

Verringerung der Frostempfindlichkeit von Böden durch die Behandlung mit Branntkalk und Kalkhydrat

FA 5.135

Forschungsstelle: Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Bodenmechanik und Grundbau/Geotechnik (Prof. Dr.-Ing. L. Wichter)

Bearbeiter: Lottmann, A./ Wienberg, N. / König, M.

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

Abschluss: Februar 2007

1 Aufgabenstellung

Nach dem "Merkblatt für Bodenverbesserungen und Bodenverfestigungen mit Bindemitteln" (FGSV, 2004) ist es erstmals möglich, durch eine sogenannte qualifizierte Bodenverbesserung die Frostempfindlichkeit eines Bodens der Frostempfindlichkeitsklasse F3 durch Bindemittelzugabe derart zu verbessern, dass er nach der Behandlung der Frostempfindlichkeitsklasse F2 zuzuordnen ist. Voraussetzung für die Verbesserung der Frostempfindlichkeit ist, dass der Boden aufgrund seines Mineralbestandes und der bodenmechanischen Eigenschaften für die Behandlung geeignet ist, und dass die Bindemittelzugabe ausreichend bemessen wird.

Nach den "Technische[n] Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau" (TP BF-StB, Teil B 11.5) (FGSV, 1991) wird die Frostsicherheit eines Boden-Kalk-Gemisches mit einaxialen Druckversuchen bestimmt, die an Proben durchgeführt werden, nachdem diese durch Frost-Tauwechsel beansprucht wurden. Die Prüfbedingungen entsprechen im Wesentlichen denjenigen von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln (TP HGT-StB 94) (FGSV, 1994) oder Bodenverfestigungen mit Zement (TP BF-StB, Teil B 11.1). Die Prüfungen sind zeit- und geräteaufwendig; in der Praxis wäre ein schnelleres und einfacheres Verfahren zur Beurteilung der Verbesserbarkeit eines Bodens durch Kalkzugabe sehr hilfreich. Unklar war bisher auch, ob mit Branntkalk bessere Ergebnisse erzielt werden als mit Kalkhydrat.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte deshalb geklärt werden, welche Bodenarten sich für eine qualifizierte Bodenverbesserung eignen, und wie sich diese Eignung (oder Nicht-eignung) möglichst einfach, rasch und ohne Frostversuche feststellen lässt. Außerdem sollte geklärt werden, wie hoch die Zugabe von Branntkalk oder Kalkhydrat mindestens sein muss, damit die Verringerung der Frostempfindlichkeit eintritt.

2 Versuchsböden und Boden-Kalk-Gemische

Für den Hauptteil der Untersuchungen wurden drei Versuchsböden ausgewählt, die nach ihrem Entnahmeort die Bezeichnungen "Köln", "Wallhausen" und "Stuttgart" erhielten. Mit diesen Böden ("Hauptböden") mit unterschiedlichen bodenmechanischen Eigenschaften wurden durch Zugabe von 2, 4 und 6 M.-% Branntkalk CL 90 und, in einer weiteren Versuchsserie, Kalkhydrat-Gemische hergestellt. Diese wurden systematisch Frostbeanspruchungen unterworfen und anschließend wurden verschiedene Prüfungen durchgeführt.

Aus dem Hauptteil des Untersuchungsprogramms ergaben sich mögliche Prüfverfahren zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit der Boden-Kalk-Gemische. Um die Anwendbarkeit und Aussagefähigkeit der Prüfverfahren zu überprüfen, wurden mit

neun weiteren Böden aus verschiedenen Gegenden Deutschlands Kontrollversuche durchgeführt.

3 Versuchsprogramm und Versuchsergebnisse

3.1 Frostversuche

Mit den drei Hauptböden und ihren Gemischen unter Verwendung der beiden Kalkarten wurden drei unterschiedliche Arten von Frostversuchen durchgeführt:

a) Frost-Tauwechsel-Versuche gemäß TP BF-StB Teil B 11.5

Die Proben für die Frost-Tauwechsel-Versuche wurden entsprechend den Vorgaben der Eignungsprüfung für Bodenverfestigungen mit Feinkalk und Kalkhydrat hergestellt. Sie wurden dann in Klarsichtfolien und zusätzlichen Plastikbeuteln 7 Tage im Feuchtraum bei 40 °C gelagert. Anschließend wurden sie für 4 Stunden auf eine Filzunterlage gestellt und dann mit 12 Frost-Tauwechseln beansprucht. Nach der letzten Auftauphase wurde die einaxiale Druckfestigkeit der Prüfkörper (q_{uF} -Werte) bestimmt.

b) Frosthebungsversuche (FH-Versuche)

Bei den Frosthebungsversuchen wurden die in einem Isolierzylinder befindlichen Proben von der Oberseite her mit Frost beaufschlagt. Die Proben standen mit dem Fuß in einem temperierten Wasserbad und konnten während des Gefrierprozesses kontinuierlich Wasser aufnehmen (Bild 1). Während der Versuche wurden die Frosthebungen gemessen. Nach dem Auftauen wurde die verbliebene Tragfähigkeit mit CBR-Versuchen (CBR_{FH} -Werte) ermittelt.

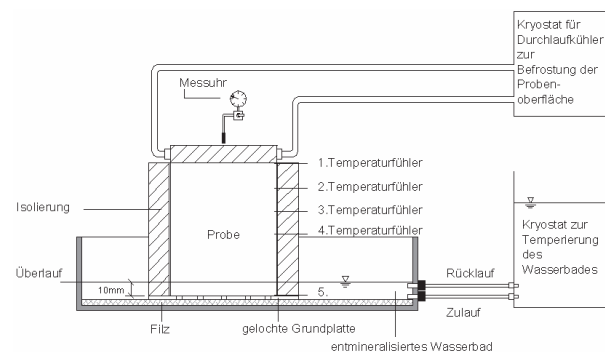


Bild 1: Versuchsaufbau Frosterhebungsversuch

c) Frost-Tauwechsel-Versuche mit anschließenden CBR-Prüfungen

Bei diesen Versuchen wurden die Boden-Kalk-Gemische im CBR-Topf in 12 Zyklen vollständig gefroren und wieder aufgetaut. Das Frostregime der TP BF-StB Teil B 11.5 wurde übernommen. Die Proben besaßen demnach nur während der Auftauphasen die Möglichkeit zur Wasseraufnahme. Gemessen wurden die Frosthebungen und die nach dem letzten Auftauen verbliebene Tragfähigkeit im CBR-Versuch (CBR_{FTW} -Werte).

Zusammenfassend lässt sich aus den Versuchsergebnissen zur Festigkeit bzw. Tragfähigkeit der Boden-Kalk-Gemische nach Frostbeanspruchung sagen, dass sowohl die mit Branntkalk als auch die mit Kalkhydrat behandelten Böden höhere einaxiale Druckfestigkeiten und höhere CBR-Werte hatten als die unbehandelten Böden. Diese Aussage gilt für die

Druckfestigkeiten und CBR-Werte sowohl vor als auch nach der Frostbeanspruchung. Die Festigkeiten und Tragfähigkeiten werden von der Kalkzugabemenge und vom Alter der Proben beeinflusst. Bei Kalkzugabemengen von nur 2 M.-% zeigten die bindigen Böden auch langfristig noch Frosthebungen. Die Kalkzugabemenge und das Probenalter beeinflussen die Frosthebungen in gleicher Weise wie die Festigkeiten und Tragfähigkeiten.

Es wurde weiterhin untersucht, ob die Verdichtung einen Einfluss auf die Frostempfindlichkeit hat. Dazu wurden Vergleichsprobekörper mit modifizierter Proctorenergie hergestellt und geprüft. Die einaxiale Druckfestigkeit der modifiziert hergestellten Prüfkörper war deutlich größer als diejenige der mit einfacher Proctorenergie hergestellten. Eine höhere und gleichmäßigere Verdichtung führt also zu einer höheren Stabilität bei Frost-Tauwechsel-Beanspruchung.

3.2 Alternative Prüfverfahren

Um mögliche Alternativen zur zeit- und geräteaufwendigen Bestimmung der Frostempfindlichkeit eines Boden-Kalk-Gemisches mit Frostversuchen zu finden, wurde verschiedenen Ansätzen nachgegangen, die im Folgenden vorgestellt und deren Ergebnisse diskutiert werden. Dazu wurden Prüfkörper der Böden Köln, Wallhausen und Stuttgart hergestellt. Variiert wurden die Kalksorte (Branntkalk CL 90, Kalkhydrat KH), der Kalkgehalt (2, 4 und 6 M.-%) und das Prüfalter (7, 28, 90, 180 und 270 Tage).

a) CBR-Versuche ohne Befrostung (CBR₀-Versuche)

Die Probekörper wurden nach den Vorgaben der TP BF-StB Teil B 11.5 hergestellt, in Klarsichtfolien und zusätzlich Plastikhüllen verpackt und bei einer Temperatur von 40 °C im Feuchtraum gelagert. Nach dem Erreichen des vorgesehenen Prüfalters wurden an den Proben ohne vorherige Frostbeanspruchung CBR-Versuche (CBR₀-Versuche) durchgeführt. Es wurde Folgendes festgestellt:

- Die CBR₀-Werte waren im Vergleich zu den CBR-Werten der unbehandelten Böden deutlich erhöht.
- Der Einfluss der Kalkart auf den CBR₀-Wert war nicht signifikant.
- Die CBR₀-Werte stiegen mit dem Prüfalter an.
- Die CBR₀-Werte waren beim Boden Stuttgart am kleinsten und beim Boden Köln am größten. Damit ergab sich bei den CBR₀-Versuchen die gleiche Rangfolge der Böden wie bei den CBR_{FH}-Versuchen, den CBR_{FTW}-Versuchen und den einaxialen Druckversuchen nach Frostbeanspruchung.

Der CBR₀-Versuch könnte also als alternatives Prüfverfahren zur Ermittlung der Frostempfindlichkeit Verwendung finden.

b) CBR-Versuche nach Wasserlagerung (CBR_w-Versuche)

Die Boden-Kalk-Gemische wurden nach der Herstellung im Feuchtraum gelagert. Vor der Prüfung wurden sie 96 Stunden unter Wasser gelagert. Im Alter von 7, 28, 90, 180 und 270 Tagen wurden dann Bestimmungen des CBR-Wertes (CBR_w) durchgeführt. Die Versuche zeigten folgende Ergebnisse:

- Die CBR_w-Werte waren im Vergleich zu den CBR-Werten der unbehandelten Böden deutlich erhöht.

- Der Einfluss der Kalkart auf den CBR_w-Wert war nicht signifikant.
- Hinsichtlich der Festigkeitserhöhung ergab sich aus den CBR₀-Versuchen die gleiche Reihenfolge der Böden wie bei den Versuchen nach Frostbeanspruchung.
- Die Erhöhung der CBR-Werte war ab einem Prüfalter von 28 Tagen sehr deutlich.
- Bei einer Kalkzugabe von 2 M.-% war ab einem Prüfalter von 90 Tagen keine Festigkeitserhöhung mehr zu beobachten, bei 4 und 6 M.-% stieg auch danach die Festigkeit noch an.

c) Direkte Scherversuche

In direkten Scherversuchen (Rahmenscherversuchen) wurde die Erhöhung der Scherfestigkeit der Gemische durch die Kalkzugabe ermittelt. Es zeigte sich, dass der Reibungswinkel durch die Kalkzugabe nicht verändert wird. Die Kohäsion wird hingegen durch die Kalkzugabe im Laufe der Zeit erhöht. Die Zunahme der Kohäsion gestattet eine grobe Abschätzung der Frostempfindlichkeit der Boden-Kalk-Gemische; allerdings konnte daraus keine zuverlässige Klassifizierung abgeleitet werden.

d) Einaxiale Druckversuche nach Wasserlagerung

An den Prüfkörpern der Boden-Kalk-Gemische wurden nach einer Lagerungszeit von 7 und 28 Tagen (im Feuchtraum bei 40 °C) und anschließend 96 Stunden Lagerung unter Wasser einaxiale Druckversuche (q_{UW7} und q_{UW28}) durchgeführt. Auch hier zeigte es sich, dass an 28 Tage alten Prüfkörpern zuverlässigere Aussagen zur Frostempfindlichkeit gewonnen werden können. Die einaxiale Druckfestigkeit nach Wasserlagerung q_{UW28} eignet sich zur Einschätzung der Frostempfindlichkeit von Boden-Kalk-Gemischen.

e) Bestimmung des Feinkornanteils ≤ 0,2 µm

Diesem Versuch zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit liegt die Überlegung zugrunde, dass die Puzzolanität (Reaktivität) eines Bodens durch den Anteil an amorphen Oxiden und Hydroxiden und sehr feinen Tonmineralen bestimmt wird. Die Reaktivität der Tonminerale nimmt vom Kaolinit über Illit zum Montmorillonit zu. In gleicher Reihenfolge nimmt die Korngröße ab. Ein hoher Anteil an Feinkorn könnte damit auf einen hohen Anteil an Montmorillonit und damit auf eine gute Reaktivität schließen lassen. Der Kornanteil ≤ 0,2 µm kann im Labor in kürzester Zeit (5 Minuten) mit einer Ultraschallanalyse ermittelt werden und ist somit ein echtes Schnellverfahren. Der Anteil an Feinkorn ≤ 0,2 µm liefert Anhaltspunkte für den Grad der Frostempfindlichkeit der meisten Boden-Kalk-Gemische. Ausnahmen sind Gemische von Lößlehm und Kalk sowie Gemische mit größeren organischen Beimengungen (Glühverluste > 3 %). Beim Lößlehm sind die reaktiven Bestandteile vornehmlich die Oxide und Hydroxide in der (gröberen) Schlufffraktion. Die Reaktivität der organischen Böden wird mit der Methode der Bestimmung des Feinkornanteils überschätzt. Insgesamt wird es sich jedoch lohnen, mit weiteren Untersuchungen die Zuverlässigkeit dieser schnellen und einfachen Methode zur Einschätzung der Reaktivität zu testen.

f) Veränderung der Plastizität

Es wurde untersucht, ob durch die Veränderung der Fließ- und Ausrollgrenzen nach Kalkzugabe innerhalb von 7 Tagen Hin-

weise auf die Puzzolanität der Böden gewonnen werden können. Infolge der Beeinflussung der Krümelstruktur durch die notwendige Aufbereitung der Proben, die nicht quantifizierbar ist, waren die Versuchsergebnisse nicht sicher reproduzierbar.

- g) Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit eines Kalkwasser-Bodengemisches

Die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit der Boden-Kalk-Gemische ergab keine Hinweise auf einen Zusammenhang dieses Parameters mit der Frostempfindlichkeit.

- h) Veränderung der Korngröße durch Kalkzugabe

Die Veränderung der Korngröße durch die Kalkzugabe (Kornvergrößerung, Krümelbildung) eignet sich nicht zur Beurteilung der Frostempfindlichkeit der Boden-Kalk-Gemische.

- i) Bestimmung des Wasseraufnahmevermögens

Es wurden die Wasseraufnahme und das Schwellmaß der Probekörper untersucht. Bei den Bodenbehandlungen mit Kalk traten keine nennenswerten Hebungen durch die Wasseraufnahme ein. Das Quellen wird durch die Kalkzugabe vermindert oder sogar aufgehoben. Anhand der Wasseraufnahme lassen sich deshalb keine Schlüsse auf die Frostempfindlichkeit von Boden-Kalk-Gemischen ziehen.

1 Folgerungen für die Praxis

Tabelle 1: Vorläufige Kriterien zur Bewertung der Puzzolanität eines Bodens

Puzzolanität	Anteil $\leq 0,2 \mu\text{m}$ [Vol.-%] *)
geringe Puzzolanität	$< 0,4$
mittlere Puzzolanität	$0,4 - 0,7$
gute Puzzolanität	$\geq 0,7$

*) ermittelt am Kornanteil $\leq 0,125 \text{ mm}$
Hinweis: Klassifizierung nicht gültig für Lößlehme und Böden mit organischen Beimengungen ($V_{gl} > 3 \%$)

Die Bestimmung des Kornanteils $\leq 0,2 \mu\text{m}$ eines zu verbessernden Bodens und damit die Einschätzung der Reaktivität eines Boden-Kalk-Gemisches ist um ein Vielfaches einfacher und schneller als die Durchführung von einaxialen Druckversuchen oder die Bestimmung des CBR-Wertes an Boden-Kalk-Gemischen. Die Gemische müssen hergestellt und mehrere Tage unter kontrollierten Bedingungen gelagert werden. Zur Durchführung der Druck- oder CBR-Versuche müssen entsprechende Versuchsgeräte vorhanden sein.

Wenn sich der Zusammenhang zwischen Puzzolanität eines Bodens und dem Kornanteil $\leq 0,2 \mu\text{m}$ durch weitere Untersuchungen erhärten lässt, kann als Vorstufe der Eignungsprüfung zunächst der Kornanteil $\leq 0,2 \mu\text{m}$ bestimmt werden. Die Reaktivität könnte dann nach Tabelle 1 bewertet werden.

Die Entscheidung über die Verbesserbarkeit eines Bodens durch Kalk könnte dann in folgenden Schritten getroffen werden:

1. Bei mittlerer und guter Puzzolanität (siehe Tabelle 1) Festlegung der Kalkzugabemenge anhand der Boden-

gruppe [mindestens 3 M.-% bei qualifizierten Bodenverbesserungen (Lottmann,2004)]

2. Bei geringer Puzzolanität oder bei Böden mit $V_{gl} > 3 \%$:
 - einaxialer Druckversuch nach Wasserlagerung oder
 - CBR-Versuch nach Wasserlagerung

Tabelle 2: Vorschlag zur Bewertung der Frostempfindlichkeit von Boden-Kalk-Gemischen

Kriterium	F3/Bodenverbesserung	F2/qualifizierte Bodenverbesserung	Bodenverfestigung
q_{uF7} [N/mm ²]	$< 0,08$	$\leq 0,08 - 0,2$	$> 0,2$
q_{uW7} [N/mm ²]	$< 0,4$	$0,4 - 0,8$	$\geq 0,8$
q_{uW28} [N/mm ²]	$< 0,6$	$0,6 - 1,0$	$\geq 1,0$
CBR_{w28} [%]	< 40	$40 - 80$	≥ 80

Zur Bewertung der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche und der CBR-Versuche werden vorläufig die in Tabelle 2 dargestellten Grenzwerte empfohlen.

Im Hinblick auf das Regelwerk werden folgende Empfehlungen und Hinweise gegeben:

- In der TP BF-StB Teil B 11.5 ("Eignungsprüfung bei Bodenverbesserung und Bodenverfestigung mit Feinkalk und Kalkhydrat") (FGSV, 1991) könnte die "qualifizierte Bodenverbesserung" ergänzt werden.
- Bewertungskriterien der Eignungsprüfung für "qualifizierte Bodenverbesserungen" könnten in die ZTV E-StB (FGSV, 1997) aufgenommen werden.

Im "Merkblatt für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln" (FGSV, 2004) wird gefordert, dass im Planumbereich (Verringerung der Frostempfindlichkeitsklasse von F3 zu F2) die einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen $q_{u28} \geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ betragen soll. Alternativ könnte der CBR-Wert geprüft werden. Dieser sollte bei 28 Tage alten Proben $CBR_{028} \geq 30 \%$ betragen. Nach 24 Stunden Wasserlagerung sollte der Festigkeitsabfall $< 50 \%$ sein.

2 Literatur

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

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1994): Technische Prüfvorschriften für Trag-schichten mit hydraulischen Bindemitteln (TP HGT-StB 94), Köln, Ausgabe 1994.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (1997): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im

Straßenbau (ZTV E-StB 94), Köln, Ausgabe 1994/Fassung 1997.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2004): Merkblatt für Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen mit Bindemitteln, Köln, Ausgabe 2004.

Lottmann, A. (2004): Einflüsse des Gebrauchsverhaltens kalkbehandelter frostempfindlicher Böden im Planumbereich von Verkehrsflächen auf den frostsicheren Oberbau, (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik ; 895).