

## Weiterentwicklung des Frosthebungsversuchs

FA 5.136

Forschungsstelle: Hochschule Anhalt (FH) Dessau, Fachbereich Architektur und Bauingenieurwesen (Prof. Dr.-Ing. W. Weingart)

Bearbeiter: Wieland, M.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: April 2005

### 1. Aufgabenstellung

Durch die gesetzliche Verpflichtung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (KrW-/AbfG) zur Wiederverwendung werden industrielle Nebenprodukte und Recyclingbaustoffe schon jetzt im Bereich des Verkehrswesens im Ober- und Unterbau in großem Umfang eingesetzt, obwohl noch nicht für alle alternativen Baustoffe ausreichende Praxiserfahrungen über ihr Langzeit- und insbesondere ihr Frostverhalten vorliegen.

Beispielsweise existiert zur Zeit in Deutschland u. a. auch noch kein allgemein verbindliches Prüfverfahren, mit dem das Verhalten der industriellen Nebenprodukte und RC-Baustoffe im eingebauten Zustand unter realitätsnahen Bedingungen bei Frosteinwirkung geprüft werden kann.

In anderen Ländern sind demgegenüber bereits verbindliche Vorschriften für die Durchführung von Frosthebungsversuchen vorhanden. In der Schweiz werden Frosthebungsversuche an Bodenmaterialien nach SN 670321a durchgeführt. Vergleichsweise dazu wird in Österreich an Tragschichtmaterialien ohne Bindemittel entsprechend RVS 11.062, Teil 10 aus dem Jahre 1997 oder ÖNORM B4810 (Januar 2001) das Frosthebungsverhalten untersucht.

Durch Forschungsarbeiten der Bundesanstalt für Straßenwesen über die Wiederverwendung von Baustoffen wurden Widersprüche zwischen den bisher in Deutschland mit konventionellen Prüfverfahren im Labor ermittelten Prüfergebnissen und dem tatsächlichen Praxisverhalten von Recyclingbaustoffen aufgedeckt.

Ferner wird in einer Literaturstudie über Frostkriterien und Frostsicherung der BTU Cottbus auf die Notwendigkeit der Vereinheitlichung der Prüfbedingungen bei Durchführung von Frosthebungsversuchen mit Blick auf die europäische Normung hingewiesen. In dieser Literaturstudie wird empfohlen, das Frosthebungsverhalten grundsätzlich durch Frosthebungsversuche am Gesamtgemisch zu bewerten.

Grundvoraussetzung für die Verallgemeinerung der Prüfergebnisse von Frosthebungsversuchen ist jedoch die exakte Festlegung und Einhaltung definierter Prüfbedingungen für den Frosthebungsversuch.

Im Rahmen einer Diplomarbeit an der Hochschule Anhalt in Dessau wurde am Beispiel von Frosthebungsversuchen an verschiedenen Materialien, angelehnt an die Prüfvorschriften aus Österreich und der Schweiz, nachgewiesen, dass beide Prüfverfahren zu völlig unterschiedlichen Prüfergebnissen und Bewertungen der Frostempfindlichkeit führen können. Es stellte sich u. a. heraus, dass die Österreichische Prüfung zur Bewertung der Frostempfindlichkeit z. B. von RC-Baustoffen besser geeignet ist als die Schweizer Prüfung. Bei dem Österreichischen Frosthebungsversuch müssen jedoch zahlreiche Vorversuche durchgeführt werden, um die geforderten Prüfbedin-

gungen bezüglich Frosteindringgeschwindigkeit und Verharren der 0°C-Isotherme in Probekörpermitte annähernd genau einzuhalten.

Eine bessere Präzision der Prüfergebnisse kann erwartet werden, wenn an Stelle der Luftkühlung eine Flüssigkeitskühlung der Probenoberfläche wie z. B. bei der Frostzelle nach Kujala erfolgt. Aber auch bei Flüssigkeitskühlung ist die Abkühlgeschwindigkeit innerhalb der Probe von den thermischen Eigenschaften des Probenmaterials abhängig, die zudem während des Versuchs infolge Änderung des Wassergehaltes und der Dichte über die Probenhöhe nicht konstant bleiben, so dass die Kühlgeschwindigkeit der Probenoberfläche ständig nachgeregelt werden müsste.

Forschungsziel war es, auf Basis der Literaturlauswertung und zusätzlicher experimenteller Untersuchungen über den Einfluss spezieller Prüfbedingungen auf das Prüfergebnis den Frosthebungsversuch so weiterzuentwickeln, dass die Prüfbedingungen, insbesondere bezüglich des Temperaturgradienten in der Probe, den natürlichen Frostbedingungen nahe kommen.

Der weiterentwickelte Frosthebungsversuch sollte ferner so gestaltet werden, dass er als Routineprüfung geeignet ist.

### 2. Methodik des Vorgehens

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde eine umfassende Literaturlauswertung über Frosthebungsversuche wie der SN 670321a (Schweiz), der RVS 11.062 Teil 10 (Österreich), Ö-NORM B4810 (Januar 2001), der französischen Norm NF P 98-234-2 (Februar 1996), der TRRL SR 829 (UK) und der CRREL II (USA), der Frosthebungsversuche von Beeskow, Dücker, Klengel, Brandl, Waibel, Heitzer, Kujala, Krass, Lottmann, Wieland und der TP BF Teil 11.5 (1971) vorgenommen.

Ergebnisse aus bereits abgeschlossenen Forschungsarbeiten der BTU Cottbus, dem AP Projekt 97 340 der Bundesanstalt für Straßenwesen und einer Diplomarbeit an der Hochschule Anhalt wurden zur weiteren Verwendung herangezogen.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden außerdem Klimadaten der letzten 10 Jahre der Wetterstationen Halle-Kröllwitz, Leipzig-Schkeuditz, Berlin-Dahlem und Wernigerode mit dem Ziel der Ermittlung der für einen Frosthebungsversuch maßgebenden Temperaturgradienten im Boden ausgewertet. Es handelt sich hierbei um Wetterstationen, bei denen außer den Lufttemperaturen auch die Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen erfasst werden.

Ferner wurden die Messdaten von einer Versuchsfläche der Hochschule Anhalt sowie die des Straßenzustands- und Wetterinformationssystems des Deutschen Wetterdienstes für verschiedene Stationen im Bereich von Bundesautobahnen berücksichtigt, bei denen die Temperaturen in 30 cm Tiefe im Straßenkörper gemessen wurden.

Folgende experimentellen Untersuchungen dienen dem Zweck, den Einfluss spezieller Prüfbedingungen auf die Prüfergebnisse des Frosthebungsversuches zu ermitteln:

- In einer ersten Versuchsreihe wurden für die Frosthebungsversuche folgende Probematerialien verwendet:
  1. Schottertragschichtgemisch aus Quarzporphyr 0/32 mm B2
  2. RC-Splitt-Brechsand-Gemisch 0/8 mm
  3. F2-Boden

Die Frosthebungsversuche werden nach zwei verschiedenen Befrostungsvarianten durchgeführt:

Bei Befrostungsvariante 1 erfolgt eine Befrostung mit konstanter Temperatur von  $-8\text{ °C}$  über einen Zeitraum von 7 Tagen.

Bei Befrostungsvariante 2 erfolgt die Befrostung mit veränderlicher Temperatur derart, dass die Frosteindringgeschwindigkeit in den ersten 4 Tagen ca. 19 mm/d beträgt. Nach Erreichen der vorgegebenen Frosteindringtiefe von 75 mm am 4. Tag wird die Probe so beaufrostet, dass die  $0\text{ °C}$ -Isotherme für weitere 3 Tage in der Tiefe von 75 mm gehalten wird.

- In einer zweiten Messreihe wurde die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Befrostungsvariante 2 mit konstanter Tiefe der  $0\text{ °C}$ -Isotherme von 75 mm unter Probenoberfläche durch drei Einzelversuche an zwei Probematerialien getestet. Zur Anwendung kamen das Probematerial Quarzporphyr 0/32 mm und das RC-Splitt-Brechsand-Gemisch 0/8 mm.
- In der dritten Versuchsreihe wurde der Einfluss des Wärmeübergangs zwischen Kühkopf und Probenoberfläche auf das Temperaturverhalten im Frosthebungsversuch bei Befrostungsvariante 1 und 2 ermittelt. Für die Frosthebungsversuche wurde als Probematerial Quarzporphyr 0/32 mm verwendet, da bei diesem Material eine grobkörnige Probenoberfläche vorhanden ist. Um den Temperaturübergang zwischen Kühkopf und Probenoberfläche zu verbessern, wurde eine nicht aushärtende Wärmeleitpaste zwischen Kühkopf und Probenoberfläche aufgetragen.
- Nach entsprechenden Änderungen an der verwendeten Frosthebungsapparatur kam bei der vierten Versuchsreihe ausschließlich die Befrostungsvariante 1 (konstante Befrostungstemperatur mit Durchlaufkühler) zum Einsatz. In diesen Versuchen wurden die Befrostungstemperatur sowie die Temperatur des Wasserbades variiert. Ferner wurden zusätzliche Untersuchungen zum horizontalen Temperaturgradienten in der Probe und zur Anordnung der Temperatursensoren durchgeführt. Weiterhin wurde untersucht, ob das Einstreuen von feinem Quarzsand an der Oberfläche eine Verbesserung des thermischen Kontaktes zwischen dem Kühkopf und der Probenoberfläche bewirkt. Die Versuche wurden mit CEN Normensand nach DIN EN 196-1 durchgeführt. Von diesem Normensand wurde nur die Körnung 0/1 mm und als Probematerial wiederum nur das grobkörnige Korngemisch 0/32 aus Quarzporphyr verwendet.

Im Ergebnis der Forschungsarbeit werden Vorschläge für eine Technische Prüfvorschrift des Frosthebungsversuches in Deutschland unterbreitet. Vorentwürfe dieser Prüfvorschrift wurden im Arbeitsausschuss 5.1 "Frost" und im Arbeitsausschuss 5.5 "Prüftechnik" der Forschungsgesellschaft des Straßen- und Verkehrswesens diskutiert.

### 3. Untersuchungsergebnisse

Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass für die Durchführung von Frosthebungsversuchen die Befrostung der Probenoberfläche durch Umluftkühlung auf Grund der Temperaturschwankungen im Klimaschrank nicht zweckmäßig ist.

Für den Frosthebungsversuch wird deshalb die Verwendung der in nachfolgender schematischer Darstellung vorgeschlagenen Prüfapparatur empfohlen.

Es wird grundsätzlich empfohlen, die Befrostung der Probe über Kühlplatten durchzuführen, wobei zwei Befrostungsvarianten möglich sind:

#### – BEFROSTUNGSVARIANTE A

Die Befrostung der Probenoberseite erfolgt derart, dass in einer Tiefe von  $57,5 \pm 2,5$  mm unter Probenoberseite die Temperatur innerhalb von 4 Tagen annähernd linear mit einer Geschwindigkeit von 0,38 K/Tag von  $+1,5\text{ °C}$  auf  $0\text{ °C}$  abgesenkt und anschließend die  $0\text{ °C}$ -Isotherme in dieser Tiefe für weitere 3 Tage konstant gehalten wird. Die Befrostungstemperatur ist bei dieser Variante nicht konstant. Sie wird entsprechend den jeweiligen thermischen Bedingungen automatisch nachgeregelt. Kennzeichnend für diese Variante ist ein relativ langsames Eindringen des Frostes in die Probe, wobei eine gleichbleibende Frosteindringtiefe unabhängig von den thermischen Eigenschaften des Probenmaterials und dem Wärmeübergang an der Probenoberfläche in allen Versuchen vorliegt. Das bedeutet, dass der Abstand von der Unterkante des "frozen fringe" zur Oberkante Wasserbad sowie der sich darüber bildende Temperaturgradient stets konstant sind. Weiterhin bilden die Frosthebungen während der Frosteindring- und der stationären Phase "steady state conditions" ein Bewertungskriterium. Der Abstand der wasserangereicherten Zone unter der Probenoberfläche am Ende des Auftauprozesses und somit auch deren Auswirkung auf den CBR-Wert ist infolgedessen ebenfalls definiert. Als Nachteil dieser Variante kann der erhöhte Aufwand für die Regelung der Befrostungstemperatur angesehen werden.

#### – BEFROSTUNGSVARIANTE B

Die Probe wird mit konstanter Temperatur von  $-4\text{ °C}$  von oben 7 Tage beaufrostet. Diese Befrostungstemperatur kommt der von KUJALA (1991) gewählten ( $-3\text{ °C}$ ) nahe. Die Befrostung mit sehr niedrigen Temperaturen bei einer Wasserbadtemperatur von  $1,5\text{ °C}$  ist nicht zu empfehlen, da die Frosteindringtiefe zu groß ist. Die Befrostungstemperatur sollte  $-4,0\text{ °C}$  betragen, damit sich Frosthebungen zu einem großen Anteil in der oberen Probenhälfte im Wirkungsbereich des CBR-Prüfstempels einstellen. Zur Verbesserung des Wärmeübergangs wird außerdem empfohlen, bei der Befrostungsvariante mit konstanter Befrostungstemperatur von  $-4\text{ °C}$  auf grobkörnigen Probematerialien zwischen Kühkopf und Probenoberfläche angefeuchteten feinen Quarzsand 0/1 mm aufzubringen. Dieses Ausgleichsmaterial darf nur die Hohlräume unter dem Kühkopf ausfüllen. Die Verwendung von Wärmeleitpaste ist nicht zu empfehlen. Der Vorteil dieser Befrostungsvariante B ergibt sich dadurch, dass für die Befrostungstemperatur keine aufwändige Regelung erforderlich ist.

Die maßgebende Befrostungsvariante ist je nach Anwendungsfall auszuwählen.

Die Messung der Befrostungstemperatur sollte in jedem Fall direkt im Kühkopf erfolgen. Es ist beispielsweise nicht ausreichend, nur die Temperatur der Kühlflüssigkeit im Kryostaten zu erfassen.

Die Wasserbadtemperatur sollte in Anbetracht der Verwendung einer relativ kleinen Probekörperhöhe von 125 mm mit  $+1,5\text{ °C}$  festgelegt werden, um im ungefrorenen unteren Probekörperbereich etwa einen Temperaturgradienten von ca. 0,25 K/cm zu gewährleisten, der den Verhältnissen in situ nahe kommt. Diese Wasserbadtemperatur entspricht der Schweizer Norm SN 670321a.

Ferner ist das Wasserbad indirekt zu temperieren, wobei die Wasserbadtemperatur in der Nähe der Probenunterseite zu messen ist.

Die Ergebnisse der Versuchsreihe 4 zeigen außerdem, dass es möglich ist, bei der Befrostungsvariante mit konstanter Tiefenlage der  $0\text{ °C}$ -Isotherme in Probenmitte den für die Regelung

der Befrostungstemperatur erforderlichen Temperatursensor an der Innenwandung des Prüfzylinders anzuordnen. Dadurch entfällt das nachträgliche Einbringen des Sensors in die Probe, das vor allem bei grobkörnigen Probematerialien häufig problematisch ist.

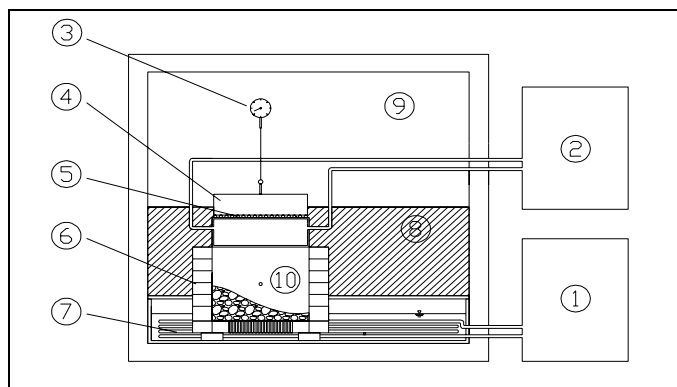
Um die horizontalen Temperaturgradienten im Prüfzylinder konstant zu halten, wird außerdem empfohlen, die Umgebungstemperatur in der Klimakammer auf  $+1,5\text{ °C}$  konstant einzustellen. Die Messung der Umgebungstemperatur sollte in der Nähe der Zylinderaußenwandung etwa in einer Tiefe von 55–60 mm unter Zylinderkopf durchgeführt werden.

Zur Isolierung der Prüfzylinderwandung sollte Korkschröt verwendet werden, da dieses Isoliermaterial sehr anpassungsfähig ist, obwohl die Wärmeleitfähigkeit mit ca.  $0,13\text{ W/m}\cdot\text{K}$  höher ist als vergleichsweise die von Schaumstoffen. Diese höhere Wärmeleitfähigkeit kann in Kauf genommen werden, wenn der Frosthebungsversuch mit konstanter Umgebungstemperatur durchgeführt wird.

Für die Frosthebungsversuche wird der nach DIN EN 13286-47:2004 geltende maximale Korndurchmesser für CBR-Versuche von 22,4 mm vorgeschlagen, um die Prüfergebnisse des Frosthebungsversuchs mit den Prüfergebnissen des CBR-Versuchs ohne Befrostung vergleichen zu können.

Für Frosthebungsversuche mit konstanter Befrostungstemperatur erscheint eine Befrostungsdauer von 4 Tagen ausreichend. Es ist zu erkennen, dass sich nach einem Befrostungszeitraum von 4 Tagen der Anstieg der Frosthebungen nur noch wenig verändert.

Für feinkörnige Böden mit einer geringen Wasserdurchlässigkeit kann jedoch eine längere Befrostungsdauer erforderlich sein. Aus diesem Grund sollte generell die Befrostung insgesamt 7 Tage dauern, um die Versuchsergebnisse mit der Befrostungsvariante mit konstanter Frosteindringtiefe vergleichen zu können.



**Bild 1:** Schematische Darstellung der vorgeschlagenen Prüfapparatur für den Frosthebungsversuch

- 1- Kryostat für die indirekte Temperierung des Wasserbades auf  $+1,5\text{ °C} \pm 0,5\text{ K}$
- 2- Kryostat mit Kühkopf für die Befrostung der Probe nach Befrostungsvariante B und/oder elektronische Regeleinheit für Befrostungsvariante A
- 3- Messuhr bzw. elektronischer Wegaufnehmer
- 4- Auflast aus Edelstahl (Gesamtauflast = Edelstahlzylinder + Isolierplatte + Kühkopf = 9 kg)
- 5- Isolierplatte zwischen Auflast aus Edelstahl und Kühkopf aus Kupfer
- 6- Frosthebungszyylinder aus Teflon (Multiringzelle)
- 7- Wasserbad mit konstanter Temperatur von  $+1,5\text{ °C} \pm 0,5\text{ K}$
- 8- Äußere Isolierung der Probe mit Korkschröt
- 9- Klimakammer mit konstanter Temperatur von  $+1,5\text{ °C} \pm 0,5\text{ K}$
- 10- Thermometer in Probenmitte

Gegebenenfalls kann im Rahmen von Routineprüfungen bei grobkörnigen Probematerialien die Versuchsdauer verkürzt werden.

Eine Dauer des Auftauprozesses von 24 Stunden wird als hinreichend für die Konsolidierung der Probe angesehen.

Die Auswertung der Versuchsreihe 4 hat gezeigt, dass der Einsatz von Temperaturfühlern mit einer hohen Messgenauigkeit notwendig ist. Daher sollte die Messgenauigkeit der Temperaturfühler mindestens  $\pm 0,15\text{ K}$  betragen.

Da durch den CBR-Versuch unmittelbar nach dem Auftauen der Probe der durch Frosthebung aufgelockerte obere Bereich der Probe bewertet werden soll, ist bei der Auswertung der CBR-Prüfung die Durchführung der sonst üblichen Nullpunktkorrektur nicht sinnvoll. Es wird daher vorgeschlagen, sowohl bei der CBR-Prüfung nach dem Frosthebungsversuch als auch bei der Bestimmung des Referenz-CBR-Wertes ohne Befrostung generell auf die Nullpunktkorrektur zu verzichten.

## 4. Folgerungen für die Praxis

Ein Bewertungshintergrund für die Prüfergebnisse des vorgeschlagenen Frosthebungsversuchs mit dem Ziel der Einstufung in Frostempfindlichkeitsklassen konnte im Rahmen des Forschungsprojektes nicht erarbeitet werden.

Diese Aufgabe bleibt weiteren Forschungsarbeiten vorbehalten.

Mit dem vorgeschlagenen Frosthebungsversuch wurde eine Grundlage für die direkte Bewertung der Frostempfindlichkeit und die Durchführung von Vergleichsversuchen nach einheitlichen Regeln geschaffen.

Analog hierzu sieht z. B. auch die ÖNORM B 4811 (Januar 2001) eine stufenweise Beurteilung von Gesteinskörnungen für ungebundene Tragschichten vor, bei der nach der Bestimmung der Korngrößenverteilung und dem Mineralkriterium ein Frosthebungsversuch empfohlen wird.

Gleichermaßen sieht eine Empfehlung des "Technical Committee on Frost" (TC-8) der International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE) im "Work Report 1985–1989" eine Beurteilung von Böden in drei Genauigkeitsstufen vor. Führen die ersten beiden Stufen, Kornverteilungskurve und die Beurteilung über Kennwerte wie Plastizität, Kapillarität oder Fines-Faktor zu keiner eindeutigen Einordnung, wird als dritte Option ebenfalls eine Beurteilung der Frostempfindlichkeit über eine direkte Frosthebungsprüfung empfohlen.

Da bisher zwischen den einzelnen Kennwerten des Frosthebungsversuches, z. B. zwischen der maximalen Frosthebung oder der Resthebung und dem  $\text{CBR}_F$ -Wert oder dem Ausbauwassergehalt usw., noch keine Korrelationen gefunden werden konnten, wird vorgeschlagen, für die Auswertung des Frosthebungsversuches vorerst folgende Prüfergebnisse zur Bewertung der Frostempfindlichkeit des untersuchten Probematerials heranzuziehen:

- Maximale Frosthebung,
- Frosthebung am letzten Tag der Befrostung (= maßgebende Frosthebungsgeschwindigkeit),
- Verbleibende Resthebung nach dem Tauprozess,
- Tragfähigkeitsverlust (Differenz zwischen dem  $\text{CBR}_F$ -Wert nach dem Frosthebungsversuch und dem Referenz- $\text{CBR}_0$ -Wert ohne Befrostung),
- Ausbauwassergehalte ( $w_A$ ) in verschiedenen Tiefen der Probe nach dem  $\text{CBR}_F$ -Versuch im Vergleich zum Einbauwassergehalt ( $w_E$ ).