

Möglichkeiten der Verbesserung von natürlichen mineralischen Dichtungstoffen hinsichtlich Standsicherheit, Erosionsstabilität und Verdichtbarkeit

FA 5.116

Forschungsstelle: Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfam für Grundbau, Boden- und Felsmechanik (Prof. Dr.-Ing. R. Floss)

Bearbeiter: Fillibeck, J. / Berger, H.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bonn

Abschluss: November 2001

1. Aufgabenstellung

Zum Schutz vor verkehrsbedingten Belastungen sind für Verkehrsflächen unter anderem Abdichtungen aus natürlich anstehenden, fein- oder gemischtkörnigen Böden vorgesehen. Häufig weisen derartige Böden aber zu hohe Wassergehalte oder eine zu geringe Kohäsion auf, so dass sie nicht mehr hinreichend verdichtbar bzw. in Böschungen mit Regelneigungen $h : b = 1 : 1,5$ nicht mehr standsicher einbaubar sind. Eine Bodenverbesserung mit Kalk, die bei Böden mit hohen Wassergehalten häufig eingesetzt wird, führt zwar zu einer Verbesserung der Verdichtbarkeit bzw. der Scherfestigkeit, nach bisherigen Erkenntnissen ist damit jedoch auch eine bei Dichtungsmaterialien nicht erwünschte Erhöhung der Durchlässigkeit verbunden.

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wurde untersucht, inwieweit durch das Einmischen von einem oder mehreren Zugabestoffen eine Verbesserung mineralischer Dichtungsmaterialien in dem Sinne erzielt wird, dass die Anforderungen hinsichtlich Verdichtbarkeit, Tragfähigkeit und Durchlässigkeit erreicht werden.

2. Untersuchungsmethodik

Zur Ermittlung der Veränderung der Bodeneigenschaften infolge von Zugabestoffen hinsichtlich der oben genannten Thematik wurden zunächst die bisher aus der Literatur bekannten Grundlagen zur Bodenverbesserung mit Kalk zusammengefasst. Zu der daran anschließenden Ausführung von Reihenuntersuchungen im Labor wurden drei verschiedene Böden ausgewählt:

- Leichtplastischer Ton (TL)
- Sand-Ton-Gemisch (ST*)
- Sand-Kies-Gemisch, stark schluffig (SU*)

Als Zugabestoffe wurden jeweils in verschiedenen Mengen Feinkalk, ein Gemisch aus Diabasmehl und Zement (DZ) sowie Tonmehl verwendet.

Im Labor wie auch im Rahmen eines Versuchsfeldes kamen folgende Versuche zur Anwendung:

- Laborversuche:
 - Proctorversuch (DIN 18127)
 - CBR-Versuch (TP BF-StB, Teil B 7.1)
 - Einaxialer Druckversuch (DIN 18136)
 - Durchlässigkeitsversuch (DIN 18130)
 - Triaxialversuch (DIN 18137-2)
- Feldversuche:
 - Dynamischer Plattendruckversuch (TP BF-StB, Teil B 8.3)
 - Statischer Plattendruckversuch (DIN 18134)

Die umfangreichsten Untersuchungen wurden mit dem TL durchgeführt. Um den Einfluss des Wassergehaltes der Böden auf die Durchlässigkeit und den CBR-Wert zu untersuchen, wurde mit dem TL bei unterschiedlichen Zugabestoffanteilen die Durchlässigkeit und der CBR-Wert an mit Proctorarbeit verdichteten Proben mit Wassergehalten $w < w_{Pr}$, $w = w_{Pr}$ und $w > w_{Pr}$ ausgeführt. Die Wassergehalte $w < w_{Pr}$ und $w > w_{Pr}$ wurden so gewählt, dass sich nach der Verdichtung mit Proctorarbeit ein Verdichtungsgrad von ca. 95 % ergab.

Für weitere Versuchsreihen, mit dem TL, dem ST* und dem SU* wurden die Probekörper mit einem so hohen Einbauwassergehalt vorbereitet, dass der gewählte Verdichtungsgrad durch Proctorarbeit ohne Zugabestoffe nicht mehr erreicht werden konnte. Durch ein Einmischen von Zugabestoffen in die untersuchten Böden sollte dies dann ermöglicht werden. Diese Situation entspricht dem praktischen Anwendungsfall, bei welchem Böden mit zu hohem Wassergehalt Zugabestoffe zur Bodenverbesserung beigemischt werden.

Außerdem wurden mit dem TL Vergleichsuntersuchungen zwischen dem Triaxial- und dem CBR-Versuch durchgeführt. Den am TL ohne Zugabestoffe ermittelten Ausgangswerten wurden die jeweiligen Ergebnisse aus den Versuchen mit TL + Zugabestoffen gegenübergestellt. Jedes dieser Bodengemische wurde bei 100 % ($w = w_{Pr}$) und 95 % Proctordichte ($w < w_{Pr}$ und $w > w_{Pr}$) untersucht.

Im Rahmen der Baumaßnahme "Flughafen Leipzig" konnte ein Versuchsfeld angelegt werden, auf dem untersucht wurde, welche Unterschiede sich hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Verdichtbarkeit durch Zugabe von Kalk, Tonmehl + Kalk und dem DZ-Gemisch ergeben. Um diese Vergleiche aufstellen zu können, wurden für die Versuche vor Ort die dynamische Lastplatte und der statische Plattendruckversuch herangezogen. Es sollte überprüft werden, ob die hinsichtlich der Verbesserung mineralischer Dichtungsstoffe im Labor gewonnenen Erkenntnisse auch praxisrelevant sind. Dafür wurden für weitere Untersuchungen im Labor aus dem Versuchsfeld mehrere Proben entnommen. Bei dem hierfür verwendeten Boden handelte es sich um einen ST*, der aus der gleichen Halde entnommen wurde wie der ST*, der für die vorab durchgeführten Laborversuche eingesetzt wurde.

3. Untersuchungsergebnisse

Im Rahmen der Laboruntersuchungen konnten die aus der Literatur bekannten Sofortreaktionen bei Kalkzugabe bestätigt werden. Sie lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Erhöhung des Proctorwassergehaltes bei Reduzierung der Proctordichte,
- Erhöhung der Tragfähigkeit infolge eines erhöhten Wasserbindungsvermögens und einer Aggregatstrukturausbildung,
- Erhöhung der Durchlässigkeit bei Wassergehalten unterhalb des Proctorwassergehaltes als Folge einer Strukturumwandlung von der homogenen Einzelkornstruktur zur Aggregatstruktur des Gemisches,
- nach Kalkzugabe Reduzierung der Wasseraufnahme bei Wasserzutritt.

Allgemein ist die Durchlässigkeit bindiger Böden entscheidend vom Einbauwassergehalt abhängig. Bei Wassergehalten unterhalb des Proctorwassergehaltes liegen die Böden in Aggregatstruktur (Krümel) vor und besitzen aufgrund der großen Poren zwischen den Aggregaten eine vergleichsweise hohe Durchlässigkeit.

sigkeit. Bei Wassergehalten oberhalb des Proctorwassergehaltes besitzen die Böden homogene Einzelkornstruktur, wesentlich kleinere Poren und damit eine sehr viel geringere Durchlässigkeit. Die Strukturänderung des Bodens in Abhängigkeit vom Einbauwassergehalt ist unabhängig vom Zugabestoff festgestellt worden, wenngleich sie durch Kalk in besonderem Maße gefördert wird. Neben der Strukturänderung bewirkt auch eine geringere Trockendichte eine Erhöhung der Durchlässigkeit des Bodens bzw. Boden-Zugabestoff-Gemisches. Daher sollte entsprechend den Anforderungen im Deponiebau gefordert werden, dass der Einbauwassergehalt des Boden-Zugabestoff-Gemisches höher ist, als der Proctorwassergehalt.

Bezüglich der Kalkzugabemenge ist zu berücksichtigen, dass bei konstantem Wassergehalt die Durchlässigkeit mit zunehmendem Kalkanteil ansteigt. Andererseits ergibt sich aus der Forderung nach einer möglichst hohen Tragfähigkeit auch eine Mindestzugabemenge von Kalk. Es handelt sich hierbei also um einen Optimierungsprozess, der im praktischen Anwendungsfall – z. B. im Rahmen der Eignungsprüfung – zu führen ist.

Bei den hier durchgeführten Untersuchungen stiegen die Durchlässigkeitsbeiwerte zum Teil über $k = 1 \times 10^{-8}$ m/s an, auch wenn der Einbauwassergehalt größer als der Proctorwassergehalt des Boden-Zugabestoff-Gemisches war. Es wurde daher untersucht, ob die Zugabe von Tonmehl zum Kalk-Boden-Gemisch wieder zu einer Reduzierung der Durchlässigkeit führt. Ein Vergleich der untersuchten Boden-Kalk-Gemische mit den Boden-Kalk-Tonmehl-Gemischen zeigt dabei, dass durch Tonmehl eine geringe Reduzierung der Durchlässigkeit erreicht wird, was durch die Erhöhung des Feinkornanteils begründet werden kann. Die Durchlässigkeit lag jedoch immer deutlich über der des natürlichen Bodens. Dies kann damit begründet werden, dass mit Tonmehl die Aggregatstrukturbildung nicht verhindert wird. Die Tragfähigkeit des Boden-Kalk-Gemisches wurde durch die Zugabe von Tonmehl nur unwesentlich beeinflusst. Insgesamt gesehen ist somit die Zugabe von Tonmehl zum Boden-Kalk-Gemisch zur Verbesserung mineralischer Dichtungsmaterialien nur bedingt geeignet.

Alternativ zur Verwendung von Kalk wäre eine Verbesserung der Tragfähigkeit mit Zement oder dem hier untersuchten DZ-Gemisch möglich. Wie die durchgeführten Untersuchungen sowie die mit Zement bereits vorliegenden Erfahrungen zeigen, erhöht sich durch diese Zugabestoffe die Durchlässigkeit nicht in dem Ausmaß wie durch die Zugabe von Kalk. Bei bindigen Böden mit hohem Wassergehalt kann es eventuell jedoch schwierig sein, den Zugabestoff homogen einzumischen.

Eine wesentliche Erkenntnis aus den Feldversuchen ist, dass die hierbei ermittelten Versuchsergebnisse sehr viel stärker streuen, als die Versuchsergebnisse der im Labor aufbereiteten Böden. Der Grund ist darin zu sehen, dass einerseits durch die Aufbereitung im Labor das Ausgangsmaterial sehr viel homogener als im Feld vorliegt. Weiterhin können im Labor die Randbedingungen der Versuche wie z. B. der Einbauwassergehalt und die Einbaudichte oder der Zugabestoffanteil gezielter eingestellt und kontrolliert werden. Hingegen liegt der Boden in der Praxis, wie auch beim Versuchsfeld, meist nicht so homogen vor. Beispielsweise sind bei einer mehreren hundert Meter langen Straßenbaumaßnahme Inhomogenitäten beim Wassergehalt, der Korngrößenverteilung und der Plastizität in der Regel immer gegeben. Auch beim Einbau und der Verdichtung des Bodens sowie beim Einmischen der Zugabestoffe ergeben sich in situ deutlich größere Streuungen als unter den genau definierten Bedingungen im Labor. Aufgrund dessen wird empfohlen, im Rahmen von vorab durchzuführenden Eignungsprüfungen eine maximale Durchlässigkeit $k < 1 \times 10^{-8}$ m/s zu fordern, damit die Anforderung nach RiStWag von $k < 1 \times 10^{-7}$ m/s sicher eingehalten ist. Diese Anforderung liegt noch unter derjenigen beim Deponiebau ($k = 5 \times 10^{-9}$ m/s bei Oberflächenabdichtungen bzw. 5×10^{-10} m/s bei Basisabdichtungen). Dies ist gerechtfertigt, wenn man das geringere Gefährdungspotenzial, die geringere Einwirkdauer des wassergefährdenden Stoffes (z. B. bei einem

Unfall beim Transport mit wassergefährdenden Stoffen) und die Möglichkeit einer gewissen Aufnahmekapazität an wassergefährdenden Stoffen in die Dichtung mit einem späteren Austausch der kontaminierten Bereiche berücksichtigt.

Die Vergleichsuntersuchungen zwischen dem Triaxial- und dem CBR-Versuch zeigten, dass der Triaxialversuch zur Ermittlung von Scherparametern beispielsweise für Standsicherheitsberechnungen nicht durch den CBR-Versuch ersetzt werden kann. Der CBR-Versuch ist jedoch gut geeignet, um grundsätzliche Aussagen über die Wirksamkeit bzw. über die Auswirkungen bezüglich der Tragfähigkeit bzw. der Scherfestigkeit von Zugabestoffen zur Bodenverbesserung machen zu können. Der wesentliche Vorteil des CBR-Versuches ist die schnellere und einfachere Versuchsdurchführung.

4. Folgerungen für die Praxis

Nach der RiStWag sind als mineralische Abdichtungen Böden geeignet, deren Korngrößenanteile folgende Bedingungen erfüllen:

- Korngröße $< 0,02$ mm: Anteil > 15 Masse %,
- Korngröße $> 0,06$ mm: Anteil > 20 Masse %.

Ersatzweise gilt ein Durchlässigkeitsbeiwert $k < 1 \times 10^{-7}$ m/s für den verdichteten Boden als ausreichend.

Infolge der Erkenntnisse der im Rahmen dieses FE-Vorhabens durchgeführten Untersuchungen sollte außerdem Folgendes berücksichtigt werden:

- Aufgrund der größeren Streuungen, die in situ gegenüber den Versuchen im Labor zu erwarten sind, wird empfohlen, im Rahmen einer Eignungsprüfung einen Durchlässigkeitsbeiwert $k < 1 \times 10^{-8}$ m/s zu fordern.
- Bei allen untersuchten Proben nimmt die Durchlässigkeit mit steigendem Einbauwassergehalt stark ab. Daher sollte ein Einbauwassergehalt des Bodens bzw. des Boden-Zugabestoff-Gemisches gefordert werden, der größer ist als der zugehörige Proctorwassergehalt.
- Bei den hier durchgeführten Durchlässigkeitsuntersuchungen ergaben sich bei Einbauwassergehalten oberhalb des Proctorwassergehaltes und bei Verdichtung mit Proctorarbeit unabhängig vom Zugabestoff meist Durchlässigkeitsbeiwerte von $k < 1 \times 10^{-8}$ m/s. Erfahrungsgemäß kann davon ausgegangen werden, dass bei gemischtkörnigen Böden, bei denen der Feinkornanteil $< 0,063$ mm die Eigenschaft des Bodens bestimmt und bei feinkörnigen Böden (Feinkornanteil $< 0,063$ mm größer als 40 %) die Durchlässigkeitsanforderung $k < 1 \times 10^{-8}$ m/s erfüllt ist, wenn der Einbauwassergehalt auf der nassen Seite der Proctorkurve liegt.
- Zum Erreichen einer ausreichenden Tragfähigkeit bzw. Erosionsstabilität sollte zusätzlich ein minimaler Verdichtungsgrad des Boden-Zugabestoffgemisches von 95 % D_{Pr} gefordert werden.
- Mit zunehmendem Kalkanteil steigt zwar die Tragfähigkeit des Bodens, es nimmt jedoch auch die Durchlässigkeit zu.
- Bei der Zugabe von Tonmehl wurde nahezu kein Einfluss auf die Tragfähigkeit der untersuchten Böden festgestellt. Die Durchlässigkeit gegenüber dem Kalk-Boden-Gemisch wurde durch Tonmehlzugabe nur geringfügig reduziert. Daher ist Tonmehl zur Verbesserung der Abdichtungseigenschaften nur bedingt geeignet.
- Zur Verbesserung der Tragfähigkeit ist neben Kalk auch Zement oder das hier untersuchte Diabas-Zement-Gemisch einsetzbar. Hierbei erhöht sich die Durchlässigkeit nicht in dem Ausmaß wie nach Kalkzugabe, was im vorliegenden Anwendungsfall günstig ist. Bei bindigen Böden mit hohem Wassergehalt kann es eventuell jedoch schwierig sein, den Zugabestoff homogen einzumischen. □