

Entwicklung eines Schnelltests zur frühzeitigen Erkennung der Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk

FA 5.125

Forschungsstellen: Fachhochschule Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen
(Prof. Dr.-Ing. W. Krajewski) /
Baustoff- und Bodenprüfstelle Wetzlar

Bearbeiter: Krajewski, W. / Kuhl, O.

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

Abschluss: Februar 2005

1. Zielsetzung

Im Straßenbau hat sich in den vergangenen Jahrzehnten die Behandlung von vergleichsweise feuchten Böden durch Zumischung von Weißfeinkalk oder Kalkhydrat bewährt. Die Maßnahme zielt in der Regel alleine auf die Optimierung baubetrieblicher Belange. Bei der dauerhaften Bemessung des Oberbaus wird die Verbesserung der Bodeneigenschaften dagegen i. a. nicht berücksichtigt, obwohl bekannt ist, dass die Tragfähigkeit und die Frostbeständigkeit fein- und gemischtkörniger Böden durch die Zugabe von Kalk nachhaltig verbessert werden können.

In verschiedenen Forschungsarbeiten wird aktuell der Frage nachgegangen, unter welchen Bedingungen zukünftig ein mit Kalk behandeltes Planum auf die Dicke des frostsicheren Oberbaus angerechnet werden kann. Die in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten behandeln einen Teilaspekt dieser Fragestellung. Zielstellung ist die Erarbeitung und Evaluierung von Prüfverfahren zur Bestimmung der Reaktionsfähigkeit von fein- und gemischtkörnigen Böden mit Branntkalk und Kalkhydrat. Infrage kommen hierfür ausschließlich einfache Schnelltests, die im Zuge allgemeiner bodenmechanischer Untersuchungen vorgenommen werden können.

2. Untersuchungsmethodik und Ergebnisse

Die Forschungsaufgabe wurde anhand von Laboruntersuchungen in der Fachhochschule Darmstadt und der Baustoff- und Bodenprüfstelle Wetzlar bearbeitet. Für die Arbeiten wurden zunächst fünf verschiedene feinkörnige Böden ausgesucht. Es handelt sich nach DIN 18196 um Böden der Gruppen UL, TM, TL und SE. Die Böden wurden mit drei unterschiedlichen Kalcken (Kalkhydrat, Weißfeinkalk CL 90 und CL 80) und unterschiedlichen Kalkgehalten (3 bzw. 6 M.-%) beaufschlagt. Der Einfluss der Kalkzugabe auf die Festigkeitseigenschaften nach Wasserlagerung und Frost-Tau-Wechselbeanspruchung wurde anschließend systematisch mit modifizierten CBR-Tests und einaxialen Druckversuchen geprüft. Diese Labortests wurden nach unterschiedlichen Einwirkungsauern der Kalkbehandlung (7, 28, 182 und 365 Tage) sowie bei unterschiedlichen Lagerungstemperaturen (20 und 40 °C) ausgeführt.

Parallel zu den Festigkeitsprüfungen wurden folgende bodenchemischen Prüfungen an den Böden vorgenommen:

- Schnelltest nach der "Franke-Methode",
- Messung der zeitlichen Entwicklung des pH-Wertes,
- Messungen des pH-Wertes in einer Boden-Bindemittel-Suspension.

In der Arbeit wurde untersucht, ob und ggf. inwiefern Korrelationen zwischen den Resultaten der Schnelltests und der Festigkeitsprüfungen bestehen und formulierbar sind.

2.1 CBR-Tests

Die CBR-Tests ergaben, dass die Böden ausnahmslos empfindlich gegenüber Wasserlagerung und Frost-Tau-Beanspruchung sind. Die Zugabe von Kalk verbessert die Festigkeitseigenschaften signifikant. Hinsichtlich der Messergebnisse wurden zusammenfassend die in Bild 1 dargestellten Ergebnisse erhalten. Folgende Zusammenhänge werden deutlich:

- Grundsätzlich ist festzustellen, dass die CBR- und die CBRW-Werte der kalkbehandelten Böden bei gleicher Lagerungsdauer stets dicht beieinander liegen. Die Werte nehmen mit dem Tonanteil zu.
- Eine höhere Kalkdosierung über 3 M.-% hinaus führt bei niedrigem Tonanteil des Bodens zu keiner signifikanten Verbesserung der CBR- bzw. CBRW-Werte. Mit zunehmendem Tonanteil macht sich dagegen eine höhere Kalkzugabe positiv bemerkbar. Die Festigkeitsverbesserung ist jedoch vergleichsweise gering und wird erst nach längerer Einwirkdauer der Kalkbehandlung (182 d) deutlich.

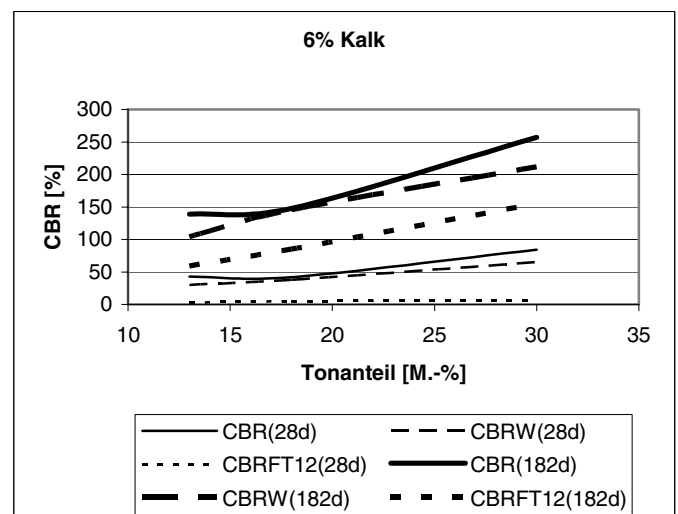
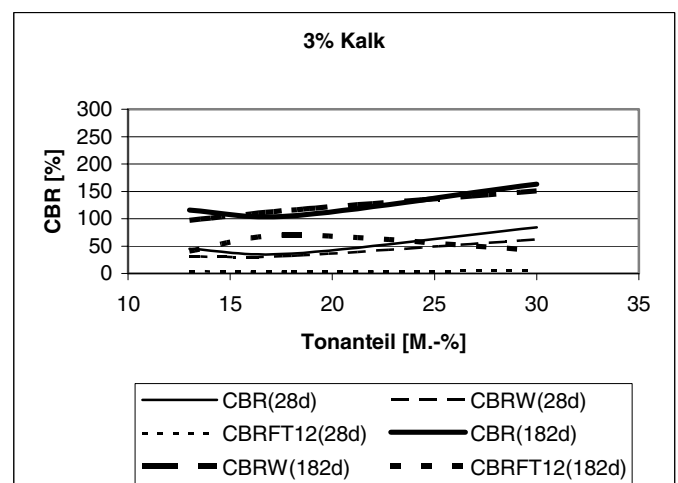


Bild 1: CBR-, CBRW- und CBRFT12-Werte nach Kalkbehandlung in Abhängigkeit vom Tonanteil der Böden

- Die Kalkbehandlung führt zu einer höheren Beständigkeit und Festigkeit der Böden nach Frost-Tau-Wechselbean-

spruchung. Diese Verbesserung der Bodeneigenschaften ist 28 Tage nach der Kalkbehandlung jedoch erst schwach ausgeprägt und kann zu diesem Zeitpunkt zu keiner veränderten Einstufung der Frostempfindlichkeit führen. Im Laufe der Zeit verbessern sich die Eigenschaften der mit Kalk behandelten Böden signifikant. Nach ½ Jahr liegen die CBRFT12-Werte ausnahmslos im Bereich der Frostempfindlichkeitsklasse F1.

- Bei einer Kalkzugabe von 6 M.-% nimmt der CBRFT12-Wert ausgeprägt mit dem Tonanteil des jeweiligen Bodens zu. Interessanterweise ist dies bei der geringeren Kalkzugabe von 3 M.-% nicht durchgängig der Fall. Bei den schluffigen Böden nimmt die Festigkeit nach Frost-Tau-Beanspruchung zwar zunächst mit dem Tonanteil zu, ab einem Tonanteil von ca. 20 M.-% kehrt sich die Tendenz dann jedoch um. Bei diesen Böden ist nach den vorliegenden Versuchsergebnissen eine eher hohe Kalkdosierung notwendig.

2.2 Schnelltests

"Franke-Methode"

In der Anfangsphase der Untersuchungen waren die Prüfergebnisse unregelmäßig und folgten zunächst keiner allgemeinen Tendenz. Der Zeitabschnitt unregelmäßiger Versuchsergebnisse dauerte bei einer Lagerungstemperatur der Böden von 20 °C etwa 1 bis 2 Monate. Bei höheren Lagerungstemperaturen (40 °C) wird vermutlich die puzzolanische Reaktion des Kalkes mit dem Boden deutlich beschleunigt. In diesen Tests konnte bereits nach wenigen Tagen eine stetige Veränderung der Messwerte beobachtet werden. Aus diesem Grund wurden im Forschungsvorhaben bevorzugt die Ergebnisse der bei höheren Temperaturen durchgeführten Prüfungen diskutiert und ausgewertet.

Der zu Beginn der Untersuchungen vorhandene Gehalt an Calciumoxid hängt erwartungsgemäß von der Kalkdosierung ab. Ohne Kalkzugabe liegen die gemessenen CaO-Gehalte zwischen 0 M.-% und 0,04 M.-% und sind somit vernachlässigbar gering. Die Kalkzugabe von 3 M.-% führt zu CaO-Gehalten, die in verhältnismäßig weiten Grenzen zwischen etwa 0,7 M.-% und 1,8 M.-% (bindige Böden) bzw. 2,26 M.-% (Boden Grünberg) schwanken. Die weitere Verdoppelung der Kalkzugabe auf 6 M.-% führt i. a. auch etwa zu einer Verzweifachung der CaO-Gehalte. Allerdings bestehen bei einzelnen Proben Abweichungen von dieser Regel.

Die mit der "Franke-Methode" vorgenommenen bodenchemischen Untersuchungen ergaben, dass bei allen untersuchten Proben der Gehalt an freiem Calcium stetig mit der Zeit abnahm. Die Veränderung ist nicht linear. Der Gehalt an Calciumoxid strebt i. a. einem Wert nahe 0 % zu. Während der Versuchszeit von einem Jahr wurde keine vollständige Konvergenz der Resultate festgestellt.

Vergleicht man die Abnahme des CaO-Gehaltes mit den CBR-Werten nach Frost-Tau-Wechselbeanspruchung wird deutlich, dass die Veränderung des Calciumoxid-Gehaltes mit der Größe des CBRFT12-Wertes zunimmt. Dies bedeutet, dass eine vergleichsweise starke Abnahme des CaO-Gehaltes eine vergleichsweise hohe Frostbeständigkeit anzeigt. Es wurde versucht, den Zusammenhang mit Hilfe einer linearen Regressionsrechnung mathematisch zu beschreiben. Die Korrelationskoeffizienten sind mit $R \approx 0,6$ vergleichsweise gering und zeigen, dass der dargelegte Zusammenhang lediglich eine qualitative Aussagekraft hat. Allerdings wird auch deutlich, dass in der vorliegenden groben Genauigkeit die CaO-Analyse durchaus Schlussfolgerungen für die Frost-Tau-Beständigkeit zulässt. Die grundsätzliche Eignung des Versuchs als Schnelltest ist somit vermutlich gegeben.

Veränderung des pH-Wertes

Die pH-Werte der unbehandelten Böden betragen etwa 8,5 bis 9 (feinkörnige Böden) und ca. 9,5 bis 10 (Sand). Nach der Kalkzugabe erhöht sich der pH-Wert erwartungsgemäß und beträgt einheitlich bei allen Böden $pH = 12$ bis 13. Die Messwerte streuen im genannten Bereich, wobei die Proben mit hoher Kalkdosierung (6 M.-%) am oberen Rand und dementsprechend die Böden mit geringerer Kalkzugabe am unteren Rand der Bandbreite liegen. Bei gleicher Kalkdosierung dürften die vorhandenen Unterschiede im Wesentlichen auf Streuungen in der Kalkzugabe und insbesondere auf die unterschiedlichen CaO-Gehalte der Kalksorten zurückzuführen sein.

Über die Zeit ist eine geringfügige Veränderung der pH-Werte zu erkennen, die jedoch nicht signifikant ist und auch keine Aussagen zur Frostbeständigkeit der Proben zulässt.

pH-Test

Die Untersuchungen zeigten, dass bei allen Böden mit zunehmender Zeit eine Abnahme des pH-Wertes zu beobachten ist. Die größten pH-Wert-Änderungen wurden beim ausgeprägt plastischen Ton (TA) festgestellt. Die geringste Änderung des pH-Wertes wurde beim schluffigen Sand (SU) beobachtet. Bei allen untersuchten Proben konnte festgestellt werden, dass nach einer Reaktionszeit von 240 Minuten ein Großteil der pH-Wert-Änderungen erfolgt ist. Die Verlängerung der Reaktionszeit bis 24 Stunden führt zu einer weiteren stetigen Abnahme des pH-Wertes. Eine weitere Spreizung der Untersuchungsergebnisse bzw. eine zusätzliche Information zu einem evtl. unterschiedlichen Reaktionsverhalten der einzelnen Böden wird allerdings nicht erzielt. Für die weiteren Betrachtungen wurde daher der "240 Minuten-Wert" herangezogen.

Bei den beiden Weißfeinkalken (CL 80 und CL 90) wurden keine grundsätzlichen Unterschiede bei den Versuchsergebnissen beobachtet. Die Verwendung von Calciumhydroxid führt vergleichsweise zu geringeren pH-Werten (Bild 2). Dieses Ergebnis ist auf den bei den Feinkalken größeren absoluten Anteil an CaO zurückzuführen.

Die Auswertung der ermittelten Messkurven (Bild 2) kann mit unterschiedlichen Ansätzen erfolgen. Ein Hinweis für die Kalkmenge, die ein Boden binden kann, ist der Wert, ab dem der pH-Wert nicht mehr oder nur sehr geringfügig ansteigt. Ferner kann aus dem Verlauf der Kurve ein Rückschluss auf die für die Reaktion benötigte Kalkmenge geschlossen werden. In den idealisiert betrachteten linear verlaufenden Anfangs- und Endbereichen der Kurve kann jeweils eine Tangente angelegt werden. Der Schnittpunkt zeigt die Kalkmenge an, die der Boden innerhalb der Reaktionszeit bindet.

Ein anderer Ansatz zur Auswertung besteht darin, die Untersuchungsergebnisse auf einen vorgegebenen pH-Wert zu beziehen. Wenn ein bestimmter pH-Wert, z. B. $pH = 12,4$ erreicht wird, liegt die optimale Kalkmenge vor. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass Kalke aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung und damit verbundenen Alkaligehalte auch bei der maximalen Höhe des pH-Wertes der "reinen" Kalkwassersuspension differieren. Dieses könnte bei der Auswertung korrigiert werden, indem ein pH-Wert von z. B. $\max pH - 0,2$ zur Ermittlung der optimalen Kalkmenge vorgegeben wird, wobei $\max pH$ der pH-Wert ist, der nach einer Reaktionszeit von 240 Minuten in einer 10 M.-%igen Kalksuspension gemessen wird.

Bei den hier untersuchten Böden kann davon ausgegangen werden, dass bis auf den Sandboden (SU) und den ausgeprägt plastischen Ton (TA) bei einer Kalkzugabe von 3 M.-% bis 4 M.-% Feinkalk die chemischen Reaktionen weitgehend abgeschlossen sind. Die Verwendung von Calciumhydroxid erfordert

etwas höhere Zugabemengen. Beim Sandboden ist schon bei einer Zugabemenge von 2 M.-% bis 3 M.-% Feinkalk ein relativ hoher pH-Wert erreicht. Der ausgeprägt plastische Ton (TA) benötigt ca. 5 M.-% Feinkalkzugabe.

3. Schlussfolgerungen

Bei den Prüfungen haben sich sämtliche natürlichen Böden als empfindlich gegen Wasserlagerung und Frost-Tau-Wechselbeanspruchung erwiesen. Nach Zugabe von Kalk konnten dagegen deutlich verbesserte Eigenschaften festgestellt werden. Allerdings ist es in jedem Fall erforderlich, eine längere Einwirkdauer der Kalkbehandlung von in der Regel mehreren Monaten zu ermöglichen.

Die Kalksorte beeinflusst die Ergebnisse nicht signifikant. Die Kalkdosierung hat auf die Festigkeit relativ tonarmer Schluffe sowohl nach Wasserlagerung als auch bei Frost-Tau-Wechselbeanspruchung eine eher geringe Bedeutung. Dagegen war bei dem untersuchten Ton der Gruppe TM eine verhältnismäßig hohe Dosierung erforderlich, um eine merkliche Verbesserung des Bodens zu bewirken.

Die positiven Auswirkungen der Kalkbehandlung lassen sich mit der "Franke-Methode" und der Messung des pH-Wertes in der Boden-Bindemittel-Suspension zumindest qualitativ erfassen. Insbesondere mit den Untersuchungen zum pH-Wert können Rückschlüsse auf das Kalkbindevermögen gewonnen werden. Die Kalkmenge, die ein Boden zur Reaktion benötigt, kann aus den Versuchsergebnissen abgeschätzt werden. Die Messung der zeitlichen Entwicklung des pH-Wertes nach Kalkbehandlung ist als Schnellmethode dagegen nicht geeignet. Erfolg versprechend scheint jedoch insbesondere die Erarbeitung eines Zusammenhangs zwischen Festigkeitsverhalten nach Frost-Tau-Wechselbeanspruchung und Feinkornanteil der Böden zu sein. Die Arbeit enthält hierzu Lösungsansätze.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Behandlung mit Kalk erst über Langzeitreaktionen zu einer deutlichen Verbesserung von Wasser- und Frostbeständigkeit führt. Dieses Verhalten ist offensichtlich mit bodenchemischen Schnelltests nur bedingt zu erfassen. Für die weiteren Forschungsarbeiten wird empfohlen, bei der Bewertung zwischen den Bindemittelgehalten zu unterscheiden, die für eine Kurzzeit- bzw. für eine Langzeitreaktion benötigt werden.

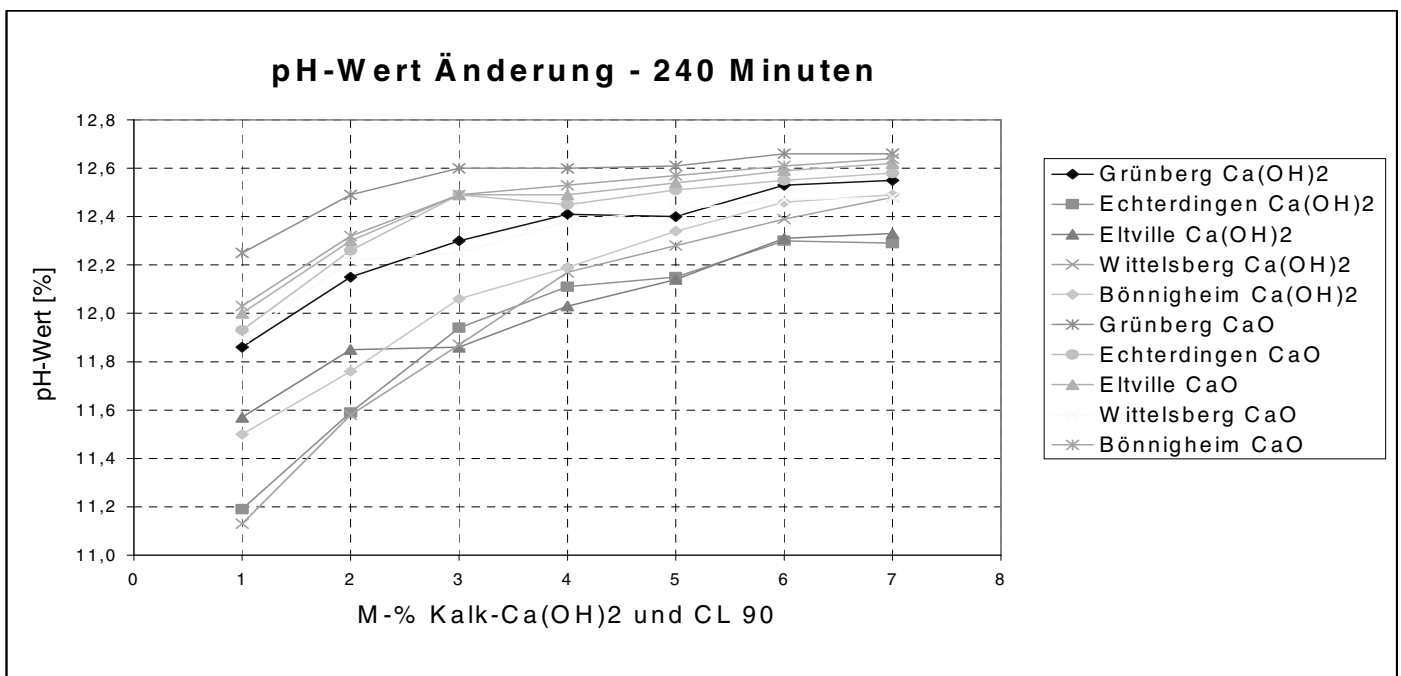


Bild 2: Verlauf des pH-Wertes bei der Zugabe von Calciumhydroxid und CL 90

