

## Randbedingungen für den Frosthebungsversuch bei Böden und Baustoffen

FA 5.165

Forschungsstelle: Zentrum angewandte Forschung und Technologie – ZAFT e. V. an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden

Bearbeiter: Engel, J. / Lauer, C. / Walter, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: März 2015

### 1 Aufgabenstellung

Die Beurteilung der Frostempfindlichkeit von Böden, veränderlich festen Gesteinen und Baustoffen erfolgt auf Grundlage der Einordnung in eine von drei Frostempfindlichkeitsklassen F1 bis F3. Grundlage dafür ist die Korngrößenverteilung und die Zuordnung zu einer Bodengruppe gemäß DIN 18196. Diese Klassifizierungskriterien sind zunächst für Böden abgeleitet worden und lassen sich nur begrenzt auf andere Baustoffe anwenden. Dieses Vorgehen beruht auf Erfahrungen. Im Grenzbereich zwischen Frostempfindlichkeitsklassen sowie bei Recyclingprodukten und anderen Materialien liefern diese Kriterien nicht immer realistische Ergebnisse. Bei Unsicherheiten hinsichtlich der Bewertung der Frostempfindlichkeit sind nach ZTV E-StB 09 Frosthebungsversuche oder eine Untersuchung der mineralogischen Zusammensetzung der Böden vorgesehen.

Ein Material ist frostempfindlich, wenn unter Frosteinwirkung das Porenwasser gefriert und sich dadurch Eislinsen bilden. Die damit verbundenen Hebungen führen zur Auflockerung des Materials und damit zur Verschlechterung der Tragfähigkeit.

Von Weingart und Wieland (2005) wurden die geräte- und messtechnischen Bedingungen sowie die Randbedingungen für einen genormten und realitätsnahen Frosthebungsversuch untersucht und ein erster Entwurf der "Technischen Prüfvorschrift für Böden und Fels im Straßenbau – Frosthebungsversuch" vorgelegt. Ziel weiterer Vergleichsuntersuchungen (Blume, U., 2010) war die Schaffung von Voraussetzungen zur Nutzung des Frosthebungsversuchs als Routineprüfverfahren. Das Verfahren kann in Verbindung mit einem vorgegebenen Befrostungsregime repräsentative Versuchsergebnisse liefern. Nach den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen existiert ein Zusammenhang zwischen dem gemessenen Frosthebungsverhalten und der Frostempfindlichkeitsklasse. Allerdings fehlen noch zahlenmäßige Kriterien zur Festlegung der Frostempfindlichkeitsklassen auf Grundlage der gemessenen Frosthebungsverläufe (Blume, U., 2010).

Mit dem Forschungsvorhaben werden folgende Ziele verfolgt:

- Untersuchung des Einflusses der gerätebedingten Randbedingungen (zum Beispiel Stahl oder Teflon)
- Untersuchung der Orientierung des Probekörpers auf das Frosthebungsverhalten
- Erprobung des Versuchsablaufs an 33 Böden/Baustoffen, Untersuchung der Einbauvorgaben
- Verifizierung der Auswertungsalgorithmen, Implementierung in eine Software

- Ableitung von Bewertungskriterien zur Prüfung der Ergebnisse von Frosthebungsversuchen.

### 2 Untersuchungsmethodik

#### 2.1 Versuchsmaterial

Es wurden drei Materialklassen (Rundkorn, Brechkorn und industrielle Nebenprodukte/RC-Baustoffe) für die Versuche ausgewählt. Um vor allem Grenzbereiche der klassischen Einteilung der Frostempfindlichkeit untersuchen zu können, wurde bei den "Rundkorn-" und "Brechkornmaterialien" neben den natürlich abgelagerten auch gezielt zusammengestellte Modellböden untersucht. Der Feinanteil der Versuchsböden wurde durch die Zugabe von Schluff beziehungsweise Ton angepasst. Zur Vermeidung von Entmischungerscheinungen erfolgt die Herstellung im feuchten Zustand. Bei den industriellen Nebenprodukten/RC-Baustoffen handelte es sich um Zinkwälschlacke 0/16 mm, RC-Beton-Sand 0/8 mm, RC-Ziegel-Sand 0/8 mm, RC-Beton 0/32 mm und RC-Beton-Asphalt 0/32 mm. An drei Proben wurden Frosthebungsversuche nach einer Bodenverbesserung mit Bindemitteln durchgeführt.

#### 2.2 Prüfkörperherstellung

Die Vorbereitung der Proben erfolgte gemäß Entwurf der TP BF-StB "Frosthebungsversuch". Der maximale Korndurchmesser wird danach auf 22,4 mm begrenzt. Größere Bestandteile wurden deshalb abgesiebt. Der im Rahmen von Proctorversuchen nach DIN 18127 ermittelte Proctorwassergehalt wurde als Zielgröße für den Einbauwassergehalt ( $w_A$ ) zugrunde gelegt. Vor der Prüfkörperherstellung erfolgt die Trocknung bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz und anschließend ist der Einbauwassergehalt ( $w_A$ ) eingestellt worden. Um eine gleichmäßige Durchfeuchtung der Probe zu gewährleisten, wurde das Material gut durchmischt und anschließend 24 Stunden in einem geschlossenen Gefäß gelagert. Der Einbau erfolgte in drei Lagen mit je 22 Schlägen mit dem Proctorhammer B. Dies entspricht einer volumenbezogenen Verdichtungsarbeit von  $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$ .

Um einen gleichmäßigen Anschluss zwischen Kühkopf und Prüfkörper zu gewährleisten, wurden Hohlräume und Unebenheiten des Prüfkörpers mit trockenem Quarzsand (0,1/0,4 mm) ausgeglichen. Die Dichte wurde für die gesamte Probe und der Wassergehalt an dem überschüssigen Einbaumaterial ermittelt.

Zur Klärung des Einflusses der Randbedingungen (zum Beispiel Elastizität des Prüfzylinders) und der Probenorientierung auf das Ergebnis sind mehrere Einbauvarianten untersucht worden.

Probeneinbau 1: Der Teflon- beziehungsweise Stahlzylinder wurde auf die ungelochte Grundplatte aufgesetzt und fixiert.

Probeneinbau 2: Die Herstellung erfolgte in zwei Varianten:

- (a) nach den Vorgaben des Entwurfs der TP BF-StB "Frosthebungsversuch". Die stärker verdichtete Seite liegt an der Oberseite des Prüfkörpers.

(b) nach DIN 18127 "Proctorversuch" liegt die stärker verdichtete Probenseite an der Unterseite des Prüfkörpers.

### 2.3 Frosthebungsversuch

Die Versuchsdurchführung erfolgte grundsätzlich nach den Vorgaben des Entwurfs der TP BF-StB "Frosthebungsversuch". Es wurde ein Zweikammerprüfgerät benutzt, wobei je Versuch zwei Prüfkörper in getrennten Klimakammern parallel untersucht werden können. Der Wasserspiegel liegt  $10 \pm 2,5$  mm über der Unterkante des Prüfzylinders und wird mittels Ausgleichsbehälter konstant gehalten. Die freie Wasseraufnahme der Prüfkörper von unten war durch die Art der Lagerung sichergestellt. Die Wassertemperatur von  $+1,5 \text{ °C} \pm 0,1 \text{ K}$  wurde durch ein Kühlsystem konstant gehalten und mittels Temperatursensoren (Pt 100) direkt im Wasserbad überwacht.

Die verwendeten Prüfzylinder bestanden aus fünf genuteten Teflonringscheiben. Zur Verhinderung von Feinkornaustrag wurde auf die gelochte Grundplatte ein Filterpapier aufgelegt. In der Probenmitte war ein Temperaturfühler in den Zylinder zur Erfassung der Temperatur integriert. Der Probekörper wurde von der Oberseite über einen Kühlkopf aus Kupfer ( $\varnothing 147 \pm 1$  mm) befrosten. Direkt am Kühlkopf erfolgte die Temperaturmessung. Die dadurch wirkende Auflast (Kühlkopf und Edelstahlplatte) beträgt  $5 \text{ kN/m}^2$ .

Die Höhenänderungen des Prüfkörpers sind über einen elektronischen Wegaufnehmer mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,01$  mm erfasst worden. Während der gesamten Versuchsdurchführung wurden die Messdaten in einem Intervall von 5 Minuten automatisch gespeichert. Dies umfasste auch die Wasserbadtemperatur, die Temperatur in der Probenmitte und die Kühlkopftemperatur. Der Versuchsablauf besteht aus vier Phasen und wurde mit einer gerätespezifischen Software automatisch gesteuert. Nach Versuchsende dieser Prozesse erfolgte der Probenausbau und es sind unter anderem der Ausbauwassergehalt und die Feuchtdichte bestimmt worden.

Für die Auswertung der Versuche wurde eine eigene Software im Rahmen des Programmsystems PRAG implementiert. Das Programm ermöglicht das Einlesen der Dateiformate .txt und .csv. Es ist möglich, unter einem Gastzugang Frosthebungsversuche einzugeben und auszuwerten. Der Aufruf der Datenbank erfolgt unter folgendem Link:

<https://www.zaft.htw-dresden.de/geotechnik/prag/?lang=de>

Gastzugang:

Firma:            gant  
Name:             gant  
Passwort:       gant

### 3 Untersuchungsergebnisse

Die im Entwurf der TP BF-StB "Frosthebungsversuch" beschriebene Methode zur Probenvorbereitung ist geeignet für die Laborpraxis. Aufgrund der Lagerung der Proben ist in den meisten Fällen ein leichtes Unterschreiten des Einbauwassergehalts im Vergleich zum Proctorwassergehalt festgestellt worden. Die Schwankungen des Wassergehalts lagen im Mittel bei  $0,6 \text{ %}$ .

Es wurde kein Unterschied im Frosthebungsverhalten zwischen Teflon- und Stahlprüfzylinder festgestellt. Die geforderte Einbaudichte (Proctordichte) ist bei beiden Prüfzylindern erreicht worden. Es wurde eine entsprechende Anpassung der TP BF-StB "Frosthebungsversuch" vorgeschlagen.

Als problematisch werden die Schwankungen des Verdichtungsgrads der Prüfkörper eingeschätzt, die sich teilweise beim Einbau mit der vorgegebenen Verdichtungsarbeit von  $W = 0,6 \text{ MNm/m}^3$  ergaben. Diese schwankten in Einzelfällen zwischen  $95$  und  $103 \text{ %}$ . Aufgrund dieser Beobachtung und wegen des überragenden Einflusses der Trockendichte auf die Eigenschaften sollte als Vorgabe für die Herstellung der Prüfkörper die Trockendichte zugrunde gelegt werden. Diese hat entscheidenden Einfluss auf den Porenraum und die Kapillarwirkung während der Befrostung. Der Verdichtungsgrad ist darüber hinaus das maßgebende Kriterium bei der Gütekontrolle in situ. Seine Größe bestimmt nach den vorliegenden Ergebnissen maßgeblich die maximale Frosthebung. Ist die Herstellung von Prüfkörpern mit der geforderten Dichte nicht möglich, müssen die Ergebnisse des Frosthebungsversuchs sachverständig interpretiert werden.

Eine Beurteilung des Einflusses der Drehung der Probe auf das Frosthebungsverhalten ist aufgrund der teilweise hohen Standardabweichungen noch nicht abschließend möglich.

Zwischen der maximalen Frosthebung und der verbleibenden Resthebung ist näherungsweise ein linearer Zusammenhang festgestellt worden (siehe Blume, U. (2010) und John (2013)). Aufgrund dieses linearen Zusammenhangs lassen sich die Bewertungskriterien in Anlehnung an das Modell von Floss vereinfachen. Allerdings reichen die bisher vorliegenden Untersuchungen noch nicht aus, um ein verallgemeinertes Kriterium angeben zu können.

Es wird deshalb empfohlen, das Frosthebungsverhalten in Abhängigkeit der geplanten Nutzung zu bewerten.

### 4 Folgerungen für die Praxis

Mit dem Frosthebungsversuch und der dazugehörigen Prüfvorschrift steht ein experimentelles Verfahren zur Bewertung des Frosthebungsverhaltens zur Verfügung, mit dem reproduzierbare Ergebnisse gewonnen werden können. Die vorgegebenen Randbedingungen tragen zur Sicherung der Vergleichbarkeit der Messungen bei. Der Verlauf der Frosthebungskurve kann mit den Ergebnissen dieses Forschungsprojekts aber auf seine Plausibilität überprüft werden. Dadurch lässt sich der Aufwand auf Einzelversuche reduzieren. Wiederholungen sind nur bei Abweichung erforderlich. Diese Schwankungen lassen sich teilweise mit den hier entwickelten Entscheidungshilfen bewerten. Für Wiederholungen wird die Durchführung von Doppelbestimmungen empfohlen.

Großen Einfluss haben Trockendichte und Einbauwassergehalt. Das Anmischen des Materials sollte 24 Stunden vor Versuchsbeginn erfolgen, um eine homogene Feuchtigkeitsverteilung sicher zu stellen. Als Zielgröße für den Einbau ist die Trockendichte zugrunde zu legen. Diese sollte unter Berücksichtigung der Einbauvorgaben in situ festgelegt werden. Es wird die Anpassung der Technischen Prüfvorschrift empfohlen.

Zum Einfluss der Orientierung (Drehung) der Probe auf das Frosthebungsverhalten ist aufgrund der teilweise hohen Standardabweichung noch keine abschließende Aussage möglich. Es kann zunächst davon ausgegangen werden, dass keine signifikanten Unterschiede bestehen.

Zwischen der maximaler Frosthebung und der verbleibenden Resthebung deutet sich ein linearer Zusammenhang an. Dieser kann bei zunehmender experimenteller Absicherung für die Festlegung von Bewertungskriterien genutzt werden.

## 5 Literatur

Blume, H.-P., Brummer, G. W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16 Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Blume, U. (2009): Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau H. S 63. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.

DIN 18127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben: Proctorversuch, November 2011.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (1991): Merkblatt für die Verhütung von Frostschäden an Straßen, FGSV Verlag, Köln.

Floss, R. (2006): Handbuch ZTV E – Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau. 3. Auflage, Kirschbaum Verlag GmbH, Bonn.

John, M (2013): Untersuchungen zum Frostverhalten von Böden und Baustoffen. Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Dresden. Diplomarbeit unveröffentlicht.

TP BF-StB 09: Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau – Frosthebungsversuch, Entwurf im Rahmen des Projekts 05.0321/S2 "Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten", Stand 2009.

Weingart, W. und Wieland, M. (2005): Weiterentwicklung des Frosthebungsversuchs. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 927. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.