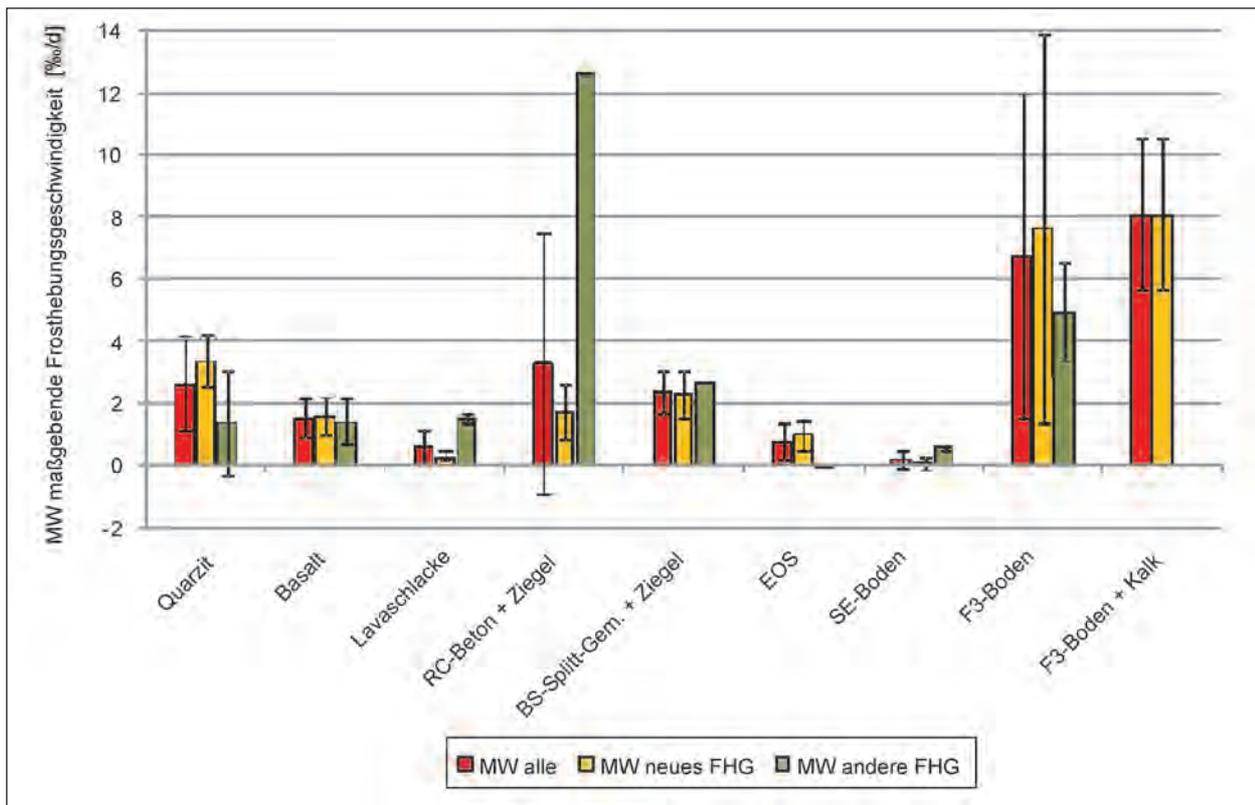


Bild 6.10: Mittelwerte und Standardabweichungen der verbleibenden Resthebung [‰]



**Bild 6.11:** Mittelwerte und Standardabweichungen der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit [%/d]

Der Vergleich der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten bestätigt die Gruppen, die anhand der maximalen und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten gebildet werden können. Sehr niedrige mittlere Werte zeigen die Lavaschlacke (0,6 %/d) und der SE-Boden (0,2 %/d), mittlere Werte werden vom Basalt (1,5 %/d) und der EOS (0,7 %/d) erreicht, die von der nächsten Gruppe, die aus Quarzit (2,6 %/d), RC-Beton (3,3 %/d) und BS-Splitt-Gemisch (2,3 %/d) gebildet wird, gefolgt wird. Unbehandelter und kalkbehandelter F3-Boden zeigen sehr hohe maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeiten, die sich deutlich von den anderen Hebungsgeschwindigkeiten abheben.

Abgesehen von den F3-Böden und dem SE-Boden sind die SD der im neuen Frosthebungsgerät durchgeführten Versuche geringer, aber immer noch unbefriedigend.

Relativ zum Absolutwert sind die SD bei geringer maßgebender Frosthebungsgeschwindigkeit höher als bei größeren Hebungsgeschwindigkeiten.

#### 6.4.7 Beginn der Eislinsenbildung

In Tabelle 6.5 ist der Beginn der Eislinsenbildung, der in den Versuchsdiagrammen am Kurvenverlauf

der Frosthebung, der Probenmitten- und der Kühlkopftemperatur erkennbar ist, aufgelistet.

Abgesehen vom Teilnehmer TE kann über den Beginn der Eislinsenbildung bei den „alten“ Frosthebungsgeräten keine Aussage gemacht werden, weil die Aufzeichnungsintervalle nicht klein genug sind (Teilnehmer TF) bzw. keine Diagramme vorliegen (Teilnehmer TG).

Mit Ausnahme des Versuches V7.4 (SE-Boden) wird bei allen anderen Versuchen der Beginn der Eislinsenbildung während der Absenkphase erreicht, wenngleich bei einigen Versuchen nur knapp (V7.2 (SE-Boden), V8.3, V8.4 (F3-Boden), V9.3, V9.4 (kalkverbesselter F3-Boden)).

Der Beginn der Eislinsenbildung ist materialabhängig unterschiedlich. Bei Betrachtung der einzelnen Materialien ist, von den nachfolgend aufgeführten Abweichungen abgesehen, eine relativ gute Übereinstimmung der einzelnen Versuche erkennbar, was durch die z. T. geringen SD (Quarzit, Basalt, SE-Boden) bestätigt wird.

Auffallend ist der teilweise sehr frühe Beginn der Eislinsenbildung beim Teilnehmer TD (V5.7, V4.7, V5.7, V8.7 und V9.7). Bei einigen dieser Versuche ist in den Diagrammen eine unterdurchschnittliche

Material \ Teilnehmer	TA1	TA2	TB1	TB2	TC1	TC2	TD	TE	TF1	TF2	TG1	TG2	MW	SD
Quarzit	4,2	5,0	4,2	3,9			4,3	[4,6]					4,3	0,4
Basalt	3,2	3,4	3,4	3,3	2,9		2,6	[4,4]					3,1	0,3
Lavaschlacke	3,5	4,7	2,8	2,5	2,0		2,2	[4,4]					3,0	1,0
RC-Beton mit 30 M-% Ziegel	3,8	4,4	3,8	4,0	3,2		1,2	4,6					3,6	1,1
BS-Splitt-Gem. + 30 M-% Ziegel	3,9	3,9	2,7	3,4	3,7		1,2	4,2					3,3	1,0
EOS	3,4	4,3	2,2	2,6	3,1		3,3	-					3,2	0,7
Grobkörniger Boden (SE)	4,4	4,9	4,2	5,1	3,8	-	3,9	[4,2]					4,4	0,5
F3-Boden	4,0	4,3	4,8	4,7	4,3		1,9	4,6					4,1	1,0
F3-Boden mit Kalkhydrat	4,8	4,2	4,7	4,8	4,4	4,4	2,4	-					4,2	0,8

	kein Versuch durchgeführt
	keine grafische Darstellung vorhanden
	Fehlversuch. Frosthebungsbeginn nicht erkennbar; für die Auswertung nicht berücksichtigt
	Fehlversuch. Frosthebungsbeginn erkennbar; für die Auswertung jedoch nicht berücksichtigt

Tab. 6.5: Beginn der Eislinsenbildung

Temperatur des Kühlkopfes erkennbar, was eventuell auf die vom Teilnehmer beobachteten Schwierigkeiten bei der Herstellung des Kontaktes beim Temperaturfühler in Probenmitte zurückzuführen ist. Bei beiden Materialien mit Ziegelanteil (V4.7 und V5.7) beispielsweise beginnt die Eislinsenbildung schon nach 1,2 Tagen, d. h. fast unmittelbar nach Einsetzen der Befrostung nach der Temperierungsphase von 24 Stunden. Wenn für die MW-Bildung diese Versuche unberücksichtigt bleiben, beginnt die Eislinsenbildung der beiden Materialien nach im Mittel 4,0 resp. 3,6 Tagen erheblich später.

Abgesehen von diesen Versuchen fallen zwei weitere, V3.6 und V6.3, mit frühem Eislinsenbeginn auf. Die Kühlkopf Temperatur ist bei beiden Versuchen nicht außergewöhnlich, der Grund für den frühen Beginn der Eislinsenbildung ist unbekannt.

Ohne Berücksichtigung der Versuche mit frühem Eislinsenbeginn sinkt die SD von 0,8 d (F3-Boden + Kalk) bis 1,1 d (RC-Beton + Ziegel) um durchschnittlich 0,5 d auf 0,3 d bis 0,5 d.

#### 6.4.8 Wassergehalt

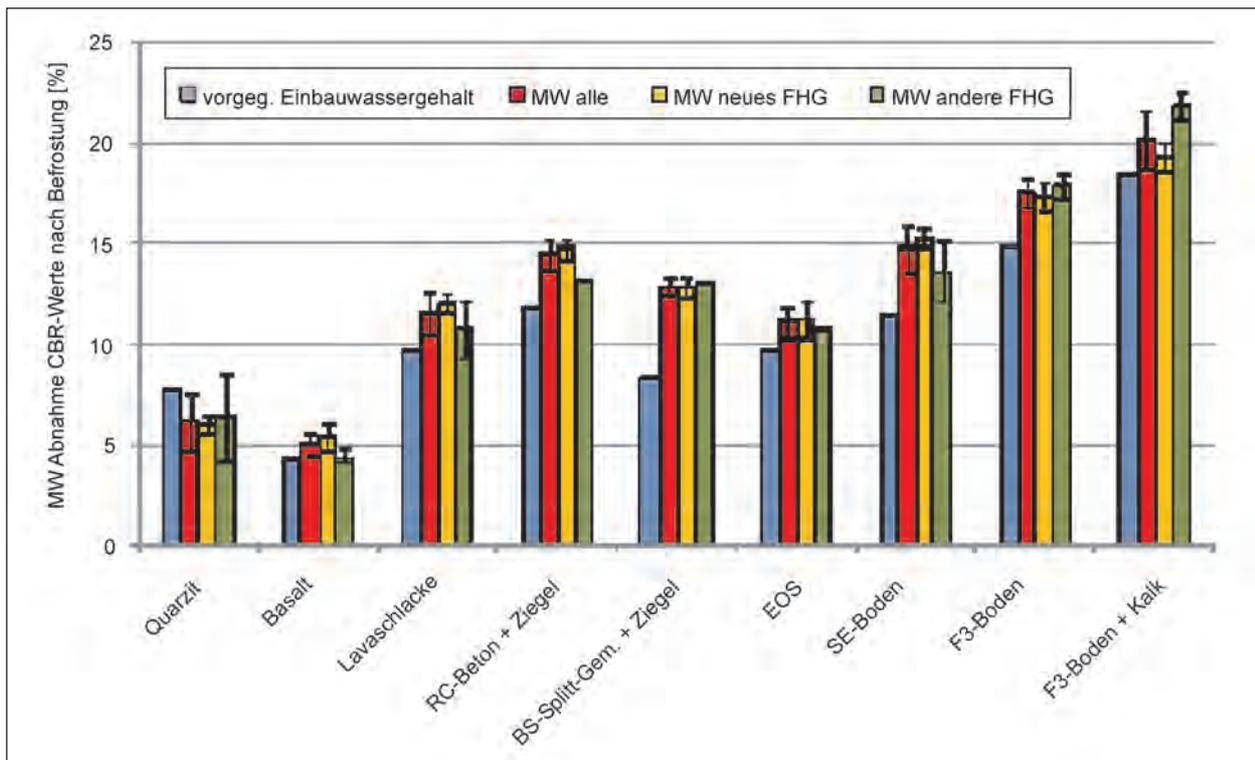
Nur von den Teilnehmern TA und TC wurden die Einbauwassergehalte explizit bestimmt. Die Schwankungen dieser Einbauwassergehalte sind i. d. R. kleiner als 1 M.-% im Vergleich zum vorgegebenen Einbauwassergehalt. Der unbehandelte F3-Boden wurde vom Teilnehmer TA mit + 1,8 M.-% resp. + 2,4 M.-%, verglichen mit dem vorgegebenen Wassergehalt ( $w_{pr} = 14,8$  M.-%) eingebaut.

Noch größer sind die Differenzen beim Quarzit: Der vorgegebene, im Vergleich zum optimalen Wassergehalt reduzierte Wassergehalt betrug 7,8 M.-%. Teilnehmer TA baute das Material mit Wassergehalten von nur 3,5 M.-% resp. 5,0 M.-% ein, Teilnehmer TC dagegen mit deutlich erhöhten Wassergehalten von 12,4 M.-% resp. 14,7 M.-%.

Die Wassergehaltsbestimmungen nach Ausbau wurden nach Versuchsende, d. h. 24 Stunden nach dem Ende der Befrostung und nach Durchführung der CBR-Versuche unterhalb des CBR-Stempels, in Probenmitte und an der Probenunterseite durchgeführt. In den meisten Fällen unterscheiden sich die drei Wassergehalte nur gering, da während der Auftauphase eine Angleichung der Wassergehalte über die Probenhöhe erfolgt (Bild 6.12). Für die weitere Auswertung werden daher Mittelwerte der jeweils drei Messwerte jedes Versuches gebildet.

Die in der Arbeitsanweisung (Anlage 1) vorgegebenen Einbauwassergehalte von Basalt, RC-Beton mit Ziegel, EOS und dem unbehandelten und kalkbehandelten F3-Boden entsprechen den optimalen Wassergehalten  $w_{pr}$ . Beim Quarzit, der Lavaschlacke und dem SE-Boden wurde der Einbauwassergehalt um 2,0 M.-%, beim BS-Splitt-Gemisch um 4,0 M.-% reduziert, um den bei diesen Materialien beobachteten Wasseraustritt beim Einbau mit optimalem Wassergehalt zu verhindern.

Während der 24-stündigen Temperierungsphase können die eingebauten Proben Wasser nachsaugen, bevor die Befrostung beginnt. Etwaige Unter-



**Bild 6.12:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Wassergehalte nach Ausbau: Probenoberseite, Mitte der Probe und unterer Teil der Probe [M.-%]

schiede der Einbauwassergehalte sollten sich während dieser Zeitspanne ausgleichen.

Mit Ausnahme des Quarzits nimmt der Ausbauwassergehalt im Vergleich zum vorgegebenen Einbauwassergehalt bei allen Materialien zu. Die Zunahme beträgt zwischen +0,7 M.-% (Basalt) und +3,3 M.-% (SE-Boden) bzw. 4,6 M.-% (BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel).

Die Unterschiede zwischen den MW der Wassergehalte beim neuen Geräte und den anderen Frosthebungsgeräten sind vorhanden, es lässt sich aber kein allgemein gültiger Trend erkennen (Bild 6.12). Generell sind die SD der Wassergehalte gering, die Messwerte stimmen relativ gut überein.

#### 6.4.9 CBR-Werte

Bei Vergleich aller  $CBR_F$ -Werte nach Befrostung fällt zunächst auf, dass nur beim Basalt und beim kalkbehandelten Boden nach Befrostung deutliche Abnahmen messbar sind. Bei allen anderen Materialien ist die Differenz zwischen  $CBR_0$ -Wert und  $CBR_F$ -Wert nur gering bzw. die MW nehmen geringfügig zu (negative Werte; Bild 6.13). Die SD sind sehr hoch und übertreffen die Mittelwerte teilweise um mehr als eine Zehnerpotenz (Tabelle 6.3).

Bei Vergleich der Messwerte der im neuen und in den anderen Frosthebungsgeräten durchgeführten Versuche fällt auf, dass die meisten Mittelwerte der CBR-Messungen nach der Versuchsdurchführung im neuen Gerät zunehmen und hohe SD zeigen. Die in den anderen Frosthebungsgeräten durchgeführten Versuche zeigen dagegen im Mittel eine Abnahme der Druckfestigkeit nach Befrostung mit einer höheren Übereinstimmung der Messwerte. Da jedoch nur von Quarzit und Basalt jeweils 5 Messwerte vorliegen, von den anderen Materialien dagegen nur maximal 3 Messwerte, ist diese Tendenz unsicher.

Auffallend sind die relativ hohen Tragfähigkeitsabnahmen nach Befrostung beim Basalt und beim kalkbehandelten F3-Boden. Ein Vergleich der  $CBR_F$ -Werte des Basaltes zeigt große Differenzen der Werte mit und ohne Nullpunktkorrektur.

#### 6.4.10 Kornverteilung nach Befrostung

Die Kornverfeinerung rührt sowohl von der Einbaubeanspruchung als auch von der Frostbeanspruchung her. Eine Differenzierung dieser Beanspruchungen ist nicht möglich.

In den Anlagen 6.1 bis 6.4 sind die Kornverteilungskurven der einzelnen Materialien vor und nach

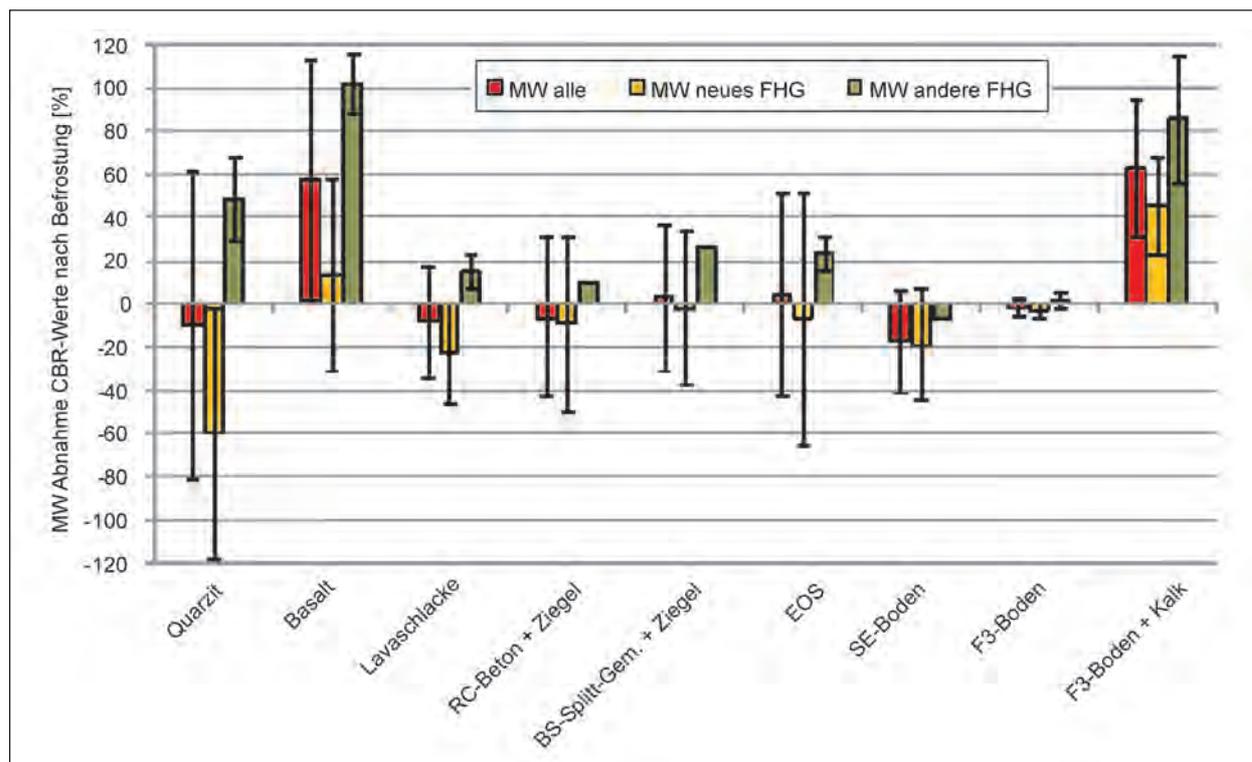


Bild 6.13: Abnahme der  $CBR_F$ -Werte (nach Befrostung): Mittelwerte und Standardabweichung [%]

Befrostung dargestellt. Die dickere Linie bildet die Kornverteilung vor Befrostung ab, die dünneren Linien die Kornverteilung nach Einbau, Verdichtung und Befrostung, die von den Teilnehmern TA, TB und TC bestimmt wurden.

Von den Teilnehmern TA und TB wurde der korrekte Siebsatz gemäß TL SoB-StB (DIN EN 933-1), vom Teilnehmer TC der Siebsatz gemäß DIN 18123 benutzt. Dies ist die Ursache für den divergierenden Kurvenverlauf im Grobsand und Feinkiesbereich.

Die Kornverfeinerung ist vor allen Dingen im Schluffkorn- und Feinsandbereich feststellbar. Beim BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel und beim SE-Boden ist sie relativ gering, am größten ist sie bei der Lavaschlacke. Die anderen Materialien liegen dazwischen.

Tabelle 6.6 zeigt die Zunahme des Kornanteils  $< 0,063$  mm, der für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit gemäß dem Korngrößenkriterium entscheidend ist. Die natürlichen Materialien Quarzit, Basalt und Lavaschlacke zeigen nur eine geringe Zunahme zwischen 0 M.-% und 0,2 M.-%. Die RC-Materialien RC-Beton mit Ziegel, BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel und EOS zeigen eine Zunahme von 0,9 M.-% bis 1,2 M.-%. Der SE-Boden (+ 0,9

	Kornanteil $< 0,063$ mm [M.-%]	Kornanteil $< 0,063$ mm nach FHV [M.-%]	Zunahme Kornanteil $< 0,063$ mm [M.-%]
Quarzit	5,3	5,5	0,2
Basalt	4,0	4,2	0,2
Lavaschlacke	3,3	3,3	0,0
RC-Beton + Ziegel	2,6	3,5	0,9
BS-Splitt-Gemisch + Ziegel	5,3	6,5	1,2
EOS	3,9	5,0	1,1
SE-Boden	0,2	1,1	0,9

Tab. 6.6: Zunahme des Kornanteils  $< 0,063$  mm nach Befrostung

M.-%) zeigt eine Zunahme in der Größenordnung der RC-Materialien.

## 6.5 Zusammenfassende Beurteilung der Versuchsergebnisse

Allgemein gültige Aussagen zu den durchgeführten Versuchen sind wegen der inhomogenen Datengrundlage nur eingeschränkt möglich.

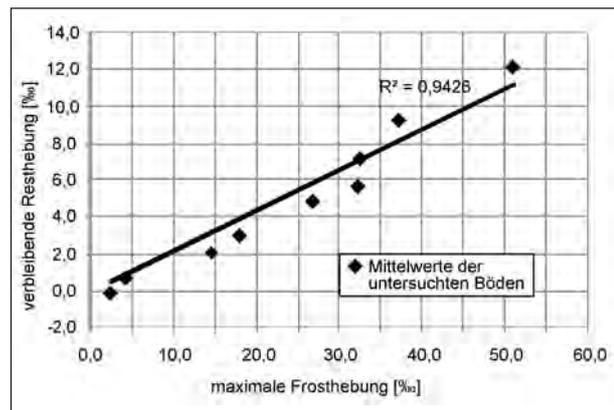
Die folgenden Bewertungen der Versuchsergebnisse geben Tendenzen wieder und sollten durch weitere Auswertungen von Frosthebungsversuchen überprüft werden.

Die Festlegungen für die Zeiträume der einzelnen Versuchsphasen sind ausreichend. In der Temperierungsphase wird die Quellung der Materialien erreicht. Die Absenkphase ist, abgesehen von wenigen Versuchen, ausreichend, damit sich während dieser vier Tage die 0°C-Isotherme in Probenmitte einstellt. Während der 3-tägigen Befrostungsphase zeigen die Hebungsverläufe i. d. R. eine Abflachung, sodass danach keine wesentlichen Erhöhungen der maximalen Hebung mehr zu erwarten sind. Beim unbehandelten und kalkverbesserten F3-Boden ist keine deutliche Abflachung des Hebungsverlaufes erkennbar, was sich in hohen Werten der verbleibenden Resthebung zeigt. Die verbleibende Resthebung eignet sich zur Abschätzung der Abflachung der Hebungstendenz. Nach der 24-stündigen Auftauphase waren alle befrosten Proben vollständig aufgetaut.

Die Streubreite der Messwerte ist unterschiedlich, aber grundsätzlich hoch. Insbesondere bei kleinen Messwerten der Hebungen (Quellung in der Temperierungsphase, maximale Frosthebung, verbleibende Frosthebung) und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit sind die Standardabweichungen prozentual zu den Mittelwerten hoch. Dies zeigt, dass die Frosthebungen messtechnisch zwar sehr genau gemessen werden können, die Ergebnisse der einzelnen Versuche jedoch größeren Schwankungen unterliegen.

Grund für die großen Schwankungen sind wahrscheinlich die unterschiedlichen Einbaubedingungen. Der uneinheitliche Energieeintrag beim Einbau verursacht eine uneinheitliche Einregelung der Bodenteilchen und damit eine unterschiedliche Wasserdurchlässigkeit. Ein wesentlicher weiterer Unterschied besteht darin, dass die Probenzylinder vor dem Einbau in das neue Frosthebungsgerät über Kopf gedreht werden, beim Einbau in die anderen Frosthebungsgeräte jedoch nicht. Ein qualitativer Vergleich der Messwerte sowie der daraus ermittelten Hebungen und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit zwischen den Versuchen im neuen Frosthebungsgerät (Teilnehmer TA bis TD) und den Geräten der Teilnehmer TE, TF und TG ist daher nur eingeschränkt möglich.

Sehr deutlich ist der Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Einbaubedingungen bei den



**Bild 6.14:** Korrelation zwischen max. Frosthebung und verbleibender Resthebung

Quellungen in der Temperierungsphase erkennbar. Beim Vergleich der MW der Quellung fällt auf, dass die Quellungen der im neuen Frosthebungsgerät durchgeführten Versuche fast alle deutlich höher sind als die Quellungen der Versuche, die in den anderen Geräten durchgeführt wurden.

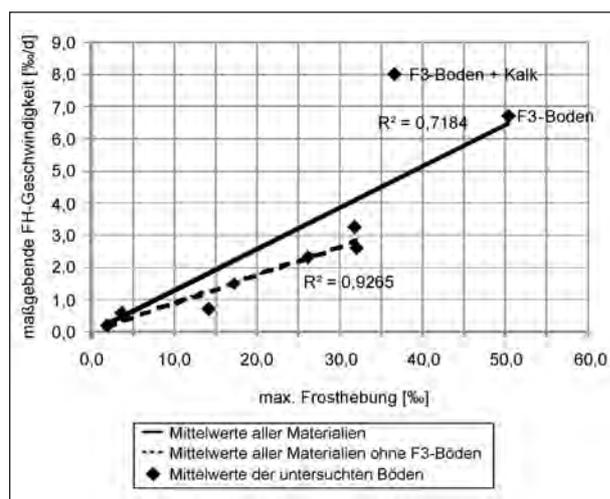
Zwischen der maximalen Frosthebung und der verbleibenden Resthebung besteht eine lineare Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,9426$  (Bild 6.14). Eine große maximale Frosthebung verursacht bei den untersuchten Materialien also eine große verbleibende Resthebung.

Vor dem Hintergrund der großen SD beider Messgrößen ist die Aussagekraft dieses guten Bestimmtheitsmaßes allerdings nur beschränkt gültig.

Auch zwischen den Mittelwerten der maximalen Frosthebung und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit besteht eine lineare Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9265$ , wenn die beiden F3-Böden, bei denen untypische Kurvenverläufe mit hohen maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten festgestellt wurden, unberücksichtigt bleiben (Bild 6.15).

Das bedeutet, dass bei den Materialien, die die Kriterien für Frostschutzschichten erfüllen, ein enger Zusammenhang zwischen allen drei bestimmten Frosthebungsgrößen, d. h. der maximalen Frosthebung, der verbleibenden Resthebung und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit, besteht. Für die Aussagekraft dieser Feststellung gilt wegen der ebenfalls hohen SD der MW die gleiche Einschränkung wie oben.

Weiterhin ist festzustellen, dass die maximale Frosthebung nur dann aussagekräftig ist, wenn die



**Bild 6.15:** Korrelation zwischen max. Frosthebung und maßgebender Frosthebungsgeschwindigkeit

maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit ausreichend klein ist. Anderenfalls kann der weitere Verlauf der Frosthebungskurve nicht abgeschätzt werden und es ist mit weiterhin ansteigenden maximalen Frosthebungswerten zu rechnen.

Bei der materialspezifischen Betrachtung der Frosthebungen können die untersuchten Materialien zu Gruppen zusammengefasst werden. Wegen der engen Zusammenhänge der maximalen Frosthebung, der verbleibenden Resthebung und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit unterscheiden sich die Materialzuordnungen dieser drei Größen nicht voneinander.

Mit Ausnahme des unbehandelten und des kalkbehandelten Bodens erfüllen alle untersuchten Baustoffe bzw. Baustoffgemische die Anforderungen an Frostschutzmaterialien. Die insgesamt geringe Spreizung der materialspezifischen MW der Hebungen ist daher plausibel, da die Auswahl dieser Materialien die Begrenzung des Kornanteiles < 0,063 mm auf maximal 5 M.-% impliziert. Dadurch sind bei diesen Materialien relativ geringe Hebungen zu erwarten.

Im Mittel sehr geringe Hebungen und eine sehr geringe Frosthebungsgeschwindigkeit wurden bei der Lavaschlacke und dem SE-Boden gemessen. Werte im mittleren Bereich zeigen der Basalt und die EOS. Größere Hebungen und eine größere Frosthebungsgeschwindigkeit wurden beim Quarzit, dem RC-Beton mit Ziegel und dem BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel festgestellt. Die größten Werte wurden beim unbehandelten und dem kalkbehandelten F3-Boden gemessen.

Gruppe	Material	maximale Frosthebung [%]	verbl. Resthebung [%]	maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit [%/d]
IV	unbehandelter F3-Boden	> 35	> 7,5	> 5,0
	kalkbehandelter F3-Boden			
III	BS-Splitt-Gemisch + Ziegel	20 - 35	4,0 - 7,5	2,0 - 5
	RC-Beton + Ziegel			
	Quarzit			
II	EOS	5 - 20	1,0 - 4,0	0,6 - 2,0
	Basalt			
I	SE-Boden	< 5	< 1,0	0 - 0,6
	Lavaschlacke			

**Tab. 6.7:** Gruppierung der Materialien anhand der MW der Hebungen und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit

In Tabelle 6.7 sind die Mittelwerte dieser Parameter zahlenmäßig gruppiert. Zwischen den einzelnen Parametern kann der lineare Zusammenhang prozentual ausgedrückt werden. Die verbleibende Resthebung beträgt etwa 1/5 der maximalen Frosthebung. Die Werte der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit betragen meistens ca. 1/10 der maximalen Frosthebung.

Von diesen Zusammenhängen sind die Versuche ausgenommen, bei denen keine Abschwächung der Hebungstendenz zu verzeichnen ist und bei denen daher hohe maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeiten bestimmt wurden, d. h. die Versuche am unbehandelten und kalkbehandelten F3-Boden.

Bei den Versuchen im neuen Frosthebungsgerät lässt sich bei den einzelnen Materialien ein Trend zu einem früheren oder späteren Beginn der Eislinnenbildung unterscheiden. Beim Vergleich der einzelnen Materialien hat dieser jedoch keinen Einfluss auf die Größe der Frosthebungen. Bei der Lavaschlacke beginnt die Eislinnenbildung z. B. nach durchschnittlich 3,0 Tagen, es werden jedoch sehr kleine Hebungen bestimmt. Der Eislinnenbeginn bei Quarzit erfolgt nach durchschnittlich 4,3 Tagen, hier werden jedoch relativ große Hebungen gemessen.

Beim Vergleich der Einzelversuche ist bei Quarzit, Basalt, Lavaschlacke, BS-Splitt-Gemisch und dem SE-Boden eine Tendenz zu größeren Frosthebun-

gen bei einem frühen Beginn der Eislinsenbildung erkennbar. Theoretisch ist dieser Zusammenhang damit zu begründen, dass bei einem frühen Beginn der Eislinsenbildung eine größere Zeitspanne zum Nachsaugen von Wasser zur Frostzone zur Verfügung steht, sodass größere Frosthebungen entstehen. Die Versuche der anderen Materialien bestätigen diesen Trend nicht.

Die Wassergehalte unterhalb des CBR-Stempels, in Probenmitte und im unteren Bereich der Probe nehmen im Vergleich zum Einbauwassergehalt außer beim Quarzit bei allen Materialien zu. Die Zunahme ist größer bei den Materialien, bei denen der Einbauwassergehalt im Vergleich zum optimalen Wassergehalt aus einbaupraktischen Gründen reduziert wurde, d. h. bei der Lavaschlacke, dem BS-Splitt-Gemisch und dem SE-Boden. Ob diese Zunahme schon während der Temperierungsphase erreicht wird oder sich der Wassergehalt erst während der Befrostung erhöht, kann aus versuchstechnischen Gründen nicht festgestellt werden. Die Wassergehaltsbestimmungen werden nicht zum Zeitpunkt des vollständigen Auftauens durchgeführt, sondern 24 Stunden nach Versuchsdurchführung, sodass ein ausreichender Zeitraum zur Angleichung des Wassergehaltes über den Probekörper zur Verfügung stand. Die Verteilung lässt darauf schließen, dass die Wassergehaltsverteilung gravimetrischen Grundsätzen folgt, d. h., der Wassergehalt nimmt tendenziell von oben nach unten geringfügig zu, es ist jedoch kein allgemein gültiger Trend erkennbar.

Die Interpretation der  $CBR_F$ -Werte ist sehr schwierig, weil die Messung der Tragfähigkeit durch viele Faktoren beeinflusst wird. Dies wird durch die im Vergleich zu den MW sehr hohen SD wiedergegeben.

Tendenziell zeigen die mittleren  $CBR_F$ -Werte mit Ausnahme des Basaltes und des kalkbehandelten F3-Bodens nach Befrostung in den neuen Frosthebungsgeräten eine Zunahme, während die  $CBR_F$ -Werte nach Befrostung in den anderen Geräten abnehmen. Zwischen dieser Tendenz und den Einbauunterschieden bei den neuen und den anderen Frosthebungsgeräten ist ein Zusammenhang zu vermuten. Einbautechnisch bedingt wird der CBR-Versuch nach Befrostung bei den für das neue Frosthebungsgerät präparierten Probekörpern auf der Seite durchgeführt, die während des Aufbringens der Verdichtungsarbeit unten lag, während der  $CBR_F$ -Versuch bei den Probekörpern der ande-

ren Geräte auf deren Oberseite durchgeführt wird. Es ergeben sich folgende Schwierigkeiten bei der Beurteilung der CBR-Werte:

1. Der  $CBR_0$ -Vergleichswert der unbefrostenen Probe wurde nach dem Einbringen der Proctorenergie im Proctortopf, d. h. auf der Oberseite der eingebauten Probe, bestimmt.
2. Die Verdichtungsenergie jeder Einbaulage nimmt von der Ober- zur Unterseite ab. Der auf der Unterseite einer Einbaulage gemessene CBR-Wert ist daher niedriger als ein auf der Oberseite gemessener Wert.
3. Die erste Einbaulage erfährt insgesamt eine höhere Verdichtungsenergie als die dritte Einbaulage.
4. Die für den Einbau aufgebrauchte Energie variiert stark, da auf der 2. und 3. Lage ggf. zusätzliche Schläge aufgebracht wurden (Kapitel 6.4.2).

Diese Unterschiede bei der Herstellung der Probekörper resultieren in einer sehr starken Streuung der  $CBR_F$ -Werte, die keine eindeutige Aussage über die Änderung der Tragfähigkeit nach Frosthebungsversuch erlauben.

Es ist jedoch festzuhalten, dass die  $CBR_F$ -Werte der im neuen und der in den anderen Frosthebungsgeräten durchgeführten Versuche mit Ausnahme des Basaltes und des kalkverbesserten Bodens im Mittel zunehmen oder nur gering abnehmen. Dieses Ergebnis bestätigt die Eignung der untersuchten Frostschutzmaterialien, die durch Frosteinwirkung bzw. eine Änderung des Wassergehaltes keine Abnahme der Tragfähigkeit aufweisen sollten.

Die große Abnahme der Tragfähigkeit beim Basalt relativiert sich bei Betrachtung der  $CBR_F$ -Werte mit und ohne Nullpunktkorrektur. Die großen Differenzen resultieren aus einer Auflockerung an der Probeneroberseite.

Die hohe Tragfähigkeitsabnahme beim kalkbehandelten F3-Boden entsteht durch die Abnahme von einem sehr hohen  $CBR_0$ -Wert von 105 % auf  $CBR_F$ -Werte von 35 % bis 80 %. Trotz der hohen Abnahme der CBR-Werte weist das Material auch nach Befrostung eine hohe Tragfähigkeit auf. Die außerordentlich große Abnahme auf 2,1 % (V9.9) und 3,1 % (V9.10; beide kalkbehandelter F3-Boden) ist nicht nachvollziehbar. Es ist zu vermuten, dass hier die vorgegebenen Anweisungen zur

Feuchtraumlagerung nicht berücksichtigt worden sind.

Die Kornverfeinerung durch Einbaubeanspruchung und Befrostung ist vergleichsweise gering. Abgesehen von der EOS, bei der sich bei einem Versuch die Zuordnung von der Frostempfindlichkeitsklasse F1 zu F2 ändert, ändert sich die ursprüngliche Zuordnung zur jeweiligen Frostempfindlichkeitsklasse nach Befrostung nicht.

Im Vergleich zu den natürlichen Baustoffen zeigen die rezyklierten Baustoffgemische bzw. die EOS eine höhere Zunahme des Kornanteils  $< 0,063$  mm. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit, nach Befrostung in eine höhere Frostempfindlichkeitsklasse zu wechseln.

Materialien, die nach dem Kornverteilungskriterium nach den ZTV E-StB der Frostempfindlichkeitsklasse F1 erfüllen, sind SE-Boden, Lavaschlacke, EOS und Basalt. Gemäß ihrer maximalen Hebung, der verbleibenden Resthebung und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit werden diese vier Materialien den Gruppen mit kleinen und mittleren Werten dieser Parameter zugeordnet. Der danach folgenden Gruppe mit höheren Versuchswerten gehören Quarzit, RC-Beton und BS-Splitt-Gemisch an, die nach ihrer Kornverteilung alle der Frostempfindlichkeitsklasse F2 zuzuordnen sind. Auffallend ist der relativ große Kornanteil von 4,5 M.-%  $< 0,02$  mm beim Quarzit, durch den vermutlich die höheren Hebungen bzw. die höhere maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit verursacht werden. Daneben fallen die hohen Hebungen beim RC-Beton auf. Obwohl er nach Kornverteilungskurve der Frostempfindlichkeitsklasse F1 zuzuordnen ist, sind die Hebungen mit denen des BS-Splitt-Gemisches bzw. des Quarzites vergleichbar. Diese beiden Materialien werden gemäß ihrer Kornverteilung im Unterschied zum RC-Beton jedoch der Frostempfindlichkeitsklasse F2 zugeordnet. Die Ergebnisse des Frosthebungsversuches zeigen hier einen Widerspruch zur Bewertung der Frostempfindlichkeit nach der Kornverteilung.

Der Vergleich der Hebungen und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten zwischen den natürlichen und den Recyclingmaterialien führt zum Schluss, dass die hier untersuchten Recyclingmaterialien bezüglich dieser Parameter mit denen der natürlichen Materialien vergleichbar sind. Die Lavaschlacke ist von den Frosthebungsparametern mit den günstigen Eigenschaften des SE-Bodens, die

Elektroofenschlacke (EOS) mit denen des Basaltes vergleichbar. RC-Beton mit Ziegel und BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel liegen im Bereich der Eigenschaften von Quarzit, der der Frostempfindlichkeitsklasse F2 zuzuordnen ist. Hier besteht ein Widerspruch zur Einstufung des RC-Betons in die Frostempfindlichkeitsklasse F1 nach seiner Kornverteilung.

Die Ergebnisse des unbehandelten F3-Bodens bestätigen die ursprüngliche Einschätzung eines nicht-frostsicheren Materials. Der F3-Boden, der durch die Kalkbehandlung eine Verbesserung seiner Frostempfindlichkeit in die Klasse F2 erfährt, liegt nach seinen Hebungen und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit zwischen der Gruppe aus Quarzit, RC-Beton und BS-Splitt-Gemisch und den Messwerten des unbehandelten Bodens. Die Ergebnisse des Frosthebungsversuches bestätigen die Einordnung in die Frostempfindlichkeitsklasse F2 nicht eindeutig.

## 7 Bewertung des neuen Frosthebungsgerätes und Änderungsvorschläge

### 7.1 Allgemeines

Der Frosthebungsversuch ist auf Grund der vielen Versuchsschritte und der Versuchsrandbedingungen anspruchsvoll und stellt hohe personelle Anforderung. Durch die Programmierung der Temperatursteuerung und die automatische Durchführung der Messungen und die automatische Datenspeicherung ist die Durchführung im neuen Frosthebungsgerät vereinfacht. Trotz der sehr genauen Arbeitsanweisung (Anlage 2) stellte sich beim Vergleich der Versuche jedoch heraus, dass bei den nicht-automatisierten Arbeitsschritten, insbesondere bei der Probenvorbereitung, noch Konkretisierungsbedarf besteht.

Wichtig ist daher die Erarbeitung einer Technischen Prüfvorschrift für die Durchführung des Frosthebungsversuches, in der die Erkenntnisse der Vergleichsuntersuchungen berücksichtigt und eingebracht werden.

### 7.2 Probenvorbereitung und Einbau der Proben in den Prüfzylinder

Gemäß HEITZER (1981) sollten Böden für die Durchführung des Frosthebungsversuches einen

natürlichen Zustand aufweisen und daher mit ihrem natürlichen Wassergehalt verwendet werden. Dies ist für natürliche Böden der anzustrebende Zustand für die Durchführung des Frosthebungsversuches.

Beim Ringversuch wurden abgesehen vom F3-Boden natürliche und rezyklierte Böden und Baustoffgemische zum Einbau in ungebundene Schichten bzw. Frostschutzschichten untersucht, die gemäß ZTV SoB mit optimalem Wassergehalt eingebaut werden müssen. Daher konnte von der Forderung HEITZERs abgewichen werden. Die genaue Festlegung des Einbauwassergehaltes in der Arbeitsanweisung sollte gleiche Einbaubedingungen garantieren.

Bei der Bestimmung der Frostempfindlichkeit von natürlichen Böden sollte dagegen der Hinweis von HEITZER bei Probenentnahme, -transport und -einbau berücksichtigt werden.

Für die Erstprüfung von Materialien ist der Einbau mit optimalem Wassergehalt anzustreben. In den Fällen, wo bereits beim optimalen Wassergehalt Wasser austritt und dies praktisch nicht möglich ist, ist die exakte Bestimmung des tatsächlichen Einbauwassergehaltes besonders wichtig.

Beim Ringversuch sollte die in der Arbeitsanweisung vorgegebene Probenmenge, die von der BAST in einem Proctorversuch bestimmt worden war, in die Probenzylinder eingebaut werden. Die eingebrachte Energie konnte dabei variieren und überstieg fast immer den Energieeintrag zum Erreichen der optimalen Proctordichte. Mögliche Gründe hierfür sind:

- die höhere Elastizität der Prüfzylinder aus Teflon,
- die aus einbautechnischen Gründen erforderliche Reduktion des optimalen Wassergehaltes,
- eine Verkantung des Probenmaterials an den Versätzen der Teflonringe.

Problematisch ist dies in Hinblick auf die Beurteilung der Kornverfeinerung, die neben der Einbaubeanspruchung durch die Frostbeanspruchung verursacht wird. Ein Ziel des Frosthebungsversuches ist die Bestimmung der Kornverfeinerung durch Befrostung. Daraus ergibt sich die Forderung, dass die Einbaubeanspruchung, d. h. der Energieeintrag beim Probeneinbau, stets gleich sein muss. Das Material sollte daher mit einfacher Proctorenergie in die Prüfzylinder eingebaut werden. Die erreichte

Dichte ist aus den o. g. Gründen kleiner als die gemäß DIN 18127 bestimmte Proctordichte.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, in einem Vorversuch das zu untersuchende Material mit Proctorenergie in die verwendeten Prüfzylinder einzubauen. Dadurch kann die Menge pro Einbaulage für den eigentlichen Versuch bestimmt werden. Außerdem ist nach dem Vorversuch am eingebauten Material eine Siebanalyse zur Bestimmung der Kornverteilung durchzuführen. Durch Vergleich mit der Kornverteilung nach Befrostung kann bestimmt werden, welchen Anteil die Einbaubeanspruchung bzw. die Befrostung an der Kornverfeinerung trägt.

Bei der Feuchtraumlagerung des kalkbehandelten Bodens mit unterschiedlicher Luftfeuchtigkeit (98 % Luftfeuchtigkeit: Versuche V9.5 und V9.6 und 100 % Luftfeuchtigkeit: V9.5a und V9.5a) zeigten sich im Verlauf der Frosthebungskurve große Unterschiede (Kapitel 6.3.10). Die Versuche unterscheiden sich insbesondere in der Quellung und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit, die bei den Versuchen V9.5 und V9.6 erheblich über der maßgebenden Geschwindigkeit der Versuche V9.5a und V9.6a lagen.

Die TP BF-StB, Teil B 11.5 lässt bei der Feuchtraumlagerung eine Spanne von 98-100 % Luftfeuchtigkeit zu. Bei einer Temperatur von 20 °C ist eine Feuchtraumlagerung von 28 Tagen vorgeschrieben, die bei Erhöhung der Temperatur auf 40 °C auf 7 Tage verkürzt werden kann. Wichtig ist daher die Protokollierung der Randbedingungen bei der Durchführung des Frosthebungsversuches von kalkbehandelten Böden.

### 7.3 Frosthebungsgerät

Das neue Frosthebungsgerät ist robust und arbeitet im Allgemeinen sehr zuverlässig. Anfängliche Schwierigkeiten bei der Abdichtung der unteren Wanne (Teilnehmer TA) konnten behoben werden.

Verbesserungsfähig ist das Einbringen des mittleren Temperaturfühlers. Er wird in ein Schraubgewinde, das im mittleren Teflonring eingebracht ist, eingedreht. Um zu verhindern, dass das Kabel dieses Fühlers für die Dauer des Versuches verdreht bleibt, muss es vor dem Einbringen des Fühlers zunächst in Gegenrichtung gedreht werden. Durch die Verwendung eines Schleifkontaktes könnte dieses Problem behoben werden.

Die Teflonringe haben den Vorteil einer sehr geringen Mantelreibung. Beim Einbau von scharfkantigem Material können jedoch die Innenwandungen der Ringe beschädigt werden. Vor jedem Versuch ist daher zu überprüfen, ob sich die Ringe in einem ordnungsgemäßen Zustand befinden. Gegebenenfalls sind die Innenwandungen der Ringe zu glätten. Danach ist das Volumen des Probentopfes zu überprüfen. Die maximal erlaubte Abweichung vom vorgegebenen Volumen ( $2.209 \text{ cm}^3$ , entspricht Proctorform B) ist noch festzulegen.

Die Hilfsmittel zum Einbau und zum Transport des Prüfmaterials in die Prüfzylinder ermöglichen gleich bleibende Randbedingungen beim Einbau, der dadurch auch von weniger kräftigen Personen durchgeführt werden kann. Es sind allerdings viele Schritte mit teilweise sehr ähnlichem Zubehör, z. B. Schrauben mit nur geringen Längenunterschieden zur Fixierung der Teflonringe, durchzuführen. Die einzelnen Schritte sollten detailliert in einer Technischen Prüfvorschrift dargelegt werden.

Das automatische Bedienprogramm erfordert zum jetzigen Zeitpunkt noch eine intensive Einarbeitung und genaue Kenntnis der einzelnen Versuchsschritte. Eine Überarbeitung der Versuchsmaske mit einer Anpassung an gängige Laborprogramme zur intuitiven Bedienung ist erforderlich.

Zu beachten ist bei der Programmierung die Einhaltung der Laufzeit des Befrostungsprogramms bei der Zeitumstellung zwischen Sommer- und Winterzeit. Dazu ist in der Systemsteuerung des Computers bzw. Laptops die Option „Uhr automatisch auf Sommer-/Winterzeit stellen“ zu deaktivieren.

## 7.4 Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung

### 7.4.1 Kontakt des Temperaturfühlers in Probenmitte

Bei den vom Versuchsteilnehmer TD durchgeführten Versuchen bestand mehrmals das Problem, dass auf der Probenoberfläche sehr niedrige Temperaturen aufgebracht und die Probe quasi „schockgefrostet“ wurde. Grund hierfür war ein ungenügender Kontakt des Temperaturfühlers in Probenmitte zum eingebauten Material. Die den Temperaturfühler umgebende Lufthülle wirkt als Isolationshülle, sodass zu hohe Temperaturen gemessen wurden.

In der Temperierungsphase wird bei diesen Versuchen die Solltemperatur von  $+1,5 \text{ °C}$  in Probenmitte nicht erreicht. Bereits in dieser Phase ist der Versuch abzubrechen und das Kontaktproblem zu beheben, z. B. durch die Verwendung einer Wärmeleitpaste. Wird der Versuch trotzdem durchgeführt, fallen die geringen maximalen Frosthebungen auf, die gemessen werden. Solche Versuche sind zu verwerfen.

### 7.4.2 Temperaturbedingung für die Befrostung und vertikaler Temperaturgradient

Der vertikale Temperaturgradient (Kapitel 4.2.4) hat einen großen Einfluss auf die Größe der Frosthebung.

Die Wasserbadtemperatur wurde auf  $+1,5 \text{ °C} \pm 0,5 \text{ K}$  festgelegt. Folglich sind Werte zwischen  $+1,0$  und  $+2,0 \text{ °C}$  möglich. Die Wärmekapazität des Wasserbades ist bei einer Temperatur von  $+2,0 \text{ °C}$  doppelt so groß wie bei  $+1,0 \text{ °C}$ . Ausgehend von einer Befrostungstemperatur von  $-3 \text{ °C}$  ergibt sich bei einer Wasserbadtemperatur von  $+1,0 \text{ °C}$  ein Temperaturgradient von  $0,32 \text{ K/cm}$ , bei einer Wasserbadtemperatur von  $+2,0 \text{ °C}$  beträgt der Temperaturgradient dagegen  $0,4 \text{ K/cm}$ .

Auch wenn beide Temperaturgradienten in einem realistischen Bereich liegen, sind durch diesen Unterschied voneinander abweichende Frosthebungen zu erwarten. Die Schwankungsbreite der Wasserbadtemperatur sollte aus diesem Grund reduziert werden. Technisch ist eine Schwankungsbreite von  $\pm 0,1 \text{ K}$  machbar.

### 7.4.3 Geschwindigkeit der Frosteindringung

Abgesehen von der Änderung der Schwankungsbreite des Temperaturgradienten bei der Befrostung hat sich der gewählte Temperaturgradient bewährt. Die unterschiedlichen Frosthebungen der untersuchten Materialien sind realistisch und ausreichend groß, um Unterschiede im Frostverhalten auszumachen.

Wie die Fehlversuche des Teilnehmers TD zeigen, verursacht eine Befrostung mit einer geringeren Kühlkopftemperatur durch eine schnellere Frosteindringung geringere Frosthebungen. Die theoretischen Überlegungen zum Frosthebungsverhalten werden dadurch praktisch bestätigt (Kapitel 3.2). Ab dem Zeitpunkt der Eislinienbildung steht weniger Zeit zum Nachsaugen des Wassers zum Gefrierbe-

reich zur Verfügung, die sich bildenden Eislinsen sind daher geringmächtiger.

#### 7.4.4 Versuchsdauer

Die Dauer der drei Versuchsphasen (Temperierungsphase, Befrostungsphase und Tauphase) wurde aus theoretischen und praktischen Gründen auf insgesamt 9 Tage festgelegt (Kapitel 4.2.7). Unter Berücksichtigung der Versuchsvorbereitung und der nach dem Versuch durchzuführenden Versuche und Arbeiten können so alle 14 Tage neue Frosthebungsversuche durchgeführt werden.

Die Quellung war nach 24 Stunden mit Ausnahme des F3-Bodens bei allen durchgeführten Versuchen abgeschlossen, sodass dieses Zeitintervall ausreichend ist.

In der darauf folgenden Absenkphase wurde außer im Versuch V7.4 (SE-Boden) in allen Versuchen mit korrektem Kontakt des mittleren Temperaturfühlers der Beginn der Eislinsenbildung innerhalb von 4 Tagen, d. h. nach dem 5. Versuchstag, erreicht, bei vier Versuchen allerdings nur knapp (Kapitel 6.4.7). Konsequenz bei einem späten Beginn der Eislinsenbildung ist eine Reduktion der Befrostungsphase, während der die 0°C-Isotherme in Probenmitte erreicht ist und konstant beibehalten wird. Da die gesamte 7-tägige Befrostung der Probe immer konstant ist und der Beginn der Eislinsenbildung nur gering variiert (Kapitel 6.4.7), können vergleichbare materialspezifische Frostbedingungen und damit vergleichbare Frosthebungen angenommen werden.

Bei fast allen Versuchen kann während der Befrostungsphase ein deutliches Abflachen der Frosthebungskurve festgestellt werden. Ausnahmen sind wiederum der F3-Boden und der kalkverbesserte F3-Boden, wo in den meisten Fällen während der Befrostungsphase eine konstante Hebung ohne signifikante Abflachung, d. h. eine gleich bleibende Frosthebungsgeschwindigkeit, zu beobachten ist. Dieses Verhalten resultiert in hohen maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten.

Es ist nur dann davon auszugehen, dass keine nennenswerten Frosthebungen mehr erreicht werden, wenn sich die Frosthebungskurve deutlich abflacht. Neben der Bewertung der maximalen Frosthebung ist die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit daher als zusätzliches Kriterium zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit zu betrachten. Nur durch ihre Limitierung kann sichergestellt werden, dass nach Ende der Befrostung keine größe-

ren Hebungen mehr zu erwarten sind und die Größenordnung der bestimmten maximalen Frosthebungen realistisch ist.

## 7.5 Parameter des Frosthebungsversuches

### 7.5.1 Messgenauigkeit der zu bestimmenden Kenngrößen

Bei der festgestellten Bandbreite der Versuchsergebnisse ist die geforderte Genauigkeit bei der Ablesung der Hebungen nicht erforderlich und sollte geändert werden. Auch aus statistischen Gründen wird eine Messgenauigkeit von 0,1 mm als ausreichend erachtet.

### 7.5.2 Wassergehalt

Die Bestimmung des Einbauwassergehaltes ist für den Vergleich zum optimalen Wassergehalt wichtig. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass das Versuchsmaterial nach dem Anmischen den optimalen Wassergehalt aufweist. Eine exakte Bestimmung des tatsächlichen Wassergehaltes gibt wichtige Informationen bezüglich der Quellung in der Temperierungsphase.

Nach dem Anmischen der Probe und der Entnahme des für den Einbau in den Prüfzylinder erforderlichen Anteils ist bei dem Restmaterial häufig eine Tendenz zur Entmischung festzustellen. Der Einbauwassergehalt kann daher nicht durch eine Wassergehaltsbestimmung des Restmaterials bestimmt werden. Ein praktikabler Weg ist die Wägung der leeren und vollen Probezylinder und die Errechnung des Wassergehaltes aus der vorher zu bestimmenden Trockendichte des Materials.

Für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit der Materialien ist die Verteilung des Wassergehaltes über den Probekörper 24 Stunden nach Ende der Befrostung wenig aussagekräftig. Von Interesse wäre eine Bestimmung des Wassergehaltes unmittelbar nach dem Auftauen der Probe. Im Labor der BAST wurde versucht, diesen Zeitpunkt zu bestimmen. Praktisch ist die Durchführung jedoch schwierig, da die drei Temperaturfühler nicht ausreichen, um den exakten Zeitpunkt des vollständigen Auftauens zuverlässig zu bestimmen.

Nach der 24-Auftauphase waren die Proben in allen Fällen aufgetaut, der Wassergehalt hatte sich über die Höhe der Probe nach gravimetrischen Gesetz-

mäßigkeiten angeglichen. In den meisten Versuchen konnten keine signifikanten Unterschiede der Wassergehalte oben, mittig und unten festgestellt werden. Der Informationsgewinn durch die Bestimmung dieser drei Wassergehalte ist gering und steht nicht im Verhältnis zum Versuchsaufwand.

Es wird daher vorgeschlagen, nach dem Auftauprozess den Wassergehalt der gesamten Probe zu bestimmen und mit dem genau bestimmten Einbauwassergehalt zu vergleichen.

### 7.5.3 Quellung in der Temperierungsphase und Hebungen

Die Bestimmung der Quellung ist unbedingt erforderlich, um die maximale und die verbleibende Resthebung zu bestimmen. Hierzu ist die Messung der Hebung vor Befrostung erforderlich.

Aus der Differenz der Hebung vor dem letzten Befrostungstag und der Hebung am Ende der Befrostung wird die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit ermittelt. Sie ist unbedingt als Kriterium für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit zu bestimmen (Kapitel 7.4.4).

Die Hebung am Ende der Befrostung, aus deren Differenz zur Hebung vor Befrostung die maximale Frosthebung ermittelt wird, ist neben der Ermittlung der Tragfähigkeitsabnahme das entscheidende Kriterium zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit. Es besteht eine gute lineare Korrelation zur verbleibenden Resthebung (Differenz zwischen der Hebung nach dem Auftauen und der Hebung vor Befrostung, Kapitel 6.5). Ein Vergleich der verbleibenden Resthebung mit der maximalen Frosthebung kann daher als Anhaltspunkt für die Überprüfung der ordnungsgemäßen Durchführung des Frosthebungsversuches dienen.

Als Kriterium für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit sollte der größere Wert, d. h. die maximale Frosthebung, herangezogen werden, da bei diesem die Spreizung der Messungen deutlicher ist.

### 7.5.4 Tragfähigkeitsprüfung nach Befrostung

Die Aussagekraft der  $CBR_F$ -Werte für die Bewertung der Frostempfindlichkeit ist wegen der sehr großen Standardabweichungen gering (Kapitel 6.4.9). Dies betrifft sowohl den Vergleich aller Versuche als auch den Vergleich der Versuche mit dem neuen oder den anderen Geräten.

Einer der Gründe hierfür ist die Probenherstellung, bei der die Probekörper nach Einbau des Materials in die Probenzylinder über Kopf gedreht werden, bevor sie in das neue Frosthebungsgerät eingebracht werden. Die Verdichtung der späteren Probenoberseite ist dadurch höher als bei Proben, die nach dem Einbau des Materials nicht gedreht werden, da die untere Lage im Probenzylinder einen erhöhten Energieeintrag erfährt.

Da beim Einbau des Materials in die Probenzylinder Zusatzschläge erlaubt waren und daher der Energieeintrag sehr unterschiedlich war (Kapitel 6.4.2), ist auch bei einem Vergleich der Versuche mit gleicher Herstellung der Probekörper die Übereinstimmung der  $CBR_F$ -Werte unbefriedigend. Die Standardabweichungen sind bei allen untersuchten Materialien hoch und eignen sich bei den untersuchten Böden und Baustoffgemischen nicht dazu, zuverlässige Aussagen über eine Abnahme der Tragfähigkeit nach Befrostung zu treffen.

### 7.5.5 Kornverteilung nach Befrostung

Ziel des Frosthebungsversuches ist die Schaffung eines Bewertungskriteriums für die Frostempfindlichkeit von rezyklierten und industriell hergestellten Gesteinskörnungen, für die das für Böden entwickelte Kornverteilungskriterium nach den ZTV E-StB überprüft und ggf. angepasst werden muss.

Wie in Kapitel 6.5 aufgeführt, bestätigen die Hebungen und die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit meist die Klassifizierung gemäß dem Kornverteilungskriterium nach den ZTV E-StB.

Die absolute Zunahme des Kornanteils  $\leq 0,063$  mm sollte bewertet werden. Wenn die Zunahme durch die Einbaubeanspruchung durch Siebanalyse nach Durchführung des Proctorversuches bestimmt wird, kann die Zunahme des Kornanteils  $\leq 0,063$  mm durch Frostbeanspruchung quantifiziert werden. Im Gegensatz zur Kornverfeinerung durch die Einbaubeanspruchung ist hier eine stetig zunehmende Kornverfeinerung durch wiederholte Frostbeanspruchung zu vermuten.

Neben dem existierenden Grenzkriterium von max. 5 M.-% sollte auch die Zunahme des Kornanteils  $\leq 0,063$  mm durch Frostbeanspruchung limitiert werden.

## 8 Schlussfolgerungen

### 8.1 Allgemeines

Ziel dieses Forschungsprojektes war die praktische Erprobung einer Versuchs- und Messeinrichtung zur Simulation der Frostbeanspruchung in der Straße in einem Ringversuch unter Vergleichsbedingungen. Den Ringversuchsteilnehmern wurde dazu Prüfmaterial zur Verfügung gestellt, das sehr sorgfältig geteilt war. Weiterhin wurde eine genaue Arbeitsanweisung vorgegeben. Bei den Sitzungen der Forschungsteilnehmer wurden Probleme besprochen und unklare und fehlende Festlegungen dieser Arbeitsanweisung konkretisiert.

Aus unterschiedlichen Gründen (Kapitel 6.1 und 6.2) wurden die Untersuchungen jedoch nicht wie festgelegt durchgeführt, was die Auswertung erheblich erschwert. Nur von zwei Teilnehmern wurden alle Materialien in Parallelversuchen untersucht. Andere Vorgaben wie die anzugebenden Parameter und die Stellenanzahl der Versuchsergebnisse wurden nicht korrekt aufgezeichnet. Anhand der übermittelten Versuchsergebnisse kann kein quantitativer statistischer Vergleich zielführend durchgeführt werden. Die Auswertung muss sich auf eine vergleichende Bewertung der Untersuchungsergebnisse beschränken. Aussagen über die Vergleichbarkeit unter Wiederholbedingungen erlauben die wenigen Parallelversuche nicht.

### 8.2 Versuchsvorbereitung und -durchführung

Der Frosthebungsversuch erfordert eine umfangreiche Probenvorbereitung. Wegen der Vielzahl der durchzuführenden Schritte sind potenziell viele Abweichungen möglich. Erforderlich ist daher eine genaue Technische Prüfvorschrift, in der die Versuchsdurchführung exakt festgelegt wird. Auf der Grundlage der Erfahrungen dieses Ringversuches wurde daher die vom AK „Frost“ der FGSV und von WEINGART, WIELAND (2005) entwickelte Technische Prüfvorschrift angepasst und überarbeitet (Anlage 8).

Große Schwierigkeiten bestanden beim Einbau der Materialien in die Prüfzylinder. Fast immer war ein im Vergleich zur optimalen Proctordichte erhöhter Energieaufwand erforderlich, um das Material einzubauen. Als Gründe hierfür wurden die Elastizität der Prüfzylinder und der unterschiedliche Einbau-

wassergehalt, der häufig unterhalb des optimalen Wassergehaltes lag, vermutet.

Für die Durchführung von Einzelversuchen sollte das Material daher in Anlehnung an den Proctorversuch gemäß DIN 18127 mit einfacher Proctorenergie in den Prüfzylinder eingebaut werden. Dadurch kann die einzubauende Masse pro Einbaulage exakt bestimmt werden. Das Material wird also mit einfacher Proctorenergie, abweichend von DIN 18127 jedoch nicht mit Proctordichte eingebaut. Durch den gleichen Energieeintrag und einen definierten Einbauwassergehalt, der i. d. R. dem optimalen Wassergehalt entspricht, werden bei dieser Vorgehensweise eine gleiche Einbaudichte und eine gleiche Einregelung der Bodenteilchen erreicht.

Der tatsächliche Einbauwassergehalt sollte durch eine Wägung des Prüfzylinders vor und nach Einbau des Materials und Rückrechnung mit Hilfe der Trockendichte ermittelt werden.

Die Hebungen während der Befrostung können mit allen Frosthebungsgeräten sehr exakt bestimmt werden. Wegen der hohen Abweichungen unter Wiederhol- und Vergleichsbedingungen ist eine Bestimmung mit einer Genauigkeit von 1/10 mm ausreichend.

Da der vertikale Temperaturgradient einen großen Einfluss auf die Frosthebungen hat, sollte die erlaubte Variation der Wasserbadtemperatur reduziert werden. Technisch machbar ist eine Reduktion auf  $+ 1,5 \text{ °C} \pm 0,1 \text{ K}$ .

Es besteht bei den meisten untersuchten Materialien eine gute lineare Korrelation der Versuchsergebnisse zwischen der maximalen Frosthebung und der maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeit und der verbleibenden Resthebung. Zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit sollten die maximale Frosthebung sowie die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Die Spreizung der Messwerte ist bei der maximalen Frosthebung am größten, sie erlaubt also den differenziertesten Vergleich der Messwerte. Durch die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit kann beurteilt werden, ob sich die Hebungstendenz während der Befrostungsphase abschwächt und durch die maximalen Frosthebungen eine realistische Einschätzung des Frostverhaltens möglich ist.

Der Beginn der Eislinnenbildung kann durch die kurzen Messintervalle bei der automatischen Aufzeichnung mit dem neuen Frosthebungsgerät

genau bestimmt werden. Materialabhängig stimmt der Beginn der Eislinsenbildung relativ gut überein. Die grafische Darstellung ermöglicht eine schnelle und sichere Überprüfung der Einhaltung der Versuchsrandbedingungen. Es ist festzustellen, ob die Temperatur in Probenmitte und die Kühkopftemperatur eine Eislinsenbildung während der Absenkephase anzeigt und die 0°C-Isotherme in Probenmitte während der Befrostungsphase gehalten wird. Außerdem kann anhand der Kühkopftemperatur überprüft werden, ob der Temperaturfühler in Probenmitte guten Kontakt zum Material hat. Anderenfalls führt die isolierende Lufthülle zu sehr niedrigen Kühkopftemperaturen und einer Schockbefrostung.

Der Wassergehalt wird 24 Stunden nach Befrostung bestimmt. Zu diesem Zeitpunkt sind die Probekörper schon so lange wieder aufgetaut, dass eine Angleichung des Wassergehaltes über den gesamten Probekörper erfolgen kann, sodass die Wassergehaltsbestimmung oben, mittig und unten entfallen kann und die Bestimmung des Wassergehaltes der gesamten Probe ausreicht.

Zur Unterscheidung der Ursache der Kornverfeinerung durch die Einbaubeanspruchung und die Frostbeanspruchung sollten nach Einbau des Materials mit einfacher Proctorenergie in die Prüfzylinder sowie nach Durchführung des Frosthebungsversuches Siebanalysen zur Bestimmung der Kornverteilung durchgeführt werden. Es ist durch weitere Untersuchungen zu überprüfen, ob eine Limitierung der Zunahme des Kornanteils  $\leq 0,063$  mm als zusätzliches Kriterium für die Beurteilung der Frostempfindlichkeit herangezogen werden kann.

### 8.3 Bewertung der Frostempfindlichkeit

Die maximalen Frosthebungen und die maßgebenden Frosthebungsgeschwindigkeiten sowohl der natürlichen als auch der rezyklierten und industriell hergestellten Baustoffe korrelieren gut mit den Zuordnungen nach dem Kornverteilungskriterium der ZTV E-StB. Damit ist der Frosthebungsversuch auch zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Recycling-Baustoffen geeignet.

Für die Festlegung der Frosthebungskriterien zur Zuordnung zu den Frostempfindlichkeitsklassen ist eine umfangreichere Datengrundlage erforderlich. Die Anlage und Auswertung einer entsprechenden

Datenbank können erst nach der Festlegung der Randbedingungen durch eine Technische Prüfvorschrift erfolgen.

Die Bewertung der „Frostbeständigkeit“ nach ÖNORM B 4811 gibt als Kriterien eine maximale Frosthebung von 15 mm bei deutlich abgeklungener Hebungsrates, d. h. maximal 1 mm Hebung zwischen dem 7. und 8. Versuchstag, an. Prozentual umgerechnet bedeutet dies, dass

- (1) eine maximale Frosthebung von 100 ‰ und
- (2) eine maximale maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit von 6,7 ‰/d gefordert sind.

Weiterhin wird für die maximale Frosthebung eine maximale Abweichung der Einzelwerte der Parallelversuche vom Mittelwert  $< \pm 13,3$  ‰ gefordert.

Durch diese Kriterien wird also nur zwischen „frostempfindlich“ und „nicht-frostempfindlich“ unterschieden. Eine direkte Übertragung dieser Kriterien auf die deutschen Frostempfindlichkeitsklassen ist wegen deren Dreiteilung nicht möglich. Die Kriterien werden hier so interpretiert, dass bei Überschreitung eine Zuordnung zu den Frostempfindlichkeitsklassen F2 oder F3 gemäß ZTV E-StB erfolgt.

Kriterium (1) wird lediglich von V8.7 (F3-Boden) überschritten und ansonsten von allen durchgeführten Versuchen dieses Ringversuches erfüllt.

Kriterium (2) wird von V8.1 und V8.7 (F3-Boden) sowie von vier der acht Versuche des kalkverbesserten F3-Bodens, d. h. von V9.1, V9.2, V9.4 und V 9.7, nicht erfüllt.

Die Zuordnung des F3-Bodens zur Frostempfindlichkeitsklasse F3 wird durch diese Beurteilung also nicht bestätigt (Kapitel 5.4.2). Unklar ist die Zuordnung des kalkverbesserten F3-Bodens (Frostempfindlichkeitsklasse F2).

Es ist also erforderlich, neue strengere oder zusätzliche Kriterien festzulegen, wenn die jetzige Einstufung in die Frostempfindlichkeitsklassen durch die Ergebnisse des Frosthebungsversuches unverändert bleiben soll. Ob die Frosthebungsversuche es ermöglichen, die jetzige Dreiteilung nach den ZTV E-StB beizubehalten oder nur eine Zweiteilung erlauben, ist durch weitere Versuche festzustellen.

Die im Ringversuch gewonnenen Daten sind vom Umfang und von ihrer Qualität her zur Festlegung

von Grenzwerten für eine Zwei- oder Dreiteilung der Frostempfindlichkeit nicht ausreichend. Daher können im Rahmen dieses Forschungsprojektes keine Grenzwerte für die maximale Frosthebung, die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit vorgeschlagen werden.

Die Ausführungen in Kapitel 6.5 untermauern die Bedeutung einer Limitierung der maximalen Frosthebungsgeschwindigkeit. Es ist also erforderlich, beide Kriterien zu übernehmen und neben der maximalen Frosthebung auch die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit zu begrenzen.

Die Werte der Parallelversuche wurden nicht miteinander verglichen, da die Ergebnisse als Einzelversuche bewertet wurden. Die Forderung der ÖNORM B 4811 (maximale Abweichung der Einzelwerte der Parallelversuche vom Mittelwert von 13,3 ‰) wird von allen Versuchen erfüllt.

Ein Vergleich der Parallelversuche und die Festlegung eines Kriteriums zur Validierung sind sinnvoll. Dadurch können mögliche Fehler bei der Probenvorbereitung, dem Einbau oder der Versuchsdurchführung, die Einfluss auf die Frosthebung haben, direkt erkannt und die entsprechenden Versuche verworfen werden.

Die Festlegung eines absoluten Vergleichswertes zur Validierung der Gültigkeit der Parallelversuche erscheint aber nicht geeignet. Das Kriterium ist bei Frosthebungsversuchen mit geringen oder sehr geringen maximalen Hebungen von weniger als 15 ‰ zu streng und ist bei größeren Hebungen nicht streng genug. Alternativ wird vorgeschlagen, ein prozentuales Kriterium zum Vergleich der Parallelversuche und deren Validierung festzulegen.

Die Hebungen der Ziegelgemische (RC-Beton mit Ziegel und BS-Splitt-Gemisch mit Ziegel) sind vergleichbar mit den beim Quarzit gemessenen Hebungen. Das industrielle Nebenprodukt EOS zeigt sehr geringe Frosthebungen.

Durch den Vergleich der Frosthebungen mit der Einteilung der natürlichen Materialien gemäß dem Kornverteilungskriterium kann daher angenommen werden, dass diese RC-Materialien die Anforderungen an die Frostempfindlichkeitsklassen F1 bzw. F2 gemäß ZTV E-StB erfüllen.

Die Beurteilung der Tragfähigkeitsabnahme nach Befrostung durch die  $CBR_F$ -Werte sollte eingeschränkt werden. Der Kornanteil  $\leq 0,063$  mm sollte

größer als 5 M.-% sein. Natürliche Materialien mit einem Anteil unter 5 M.-% erfüllen die Anforderung an die Frostempfindlichkeitsklasse F1 gemäß den ZTV E-StB und sollten daher keine Abnahme der Tragfähigkeit durch Frost bzw. Wassergehaltsänderungen aufweisen. Hier ist der CBR-Versuch daher nicht erforderlich. Daneben sollte wegen der guten Erfahrungen in der Schweiz die maximale Korngröße auf 16 mm begrenzt werden. Für Böden mit einer Limitierung der maximalen Korngröße auf 16 mm wird in der Schweiz der Koeffizient  $CBR_F/CBR_0$  (gesättigt) nach SN 670119-NA/EN 13242: 2002/AC: 2004 EN 13285: 2003 für die Bewertung der Frostempfindlichkeit erfolgreich angewendet.

Wenn die Materialien mit gleicher Energie, d. h. Proctorenergie, eingebaut werden, sollten weitere vergleichende Frosthebungsversuche durchgeführt werden, um die Aussagekraft der CBR-Versuche zu untersuchen. Danach ist ggf. ein Grenzkriterium für den minimalen  $CBR_F$ -Wert festzulegen und der Versuch zur Beurteilung der Frostsicherheit von rezyklierten Gesteinskörnungen und industriellen Nebenprodukten zu verwenden.

## 9 Zusammenfassung

Durch die Vergleichsuntersuchungen kann die generelle Eignung des neu entwickelten Frosthebungsgerätes festgestellt werden. Der komplexe Versuch stellt hohe Ansprüche an die Laboranten, weshalb eine detaillierte Technische Prüfvorschrift unabdingbar ist. Der bestehende Entwurf für eine Technische Prüfvorschrift wurde auf Basis der im Ringversuch gewonnenen Erfahrungen und Ergebnisse weiterentwickelt (Anlage 7). Der erste Entwurf dieser Technischen Prüfvorschrift wurde von WEINGART/WIELAND (2005) entwickelt und vom FGSV-Arbeitsausschuss „Frost“ fortgeführt.

Ein Unterschied zwischen den im neu entwickelten Frosthebungsgerät und den in anderen Frosthebungsgeräten durchgeführten Untersuchungen kann wegen der geringen Anzahl der Versuche, von denen einige noch verworfen werden mussten, statistisch nicht festgestellt werden. Wegen des automatisierten Ablaufes sind nach Einbau der Prüfzylinder keine Abweichungen vom festgelegten Befrostungsprogramm mehr möglich, wodurch exaktere Randbedingungen eingehalten werden können.

Die Frosthebungen stimmen qualitativ mit den Zuordnungen der Materialien zu den Frostempfindlichkeitsklassen gemäß ZTV E-StB überein. Eine Bewertung der Frostempfindlichkeit von RC-Materialien, für die das Kornverteilungskriterium zur Zuordnung zu den Frostempfindlichkeitsklassen überprüft werden sollte, ist anhand des Frosthebungsversuches möglich.

Die Bewertung der Frostempfindlichkeit ist anhand der maximalen Frosthebung möglich. Zusätzlich ist die maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit zu bewerten und zu limitieren, um aussagekräftige Werte zu erhalten.

Die Kriterien zur Bewertung der Versuchsergebnisse und zur Zuordnung der untersuchten Materialien zu den Frostempfindlichkeitsklassen gemäß ZTV E-StB sind noch festzulegen. Hierzu ist eine größere Datengrundlage erforderlich, die erst nach der Festlegung der Randbedingungen in der Technischen Prüfvorschrift begonnen werden kann.

Um aussagekräftige Versuchswerte zu erhalten, ist die Durchführung von Parallelversuchen (Doppelbestimmungen) erforderlich. Für die Abweichung der Ergebnisse der Parallelversuche ist ein prozentuales Ausschlusskriterium festzulegen.

## 10 Anlagenhinweis

Der Originalbericht enthält die folgenden Anlagen:

- Anlage 1: Prüfbericht zu Projekt 05321/S2: Voruntersuchung von Böden und Baustoffgemischen für den Ringversuch mit dem neu entwickelten Frosthebungsversuch
- Anlage 2: Arbeitsanleitung zum Frosthebungsversuch im Rahmen des Ringversuches
- Anlagen 3.1 – 3.9: Tabellarische Zusammenfassung der Versuchswerte
- Anlagen 4.1 – 4.9: Grafische Darstellung der Frosthebungsversuchsabläufe aller Einzelversuche
- Anlagen 5.1 – 5.9: Grafische Darstellung der Einzelversuchsergebnisse, geordnet nach Böden

Anlagen 6.1 – 6.4: Kornverteilungskurven vor und nach Befrostung

Anlage 7: Entwurf einer Technischen Prüfvorschrift für Böden und Fels im Straßenbau:  
– Frosthebungsversuch –

Sie sind auf CD dieser Veröffentlichung beigelegt

## 11 Literatur

- ANDERSON, D.M.; WILLIAMS, P.J.; GUYMON, G.-L. & KANR, D.L. (1984): Principles of soil freezing and frost heaving, Frost action and its control. American society of Civil Engineers (ASCE), New York, S. 1-21
- ARAKAWA, K. (1966): Theoretical studies of Ice Segregation in Soil. Journal of Glaciology 44, 6, S. 255-260
- BESKOW, E. (1938): Prevention of Detrimental Frost Heaving in Sweden. Proceedings, Highway Research Board, Vol. 18, Pt. 2, S. 366-370
- BOOTH, D.B. (1981): Macroscopic Behavior of Freezing Saturated Silty Soils. Cold Regions Science and Technology, Nr. 3, S. 163-174
- BRANDL, H. (1977): Ungebundene Tragschichten im Straßenbau (Verdichtung, Kornverfeinerung, Frostbeständigkeit, Tragverhalten, Dimensionierung, Qualitätsanforderungen, Prüfung). Bundesministerium für Bauten und Technik, Straßenforschung, Heft 67, Wien
- CASAGRANDE, A. (1931): Discussion on Frost Heaving. Proceedings, Highway Research Board, Vol. 11, Pt. 1, S. 168-172
- CASAGRANDE, A. (1934): Bodenuntersuchungen im Dienste des neuzeitlichen Straßenbaus. Der Straßenbau, Heft 25, 3
- CASAGRANDE, L. (1938): Versuchsstrecken mit Tiefendränagen. Straße, Heft 5 (16)
- CASAGRANDE, L. (1939): Feuchtigkeitsschäden im Straßenbau, Bodenmechanik und neuzeitlicher Straßenbau, 3. Folge
- CHAMBERLAIN, E.J. (1981): Frost Susceptibility of Soils: Review of Index Tests. Monograph 81-2,

- U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H.
- DÜCKER, A. (1939): Untersuchungen über die Frostgefährlichkeit nichtbindiger Böden. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Vol. 17, Berlin: Volk und Reich Verlag
- DÜCKER, A. (1956): Gibt es eine Grenze zwischen frostsicherem und frostempfindlichem Gestein? Straße und Autobahn, Heft 7
- EVERETT, D.H. (1961): The Thermodynamics of Frost Damage to Porous Solids, Transaction of Faraday Society, Vol. 57, S. 1541-1551
- FGSV (1994): Merkblatt „Entstehung und Verhütung von Frostschäden an Straßen“. Forschungsarbeit aus dem Straßenwesen, Heft 105, Kirschbaum Verlag, Bonn
- FLOSS, R. (1973): Bodenmechanische Gesichtspunkte bei der Auswahl und Dimensionierung von Straßenbefestigungen, Straße und Autobahn, Nr. 1, S. 17-26
- FLOSS, R. (1975): Betrachtung zur Frostsicherung und Standardisierung von Fahrbahnbefestigungen, Straße und Autobahn, Nr. 3, S. 85-93
- FLOSS, R. (1978): 18. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau, Bundesanstalt für Straßenwesen
- FLOSS, R. (1997): ZTVE-StB '94 – Kommentar, Kirschbaum-Verlag, Bonn-Bad Godesberg
- GUTH, K.-H. (1992): Verwitterungsbeständigkeit von Recycling-Baustoffen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven
- HEITZER, K. (1981): Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Frostempfindlichkeit von Böden und Boden-Chemikal-Gemischen und deren Tragfähigkeit nach dem Auftauen. TU Dissertation, TU München
- ISSMFE Technical Committee on Frost, TC-8 (1989): Work Report 1985-1989, Frost in Geotechnical Engineering, International Symposium, Saariselkä, Finnland, S. 1-46
- ISSMFE Technical Committee on Frost, TC-8 (1993): Work Report 1990-1993, Frost in Geotechnical Engineering, Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium, Anchorage, USA, S. 159-170
- KEINONEN, L.S. (1977): A Thermodynamic description of the Ice Lensing Process. Proc. Int. Symp. on Frost Action in Soils, Lulea, University of Lulea, Vol. 1, S. 54-58,
- KELLNER, C. (2008): Frosthebungsverhalten von Böden infolge tief liegender Vereisungskörper. Dissertation am Lehrstuhl und Prüfstelle für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der Technischen Universität München, Schriftenreihe Heft 42, München
- KONRAD, J.-M.; MORGENSTERN, N.R. (1980): A Mechanistic Theory of Ice Lens Formation in Fine Grained Soils. Canadian Geotechnical Journal, Nr. 17, S. 437-486
- KRASS, K.; KOLLAR, J. (2004): Eignung von ziegelerreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemitte. Forschung Straßenbau und Straßenbauverkehrstechnik, Heft 884
- JESSBERGER, H. L. (1976): Vergleichende Beurteilung der gebräuchlichen Frostkriterien für Frostschutz-Kies-Sande anhand der Originalveröffentlichungen. Forschung Straßenbau und Straßenbauverkehrstechnik, Heft 208
- LOTTMANN, A. (2003): Tragfähigkeit und Frostempfindlichkeit von kalkbehandelten bindigen Böden im Planumbereich von Verkehrsflächen. Dissertation, BTU Cottbus
- LOTTMANN, A.; HALTENORTH, G.; RICHTER, F. (2004): Bemessungsgrundlagen für den frostsichereren Oberbau von Verkehrsflächen. Forschung Straßenbau und Straßenbauverkehrstechnik, Heft 879
- MILLER, R. (1972): Freezing and Thawing of Saturated and Unsaturated Soils. Highway Research Record 393, S. 1-11
- MOTZKE, R. (2001): Bestimmung von Frosteindringungsverläufen an einer Modellstraße (1:1) mit unterschiedlichen Materialien (konventionelle – Recycling-Baustoffe) in der ungebundenen Tragschicht. Abschlussbericht zum AP-Projekt 97340, Mai
- SCHAIBLE, L. (1957): Frost- und Tauschäden an Verkehrswegen und deren Bekämpfung. W. Ernst & Sohn, Berlin
- STRASSER, W.; HENÖGL, O.; PREMSTALLER, M.; WALDHANS, H. (2001): Frosthebungsverhalten von ungebundenen Tragschichten. Bun-

desministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Straßenforschung, Straßenforschungsprojekt Nr. 3.215, Heft 508, Wien

TAKAGI, S. (1980): The Adsorption Force Theory of Frost Heaving, Cold Regions Science and Technology, Nr. 3, S. 57-81

UNOLDT, F. (2006): Der Gefriersog bei der Bodenfrostung und das Kompressionsverhalten des wieder aufgetauten Bodens. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

VOIGT, T. (1994): Frosteinwirkung auf mineralischen Deponieabdichtungen. Dissertation, Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Nr. 47

WIELAND, M. (2003): Experimentelle Untersuchungen zum Frosthebungsverhalten von ausgewählten Straßenbaumaterialien zur Entwicklung einer Frosthebungsprüfung. Hochschule Anhalt, Fachbereich Architektur- und Bauingenieurwesen, Dessau

WEINGART, W.; WIELAND, M. (2005): Weiterentwicklung des Frosthebungsversuchs. Forschung Straßenbau und Straßenbauverkehrstechnik, Heft 927

WILLIAMS, P.J. (1967): Properties and Behaviour of Freezing Soils. Oslo, Norwegian Geotechnical Institute, Publikation Nr. 72

## Normenverzeichnis

DIN 18121-1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Wassergehalt – Teil 1: Bestimmung durch Ofentrocknung, April 1998

DIN 18122-1: Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) – Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze, Juli 1997

DIN 18124: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Korndichte-Kapillarpneumometer-Weithalspneumometer, Juli 1997

DIN 18125-1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 1: Laborversuche, August 1997

DIN 18127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Proctorversuch, November 1997

DIN 18128: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Glühverlustes

DIN 18130-1: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts – Teil 1: Laborversuche, Mai 1998

DIN 18196: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke, Juni 2006

DIN EN 933-1: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren; deutsche Fassung EN 933-1:1997 + A1:2005

DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; deutsche Fassung EN 1097-6:2000 + AC:2002 + A1:2005

DIN EN 1367-1: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tauwechsel; Deutsche Fassung EN 1367-1:2007

DIN EN 13286-47: Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 47: Prüfverfahren zur Bestimmung des CBR-Wertes (California Bearing Ratio) des direkten Tragindex (IBI) und des linearen Schwellwertes; deutsche Fassung EN 13286-47:2004

ÖNORM B 4810: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Frostsicherheit von Gemischen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausführung Oktober 2006

ÖNORM B 4811: Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten im Straßen- und Flugplatzbau – Beurteilung der Frostsicherheit, Österreichisches Normungsinstitut, Wien, Ausführung Oktober 2006

SN 670119-NA/EN 13242: 2002/AC: 2004 EN 13285: 2003: Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Strassenbau. Ungebundene Gemische, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich, 2008

SN 670140b: Frost, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich, 2001

SN 670320b: Versuche an Böden. CBR-Versuche im Laboratorium, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich, 1994

SN 670321a: Versuche an Böden. Frosthebungsversuch und CBR-Versuch nach dem Auftauen (CBR<sub>F</sub>), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich, 2001

### **Prüfvorschriften-, Merkblätter- und Richtlinienverzeichnis**

Merkblatt für die Verhütung von Frostschäden an Straßen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, FGSV-Nr. 545, Ausgabe 1991

Merkblatt für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, FGSV-Nr. 551, Ausgabe 2004

RVS 11.062, Teil 10: Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, Prüfverfahren, Steinmaterial, Frosthebungsversuche, Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr (FSV), Wien, Ausgabe 2000

TP BF-StB, Teil B 7.1: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, CBR-Versuch, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, Ausgabe 1986

TP BF-StB, Teil B 11.1: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Eignungsprüfungen für Bodenverfestigungen mit hydraulischen Bindemitteln, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, FGSV-Nr. 591, Ausgabe 2005

TP BF-StB, Teil B 11.5: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Eignungsprüfungen bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, FGSV-Nr. 591, Ausgabe 1991

TP Gestein-StB: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, FGSV Nr. 610, 2008

TL BuB E-StB: Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßen-

baus, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, FGSV Nr. 597, 2009

TL Gestein-StB: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, FGSV Nr. 613, 2007

ZTV E-StB: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau, Ausgabe 2009, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, FGSV-Nr. 599, 2009

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Straßenbau“

### 1996

- S 11: Der Einfluß der Textur auf Reifen/Fahrbahngeräusch und Rollwiderstand – Untersuchungen im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn  
Ullrich, Glaeser, Sander, Chudalla, Hasskelo, Löffler, Sievert € 15,00
- S 12: Offenporige Asphaltdeckschichten auf Außerortsstraßen – Projektgruppe „Lärmindernde Straßendecken“ € 10,00
- S 13: Qualität von mineralischen Straßenbaustoffen  
Tabbert € 16,50

### 1997

- S 14: 35. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 16,50
- S 15: Anforderungen an Fugenfüllsysteme aus Temperaturdehnungen  
Eisenmann, Lechner € 12,50
- S 16: Sicherheitswirksamkeit ausgewählter Straßenbaumaßnahmen im Lande Brandenburg  
Schnüll, Handke, Seitz € 22,00

### 1998

- S 17: Restnutzungsdauer von Asphaltsschichten – Prüfung der Grundlagen zu ihrer Berechnung  
Wolf, Schickl € 13,00
- S 18: 2. Erfahrungsaustausch über rechnergestütztes Straßenerhaltungsmanagement € 14,50
- S 19: Einfluß der Bruchflächigkeit von Edelsplitten auf die Standfestigkeit von Asphalten  
Teil 1: Literaturlauswertung  
Beckedahl, Nöslcr, Straube
- Teil 2: Einfluß des Rundkornanteils auf die Scherfestigkeit von Gesteinskörnungen  
Diel € 16,50

### 1999

- S 20: 36. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 14,00
- S 21: Walzbceton: Ergebnisse aus neuester Forschung und langjähriger Praxis – Kompendium  
Birmann, Burger, Weingart, Westermann
- Teil 1: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von Walzbceton auf die Gebrauchseigenschaften (1)  
Schmidt, Bohlmann, Vogel, Westermann
- Teil 2: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von Walzbceton auf die Gebrauchseigenschaften (2)  
Weingart, Dreßler
- Teil 3: Messungen an einer Versuchsstrecke mit Walzbceton-Tragschicht an der B54 bei Stein-Neukirch  
Eisenmann, Birmann
- Teil 4: Temperaturdehnung, Schichtenverbund, vertikaler Dichtverlauf und Ebenheit von Walzbceton  
Burger € 17,00

### 2000

- S 22: 3. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Nutzen der systematischen Straßenerhaltung € 19,50
- S 23: Prüfen von Gesteinskörnungen für das Bauwesen  
Ballmann, Collins, Delalande, Mishellany, v. d. Elshout, Sym € 10,50

### 2001

- S 24: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - Konsolidationsverfahren -  
Teil 1: Vergleichende Betrachtung von Konsolidationsverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund  
Teil 2: Erfahrungsberichte über ausgeführte Straßenbauprojekte auf wenig tragfähigem Untergrund unter Verwendung von Konsolidationsverfahren  
Koch € 17,50
- S 25: 37. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 16,50

### 2002

- S 26: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - Aufgeständerte Gründungsplolster  
Rogner, Stelter € 14,00
- S 27: Neue Methoden für die Mustergleichheitsprüfung von Markierungsstoffen – Neuentwicklung im Rahmen der Einführung der ZTV-M 02  
Killing, Hirsch, Boubaker, Krotmann € 11,50
- S 28: Rechtsfragen der Bundesauftragsverwaltung bei Bundesfernstraßen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 25./26. September 2000 in Saarbrücken € 13,00
- S 29: Nichtverkehrliche Straßennutzung – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 24./25. September 2001 in Saarbrücken € 13,50

### 2003

- S 30: 4. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Workshop Straßenerhaltung mit System – € 19,50
- S 31: Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues  
Golkowski € 13,50
- S 32: Straßenbaufinanzierung und -verwaltung in neuen Formen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 23. und 24. September 2002 in Saarbrücken € 13,50
- S 33: 38. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau € 17,50
- S 34: Untersuchungen zum Einsatz von EPS-Hartschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen  
Hillmann, Koch, Wolf € 14,00

### 2004

- S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren  
Grundhoff, Kahl € 17,50
- S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken € 13,50

S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-  
Fahrbahn-Geräusche“  
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

## 2005

S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate  
eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des  
Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft  
für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in  
Saarbrücken € 16,50

S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Ver-  
formungswiderstandes von Asphalt  
Renken, Büchler € 16,00

S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 17,50

S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Boden-  
kontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben  
Schröder € 13,50

S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und  
RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymer-  
modifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-  
Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt  
Wörner, Metz € 17,50

S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk  
Krajewski, Kuhl € 14,00

S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem  
Untergrund  
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

## 2006

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstan-  
des und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen  
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl,  
Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und  
Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen  
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflich-  
tig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des  
Walzsektor-Verdichtungsgerätes  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflich-  
tig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

## 2007

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbau-  
weise  
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines For-  
schungsseminars des Arbeitsausschusses "Straßenrecht" der  
FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden  
€ 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der  
Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflich-  
tig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von  
Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflich-  
tig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
Hirsch € 16,00

## 2008

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines For-  
schungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 24./  
25. September 2007 in Bonn € 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton  
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/  
STSuB)  
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

## 2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung  
– Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßen-  
recht" am 22./23. September 2008 in Bonn € 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger  
Asphaltbauweisen  
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deck-  
schichten aus Asphalt  
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und  
Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode  
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

## 2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines  
Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 21./  
22. September 2009 in Bonn € 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den  
Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes  
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau  
€ 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an  
kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Neben-  
produkten  
Blume € 16,00

---

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10  
D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.