

# Untersuchungen zur Verdichtbarkeit von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Hinblick auf die Erzielung möglichst gering durchlässiger Erdbaukörper

FA 5.150

Forschungsstelle: Technische Universität München, Zentrum Geotechnik, Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau (Prof. Dr.-Ing. N. Vogt)

Bearbeiter: Stalter, S. / Heyer, D. / Birle, E.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Oktober 2012

## 1 Aufgabenstellung

Werden bei der Herstellung von Erdbauwerken Böden und Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen verwendet, sind ab bestimmten Schadstoffbelastungen technische Sicherungsmaßnahmen zu ergreifen, damit eine Durchsickerung des Erdbauwerks und somit ein möglicher Austrag von Schadstoffen weitgehend verhindert werden kann. Als technische Sicherungsmaßnahmen werden im Wesentlichen Abdichtungssysteme verstanden. Eine besondere Form der technischen Sicherungsmaßnahme sieht vor, den aus o. g. Böden und Baustoffen bestehenden Erdbaukörper in der Art herzustellen, dass dieser selbst eine ausreichend geringe Durchlässigkeit aufweist. Eine ausreichend geringe Durchlässigkeit lässt sich in der Regel durch eine Verwendung von bindigen Böden erreichen. Inwiefern auch gemischtkörnige Böden verwendet werden können, ist unklar und hängt von deren hydraulischen Eigenschaften ab. Weil der Einbau dieser Materialien ausschließlich oberhalb des Grundwassers zu erfolgen hat, ist insbesondere bei der Beurteilung ihrer Durchlässigkeitseigenschaften von ungesättigten Verhältnissen auszugehen. Für die numerische Simulation der hydraulischen Vorgänge im ungesättigten Boden ist daher neben der gesättigten Durchlässigkeit auch die Kenntnis der oft als Bodenzustandsfunktionen bezeichneten Zusammenhänge im ungesättigten Zustand erforderlich. Diese sind in noch unbekanntem Umfang abhängig von den Einbaubedingungen wie Einbaudichte, Einbauwassergehalt und Luftporenanteil.

Im Rahmen des Forschungsauftrags sollte zunächst untersucht werden, welche Anforderungen an Böden und Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung einzuhalten sind, damit diese prinzipiell für die Herstellung ausreichend gering durchlässiger Erdbauwerke geeignet sind. Darauf aufbauend sollte an ausgewählten Böden das hydraulische Verhalten sowohl im gesättigten als auch im ungesättigten Zustand experimentell ermittelt werden. In einem letzten Schritt sollte überprüft werden, ob die nur mit einem erheblichen Zeitaufwand experimentell gewinnbaren Erkenntnisse mit einfachen Versuchen oder mithilfe sogenannter Podo-Transfer-Funktionen verifiziert werden können, um so ein für die Baupraxis handhabbares Vorgehen der hydraulischen Beurteilung von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen bereitzustellen.

## 2 Untersuchungsmethodik

Mit der im "Merkblatt über Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau (M TS E)" der FGSV als "Bauweise E" bezeichneten technischen Sicherungsmaßnahme wird für das im Erdbaukörper eingebaute Material mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen ein Wasserdurchlässigkeitsbeiwert von  $k \leq 10^{-7}$  m/s gefordert. Mit der Einhaltung dieses Grenzwerts soll eine Durchsickerung und ein damit verbundener möglicher Austrag von Schadstoffen weitgehend vermieden werden.

Für die Untersuchungen sollten 3 repräsentative Böden ausgewählt werden, welche zum einen die Anforderungen an eine ausreichend geringe Durchlässigkeit erfüllen und zum anderen den wesentlichen Anteil des Stoffstroms aller verwerteten Böden und Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen abbilden. Bei der Betrachtung der Stoffströme wurde die Fraktion "Bodenaushubmaterial" als der mengenmäßig bedeutsamste Anteil identifiziert. Demzufolge wurden für die weiteren Untersuchungen drei Böden aus dieser Fraktion ausgewählt.

Einerseits ist davon auszugehen, dass die geforderte geringe Durchlässigkeit mit grobkörnigen und frostunempfindlichen Böden (Kiese, Sande) nicht zu erreichen ist, weshalb diese Böden nicht näher betrachtet wurden. Andererseits werden bei der Verwendung feinkörniger Böden in der Regel Durchlässigkeiten erzielt, welche die angestrebte Größenordnung deutlich unterschreiten. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen der Forschung untersucht, inwieweit die geforderte Durchlässigkeit mit gemischtkörnigen Böden in Abhängigkeit von ihren Einbaubedingungen erreicht werden kann.

Nach Düser (1999) kann in Abhängigkeit vom Größtkorndurchmesser und vom Körnungsexponenten ein ideales Korngemisch mit einer idealisierten stetigen Körnungslinie abgeschätzt werden, welches bei einem Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} = 100$  % eine vorgegebene maximale Wasserdurchlässigkeit unterschreitet. Für die Größtkorndurchmesser  $d_{max} = 4$  mm und  $d_{max} = 32$  mm wurden mit diesem Vorgehen für einen Durchlässigkeitsbeiwert im Bereich von  $10^{-7}$  m/s  $> k > 10^{-8}$  m/s jeweils theoretische Körnungslinienbänder ermittelt.

Um den Bereich der Körnungslinienbänder mit realen Böden abzudecken, wurden unter Variation des Feinkornanteils mehrere SU/SU\*- sowie GU/GU\*-Bodengemische aus einzelnen Kornfraktionen zusammengestellt. Für das als feinkörnige Fraktion verwendete Material wurde ein Boden verwendet, dessen Hauptmassenanteil der Schlufffraktion zuzuordnen ist.

Für die ausgewählten gemischtkörnigen Bodenmischungen und für einen organischen Tonboden (OT) wurde mit Proctorversuchen zunächst das Verdichtungsverhalten untersucht. Dabei wurden sowohl Versuche mit der normalen als auch mit der modifizierten Verdichtungsenergie ausgeführt. Damit sollten Verdichtungsanforderungen für diese Böden und Baustoffe gefunden werden, damit diese prinzipiell für die Herstellung

ausreichend gering durchlässiger Erdbauwerke verwendet werden können.

Darauf aufbauend wurde das hydraulische Verhalten der Böden im gesättigten Zustand untersucht, indem der gesättigte Wasserdurchlässigkeitsbeiwert bei verschiedenen Einbaubedingun- gen experimentell bestimmt wurde. Darauf aufbauend wurde an ausgewählten Böden der Zusammenhang zwischen Saugspan- nungen und Wassergehalt in Versuchszellen und das hydraulische Verhalten im ungesättigten Zustand in einem Säulenver- such ermittelt. Da Untersuchungen am ungesättigten Zustand mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden sind, sollte in einem letzten Schritt untersucht werden, inwiefern die gewon- nenen Versuchsergebnisse mithilfe von bereits vorhandenen Pedo-Transfer-Funktionen anhand vergleichsweise einfach zu bestimmender Bodenkenngößen abgeschätzt werden können.

### 3 Untersuchungsergebnisse

Anhand der vorgegebenen Auswahlkriterien wurden insgesamt sieben gemischtkörnige Böden und ein organischer Tonboden für das Untersuchungsprogramm ausgewählt. Bei den gemischtkörnigen Böden handelt es sich um vier SU/SU\*- und drei GU/GU\*-Bodenmischungen mit jeweils unterschiedlichen Feinkornanteilen.

Aus den Versuchsergebnissen zum Verdichtungsverhalten der untersuchten Bodenmischungen lassen sich getrennt nach SU/SU\* und GU/GU\* die Zusammenhänge zwischen Feinkorn- anteil ( $\varnothing < 0,06 \text{ mm}$ ) und Durchlässigkeitsbeiwert  $k$  bei einer Verdichtung mit der normalen Proctorenergie und einem Ver- dichtungsgrad von  $D_{Pr} = 100 \%$  (Bild 1) sowie bei einer Verdich- tung mit der modifizierten Proctorenergie und einem Verdich- tungsgrad von  $D_{Pr,mod} = 100 \%$  (Bild 2) darstellen.

Bei den untersuchten GU/GU\*-Böden mit einem Feinkornanteil im Bereich von 12,4 bis 19,7 % wurden sowohl in den Versu- chen mit normaler als auch mit modifizierter Verdichtungsener- gie beim Einbau mit  $D_{Pr} = 100 \%$  bzw.  $D_{Pr,mod} = 100 \%$  durch- weg gesättigte Durchlässigkeitsbeiwerte von  $k < 10^{-7} \text{ m/s}$  be- stimmt. Dabei nehmen – mit Ausnahme der GU/GU\*-Mischung mit dem größten Feinkornanteil bei einer Verdichtung mit der modifizierten Verdichtungsenergie – die ermittelten  $k$ -Werte mit zunehmendem Feinkornanteil tendenziell ab.

Bei den hergestellten SU/SU\*-Böden mit einem Feinkornanteil im Bereich von 12,0 bis 21,8 % konnte der angestrebte Durch- lässigkeitsbeiwert  $k = 10^{-7} \text{ m/s}$  beim Einbau mit der normalen (modifizierten) Verdichtungsenergie und  $D_{Pr} = 100 \%$  ( $D_{Pr,mod} = 100 \%$ ) erst bei den Mischungen mit einem höheren Feinkorn- anteil unterschritten werden. Analog zu den GU/GU\*-Böden nehmen auch hier die ermittelten  $k$ -Werte mit zunehmendem Feinkornanteil ab.

Die Versuchsergebnisse zur gesättigten Durchlässigkeit an den künstlich zusammengesetzten Böden mit idealisierten Kör- nungslinien konnten durch Vergleichsuntersuchungen an natür- lichen Böden mit ähnlichem Feinkornanteil bestätigt werden.

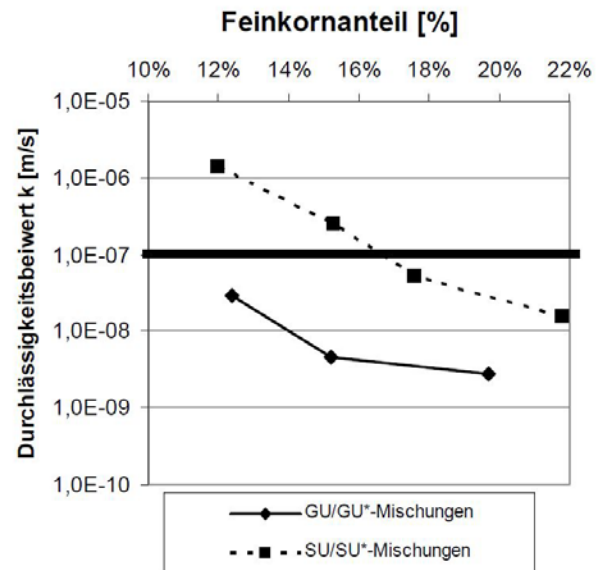


Bild 1: Zusammenhang zwischen Feinkornanteil und Durchlässigkeitsbeiwert bei normaler Proctorenergie und  $D_{Pr} = 100 \%$

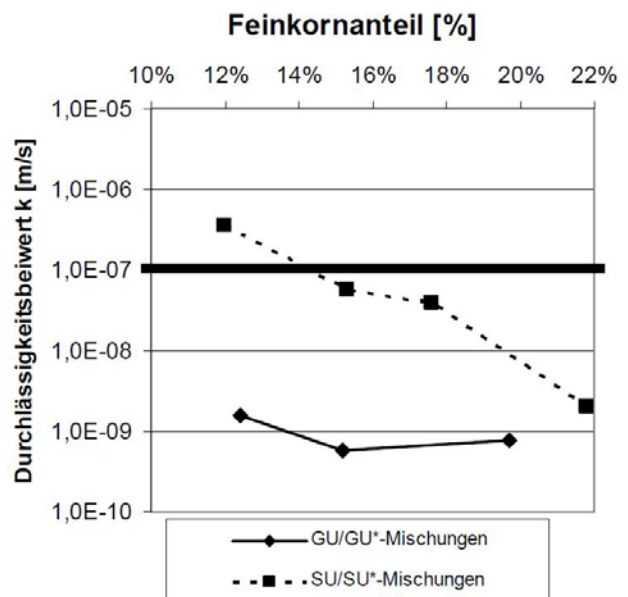


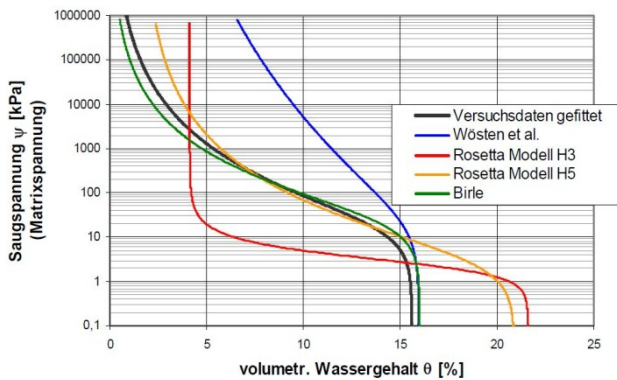
Bild 2: Zusammenhang zwischen Feinkornanteil und Durchlässigkeitsbeiwert bei modifizierter Proctorenergie und  $D_{Pr,mod} = 100 \%$

Nach Heyer (2001) wurde für feinkörnige mineralische Dichtungsstoffe die grundsätzliche Beeinflussung der gesättigten Wasserdurchlässigkeit durch den Luftporenanteil im Einbauzustand beschrieben. Daraus wurden Einbaubedingun- gen abgeleitet, damit die hohe Anforderung an den Wasserdurchlässigkeitsbeiwert mineralischer Abdichtungen eingehalten werden kann. Für die im Rahmen der Forschung untersuchten gemischtkörnigen Böden wurde ein ähnlicher Ansatz untersucht. Dazu wurde für jeden untersuchten gemischtkörnigen Boden

der Zusammenhang zwischen dem gesättigten Durchlässigkeitsbeiwert und dem Anfangsluftporenanteil ausgewertet. Es hat sich mit Ausnahme der SU/SU\*-Mischung mit dem geringsten Feinkornanteil gezeigt, dass mit einer Abnahme des Anfangsluftporenanteils die gesättigte Durchlässigkeit tendenziell abnimmt.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse im gesättigten Zustand wurden unter Berücksichtigung des jeweiligen Einbaustands Böden ausgewählt, die prinzipiell zur Herstellung ausreichend gering durchlässiger Erdbauwerke geeignet sind. An zwei SU/SU\*-Mischungen und an dem organischen Tonboden wurde die Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung für unterschiedliche Einbaubedingungen in Versuchszellen für den niedrigen Saugspannungsbereich bis etwa -850 hPa und mithilfe der Taupunktmethode für den höheren Saugspannungsbereich ab etwa -10 000 hPa experimentell bestimmt. Dabei wurden sowohl Entwässerungs- als auch Bewässerungsvorgänge untersucht. Die Versuchsergebnisse wurden mithilfe der Modellansätze nach van Genuchten und Brooks-Corey parametrisiert.

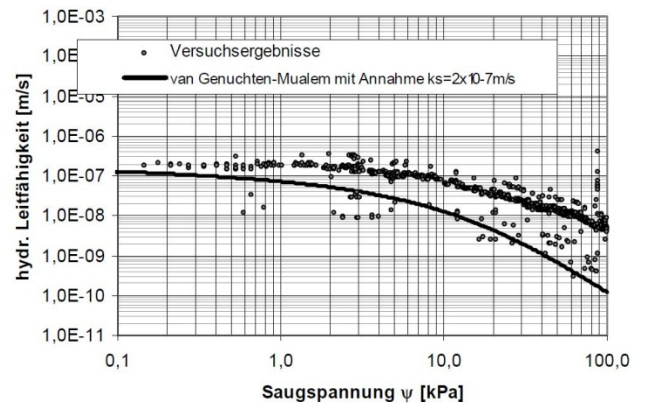
Des Weiteren wurde ein Vergleich der gewonnenen van Genuchten-Parametersätze mit bereits vorhandenen Pedo-Transfer-Funktionen (PTF) durchgeführt. Dabei wurden die aus der Bodenkunde stammenden PTF nach Wösten et al. (1999) und Schaap et al. (Rosetta) (2001) sowie die auf dem Gebiet der Geotechnik entwickelte PTF nach Birle (2012) untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass die PTF nach Birle bei den untersuchten gemischtkörnigen Böden eine gute Abschätzung der Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung ermöglicht (Bild 3).



**Bild 3: Vergleich Versuchsdaten mit Redo-Transfer-Funktionen am Beispiel eines verdichteten SU-Bodens**

In Säulenversuchen wurden an ausgewählten Bodenproben unter Vorgabe der jeweiligen Einbaubedingungen Untersuchungen zur hydraulischen Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand durchgeführt und mithilfe der Augenblicksprofilmethode (englisch: Instantaneous profile method) ausgewertet. Zunächst wurde die Bodensäule ausgehend vom Einbaustand vom unteren Probenrand komplett aufgesättigt. Mit Beginn des Verdunstungsvorgangs am oberen Probenrand wurde der Entwässerungsvorgang gestartet. In mehreren Auswerteebenen innerhalb des Probekörpers wurden kontinuierlich u. a. die Saugspannungen mittels Einstichtensiomern und die volumetrischen Wassergehalte mittels Feuchtesensoren gemessen und aufgezeichnet.

Die Versuchsergebnisse zeigen zu Beginn eines Entwässerungsvorgangs bzw. unmittelbar nach erfolgter Aufsättigung die maximale hydraulische Leitfähigkeit. Mit Zunahme der Saugspannungen kann eine Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit festgestellt werden (Bild 4). Mit dem Vorhersage-Modell für die hydraulische Leitfähigkeit im ungesättigten Zustand nach van Genuchten-Mualem wird die im Versuch festgestellte abnehmende Tendenz der hydraulischen Leitfähigkeit mit zunehmender Saugspannung bestätigt.



**Bild 4: Zusammenhang hydr. Leitfähigkeit-Saugspannung am Beispiel eines verdichteten SU-Bodens (Entwässerung)**

#### 4 Folgerungen für die Praxis

Die Ergebnisse zeigen, dass die für Böden und Baustoffe mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen als repräsentativ ausgewählten gemischtkörnigen Böden sowie der organische Ton prinzipiell zur Herstellung ausreichend gering durchlässiger Erdbaukörper geeignet sind. Bei der Herstellung eines Erdbaukörpers aus diesen Böden sind besondere Einbaubedingungen einzuhalten. Es hat sich gezeigt, dass ein SU/SU\*-Boden bei einer Verdichtung mit der normalen (modifizierten) Proctorenergie einen Feinkornanteil von etwa 17 % (14 %) aufweisen muss, damit eine gesättigte Wasserdurchlässigkeit  $k < 10^{-7}$  m/s erreicht werden kann. Für einen GU-Boden wurden geringere Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte als  $k = 10^{-7}$  m/s mit der normalen Proctorenergie bereits bei einem Feinkornanteil von ca. 12,5 % ermittelt. Gleichzeitig hat sich gezeigt, dass in Abhängigkeit des jeweiligen Feinkornanteils beim Einbau zusätzliche Anforderungen an den Luftporenanteil einzuhalten sind. Für SU/SU\*-Böden wurde der maximale Luftporenanteil für den Einbau in einer Größenordnung von 2,0 bis 5,4 % und für GU/GU\*-Böden in einer Größenordnung von 4,3 bis 7,6 % bestimmt.

Zur Abschätzung der für numerische Untersuchungen erforderlichen Saugspannungs-Wassergehalts-Beziehung lieferte die auf dem Gebiet der Geotechnik entwickelte Pedo-Transfer-Funktion nach Birle für die untersuchten gemischtkörnigen Böden gute Abschätzungen. Es hat sich zudem gezeigt, dass die untersuchten Pedo-Transfer-Funktionen aus dem Bereich der Bodenkunde für verdichtete gemischtkörnige Böden weniger zutreffend sind.

Es wurde im Versuch bestätigt, dass bei den untersuchten Böden eine Zunahme der Saugspannungen gleichbedeutend mit einer Verringerung der hydraulischen Leitfähigkeit ist. Im

gesättigten Zustand wurde demnach die maximale Durchlässigkeit festgestellt. Bei der Herstellung ausreichend gering durchlässiger Erdbaukörper aus Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen sollte daher auf der sicheren Seite liegend weiterhin der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert zur Beurteilung der ausreichend geringen Wasserdurchlässigkeit des Erdbaukörpers herangezogen werden.