



# KALIBRIERVERSUCHE AN „MIXED IN PLANT“-FLÜSSIGBÖDEN

## ZFSV-Einsatz wird immer beliebter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus,  
Leibniz Universität Hannover

Das Forschungsvorhaben wurde durch die Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB) gefördert und durch die Mitglieder der Betreuungsgruppe „Flüssigboden“ fachlich unterstützt.

**Sonderdruck aus THIS**  
Ausgabe 5/2019

Bauverlag BV GmbH  
Avenwedder Str. 55, 33311 Gütersloh  
[www.bauverlag.de](http://www.bauverlag.de)



Quelle: Universität Hannover

Mit Flüssigboden verfülltes Testfeld 1.

# Kalibrierversuche an „mixed in plant“-Flüssigböden

## ZFSV-Einsatz wird immer beliebter

Das Verfüllen von Leitungsgräben wird im Tiefbau vermehrt durch Flüssigböden beziehungsweise ZFSV durchgeführt. Dieses Material soll für eine ebene Einbettung sorgen.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus,  
Leibniz Universität Hannover

### 1 Einleitung

Bei der Anwendung von zeitweise fließfähigen und selbstverdichtenden Verfüllmaterialien (ZFSV, im Folgenden vereinfacht als „Flüssigböden“ bezeichnet) unterhalb von Verkehrsflächen wird in der Regel – in Anlehnung an die Anforderungen für herkömmliche Verfüllmaterialien – ein Mindest-Verformungsmodul  $E_{v2}$  aus dem statischen Plattendruckversuch von 45 MPa gefordert. Dieser Wert muss gemäß ZTV E-StB [1] vorhanden bzw. überschritten sein, bevor mit dem Aufbau von Frostschutz- und Tragschichten begonnen werden kann. Statt mit dem relativ aufwendigen statischen Plattendruckversuch kann der Nachweis

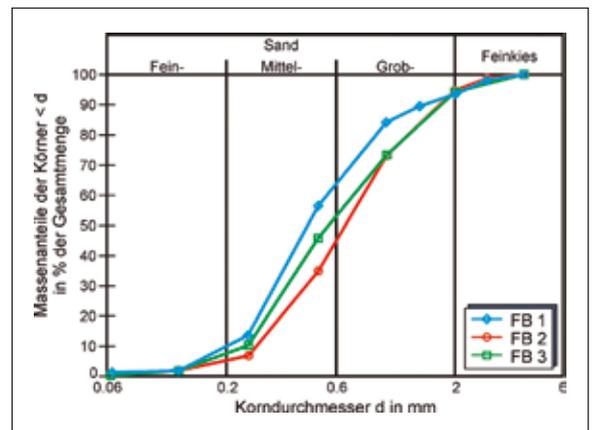


Abbildung 1: Körnungslinien der für die Flüssigböden verwendeten Sande.

Quelle: Universität Hannover

auch mit dem dynamischen Plattendruckversuch erfolgen, wenn abgesicherte Korrelationen zwischen  $E_{v2}$  und dem aus dem dynamischen Plattendruckversuch resultierenden Wert  $E_{vd}$  vorliegen. Für Flüssigböden liegen solche Korrelationen bisher jedoch nicht vor. Zu berücksichtigen ist auch, dass Flüssigböden eine zeitabhängige Steifigkeitszunahme aufweisen. Von besonderem baupraktischem Interesse ist die Frage, ab welchem  $E_{vd}$ -Wert für einen bestimmten Flüssigboden von einem Verformungsmodul  $E_{v2} \geq 45$  MPa ausgegangen werden kann.

Das Institut für Geotechnik der Leibniz Universität Hannover (LUH) hat deshalb im Auftrag der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB) im Rahmen des Projekts „Durchführung von Kalibrierversuchen an Flüssigböden“ entsprechende Untersuchungen ausgeführt [2]. Untersucht wurden drei „Mixed in Plant“-Flüssigböden, welche unter Verwendung von Sand als Gesteinskörnung hergestellt wurden. Diese drei Flüssigböden wurden in Versuchsfeldern in Höver bei Hannover eingebaut und zu verschiedenen Zeitpunkten nach Herstellung (18 Stunden bis 56 Tage) in situ sowie im Labor untersucht.

In situ wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten jeweils statische und dynamische Plattendruckversuche durchgeführt. Zusätzlich wurden in Laborversuchen die Festigkeits- und Scherparameter in Abhängigkeit von der Zeit nach der Herstellung gemessen.

Der vorliegende Aufsatz fasst die Ergebnisse der durchgeführten Kalibrierversuche zusammen. Vom Erd- und Grundbaulabor der Hochschule Koblenz wurden ergänzend Versuche zum Auszieh Widerstand von Verankerungskörpern und dessen zeitlicher Entwicklung durchgeführt. Über die Ergebnisse dieser Versuche wird an anderer Stelle berichtet werden.

## 2 Untersuchungsprogramm

### 2.1 Ausgangspunkt

In einem vorhergehenden Vorhaben [3] waren für einen „Mixed in Plant“- und einen „Mixed in Place“-Flüssigboden Korrelationen des  $E_{v2}$ -Wertes aus dem statischen Plattendruckversuch mit den Messgrößen aus leichten Rammsondierungen, CBR-Versuchen und dynamischen Plattendruckversuchen untersucht worden. Es zeigte sich, dass nicht nur die Messgrößen (d.h. Steifigkeit bzw. Festigkeit des Flüssigbodens), sondern auch die jeweiligen Umrechnungsfaktoren zeitabhängig und materialspezifisch sind. Für das mixed in plant-Material war es dennoch möglich, in Anlehnung an TP-BF-StB E4 [4] zeitunabhängige Korrelationsgleichungen mit ausreichendem Bestimmtheitsmaß abzuleiten. Für den Zusammenhang zwischen  $E_{v2}$ - und  $E_{vd}$ -Wert ergab sich folgende Kalibrierfunktion:

$$E_{v2} = 1,5 \times E_{vd} + 51 \text{ bzw. } E_{vd} = 0,67 \times E_{v2} - 34,75 \quad (1)$$

Diese Funktion wurde an Versuchen kalibriert, in denen ein  $E_{vd}$ -Wert von minimal 4 MPa gemessen wurde

Material	Einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen $q_{u,28}$		$f_z$ -Wert	
	Messwert (kN/m <sup>2</sup> )	Wiederaushubfähigkeit nach [5]	Messwert ( $(q_{u,56}-q_{u,7})/\log(56/7)$ ) (kN/m <sup>2</sup> )	Wiederaushubfähigkeit nach [5]
FB1	538,4	mittel	564	schwer
FB2	132,2	leicht	105	leicht
FB3	258,6	leicht	158	mittel

und ist in der Anwendbarkeit entsprechend begrenzt. Zu bedenken ist aber, dass für den minimalen  $E_{vd}$ -Wert von 4 MPa bereits ein  $E_{v2}$ -Wert  $> 70$  MPa ermittelt wurde.

Dieses Ergebnis war der Ausgangspunkt für das hier beschriebene Vorhaben, in dem drei weitere „Mixed in Plant“-Flüssigböden von unterschiedlichen Herstellern untersucht wurden.

### 2.2 Materialien

Es wurden drei „Mixed in Plant“-Flüssigböden (FB1, FB2, FB3) untersucht, für welche als Gesteinskörnung jeweils Sand verwendet wurde. Die in Abbildung 1 dargestellten Körnungslinien zeigen, dass es sich jeweils um enggestufte Sande handelte, welche in den Grob- und Feinsandanteilen nur geringfügig variierten.

Die Sande wurden jeweils mit Zement, Wasser und einem herstellereigenen „Compound“ vermischt. In der ZFSV-Richtlinie der FGSV [5] sind Grenzwerte für die einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen  $q_{u,28}$  sowie für den die zeitliche Festigkeitsentwicklung beschreibenden  $f_z$ -Wert angegeben, nach denen ein Flüssigboden als leicht, mittel oder schwer wiederaushubfähig eingeordnet wird. In Tabelle 1 sind die für die drei untersuchten Flüssigböden erhaltenen Werte angegeben.

Insgesamt waren gemäß den Kriterien in [5] für die einaxiale Druckfestigkeit nach 28 Tagen die Materialien FB2 und FB3 als „leicht wiederaushubfähig“ und das Material FB1 als „mittel wiederaushubfähig“ einzustufen. Das  $f_z$ -Kriterium führt für das Material FB1 dagegen zu einer Einstufung als „schwer“ und für das Material FB3 als „mittel wiederaushubfähig“.

### 2.3 Felduntersuchungen

Auf einem Testfeld in Höver bei Hannover wurden im Herbst 2016 insgesamt drei Baugruben mit einer Breite von rund drei Metern auf einer Länge von rund 14 Meter bei einer Tiefe von rund 0,8 Meter hergestellt. Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein Lichtbild von dem mit dem Flüssigboden FB 1 verfüllten Testfeld 1. Die Ansatzpunkte der späteren statischen und dynamischen Plattendruckversuche sind durch farbige Markierungen zu erkennen.

Pro untersuchtem Material wurden jeweils drei dynamische und drei statische Plattendruckversuche pro Messzeitpunkt durchgeführt. Planmäßig sollten Plattendruckversuche jeweils nach 18 Stunden (0,75 Tage) sowie nach 1, 2, 3, 6, 7 und 28 Tagen ausgeführt werden. Für die Materialien FB2 und FB3 waren allerdings statische Plattendruckversuche wegen anfänglich zu geringer Steifigkeit erst frühestens nach sechs Tagen möglich, weshalb eine zusätzliche Messung nach 14 Tagen realisiert wurde.

Zu einigen Zeitpunkten konnten überdies wegen ungünstiger Witterungsverhältnisse (starke Niederschläge, dadurch zum Teil aufgestautes Wasser auf der Versuchsfläche) keine Versuche bzw. weniger als drei Teilversuche stattfinden.

### 2.4 Laboruntersuchungen

Ergänzend zu den Feldversuchen wurden im Labor zwecks ergänzender Charakterisierung der Flüssigböden direkte Scherversuche und einaxiale Druckversuche durchgeführt. Dafür wurde jeweils an dem Einbautag der

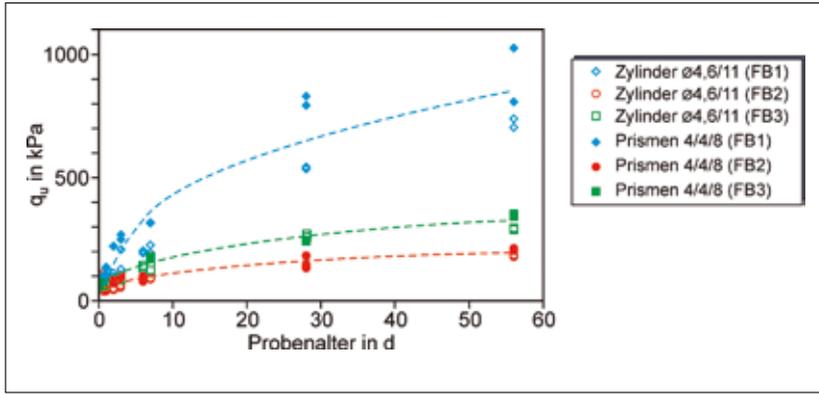


Abbildung 3: In den Laborversuchen ermittelte einaxiale Druckfestigkeiten.

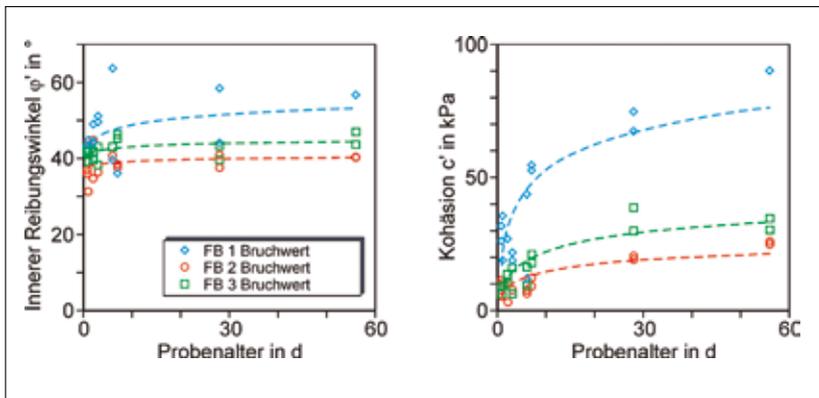


Abbildung 4: In den Laborversuchen ermittelte Scherparameter im Bruchzustand.

Flüssigböden in die Testfelder eine entsprechende Anzahl von ungestörten zylindrischen Sonderproben entnommen und ins bodenmechanische Labor überführt. Dort wurden die Proben bei rund 20 Grad Celsius Raumtemperatur bei hoher Luftfeuchtigkeit bis zum Versuchsbeginn gelagert. Zum jeweiligen Zeitpunkt der Laborversuche wurden die Proben aus den Zylindern ausgepresst und möglichst ungestört in das jeweilige Versuchsgerät überführt.

Die direkten Scherversuche wurden in Geräten mit 40 Quadratzentimeter großer Prüffläche mit Auflastspannungen von 20, 40 und 60 kPa durchgeführt. Die einaxialen Druckversuche wurden standardmäßig an Zylindern mit 4,6 Zentimeter Durchmesser und elf Zentimeter Höhe ausgeführt. Zum Vergleich wurden zudem Versuche an Prismen mit einer Grundfläche von vier mal vier Zentimeter und einer Höhe von acht Zentimeter durchgeführt.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Einaxiale Druckversuche und Scherversuche

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse aller durchgeführten einaxialen Druckversuche als einaxiale Druckfestigkeit über Probenalter aufgetragen. Es ist erkennbar, dass die untersuchten Flüssigböden hinsichtlich der Festigkeit eine relativ große Parameterbandbreite widerspiegeln. Die an Prismen 4 x 4 x 8 Zentimeter ermittelten Festigkeiten sind nennenswert höher als die an zylindrischen Proben Ø 4,6 Zentimeter, Höhe 11 Zentimeter.

Das Ergebnis eines direkten Scherversuchs sind die effektiven Scherparameter innerer Reibungswinkel  $\phi'$  und Kohäsion  $c'$ , welche vorliegend mittels einer Ausgleichsgerade aus den bei Normalspannungen von 20, 40 und 60 kPa ermittelten maximalen (Bruch-) Scherspannungen abgeleitet wurden. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse wiedergegeben. Bei den inneren Reibungswinkeln

(Abb. 4 links) zeigt sich nur in den ersten Tagen nach Probenherstellung eine vergleichsweise geringfügige Zunahme.

Nach 28 Tagen weist FB2 einen inneren Reibungswinkel von ca. 40 Grad (was größenordnungsmäßig etwa einem sehr dicht gelagerten Sand entspricht), FB 3 von etwa 44 Grad, und FB1 sogar von größer 55 Grad auf.

Die Festigkeitszunahme mit der Zeit ist im Wesentlichen auf die Zunahme der effektiven Kohäsion zurückzuführen (Abb. 4 rechts).

#### 3.2 Plattendruckversuche

Die Ergebnisse der durchgeführten statischen und dynamischen Plattendruckversuche sind in Abbildung 5 in Abhängigkeit vom Versuchszeitpunkt (bzw. dem „Alter“ des Flüssigbodens) dargestellt, wobei für die gegebenen Trendlinien offensichtliche „Ausreißer“ (eingeklammerte Punkte) nicht berücksichtigt wurden.

Der zu erwartende Trend hinsichtlich einer zunehmenden Steifigkeit der Materialien mit der Zeit wurde bestätigt, wobei insbesondere für das relativ steife Material FB1 erhebliche Streuungen festzustellen sind. Für die statischen Versuche ist festzustellen, dass die aufgezeichneten Werte alle oberhalb der in der ZTV E-StB festgelegten Grenze von  $E_{v2}=45$  MPa liegen.

FB1 erreicht den geforderten Wert schon bei der ersten Prüfung. Die beiden anderen Materialien erreichen ihn innerhalb der ersten Tage, wobei der genaue Zeitpunkt nicht festgestellt werden konnte, da der Wert schon bei der ersten möglichen Prüfung überschritten wurde. Innerhalb der ersten drei Tage konnte jeweils keine Prüfung stattfinden, weil die maximal zulässige Setzung überschritten wurde. Der nächste Versuch konnte danach erst an den Tagen sechs beziehungsweise sieben erfolgen.

Ein Erreichen der erforderlichen 45 MPa für  $E_{v2}$  hat somit in diesem Zeitfenster stattgefunden. Um dies darzustellen, ist in der Abbildung ein tendenzieller Verlauf in Form einer vereinfachten strichpunktierter Gerade eingezeichnet. In Abbildung 6 ist in Abhängigkeit vom Probenalter bzw. Messzeitpunkt der ermittelte Verhältniszwert  $E_{vd}/E_{v2}$  für alle Versuche, bei denen sowohl statische als auch dynamische Plattendruckversuche durchgeführt wurden, dargestellt. Der Verhältniszwert nimmt tendenziell mit der Zeit ab.

Sehr deutlich wird, dass die Verhältniszwerte sich für die verschiedenen Materialien stark unterscheiden und damit offensichtlich von der genauen Zusammensetzung eines Flüssigbodens abhängen.

In Abbildung 7 sind die Wertepaare  $E_{v2}$  und  $E_{vd}$  in einer Grafik aufgetragen. Jeder Punkt in dieser Grafik entspricht einem bestimmten Messzeitpunkt, welcher aber hier nicht berücksichtigt wird. Ebenfalls eingetragen sind die in den Voruntersuchungen [3] (vgl. Gl. 1) mit einem vierten Flüssigbodenmaterial ermittelten Werte. Es zeigt sich – entsprechend der aus Abb. 6 hervorgehenden starken Variabilität der Verhältnisz-

Quelle: Universität Hannover

Quelle: Universität Hannover

Quelle: Universität Hannover

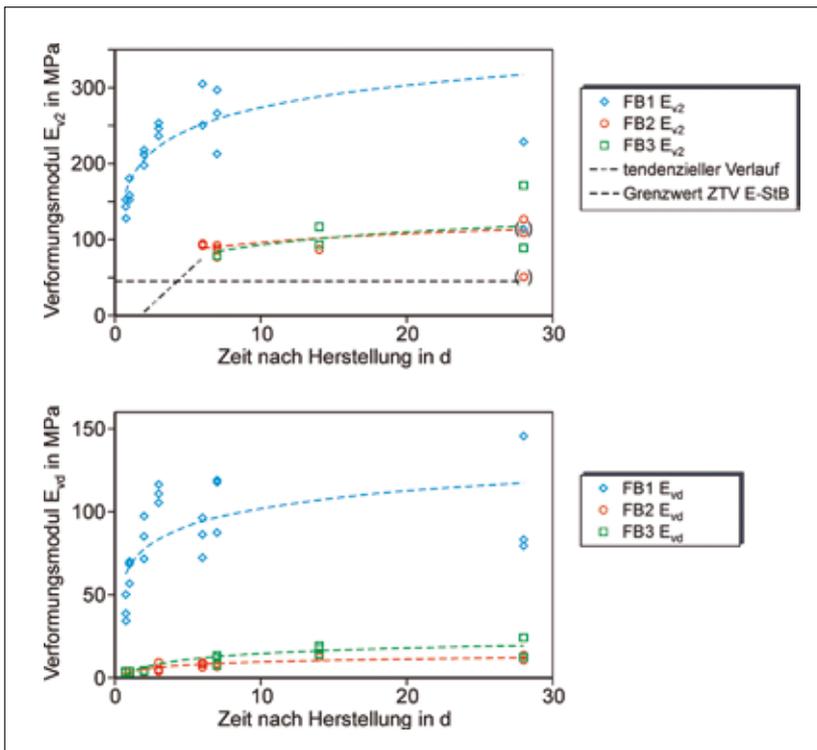
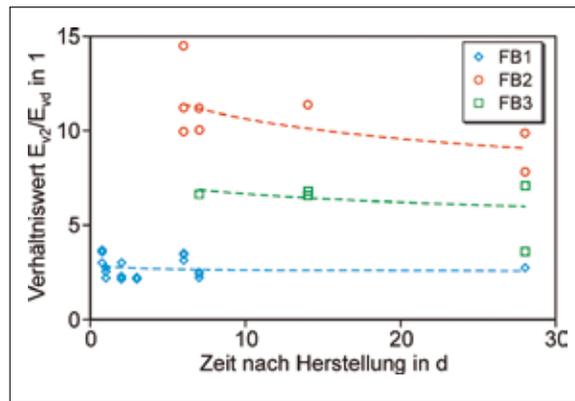


Abbildung 5: Ergebnisse der statischen (oben) und der dynamischen (unten) Plattendruckversuche.



Quelle: Universität Hannover

Abbildung 6: Verhältniswert  $E_{v2}/E_{vd}$  abhängig von der Zeit nach Flüssigbodenherstellung.

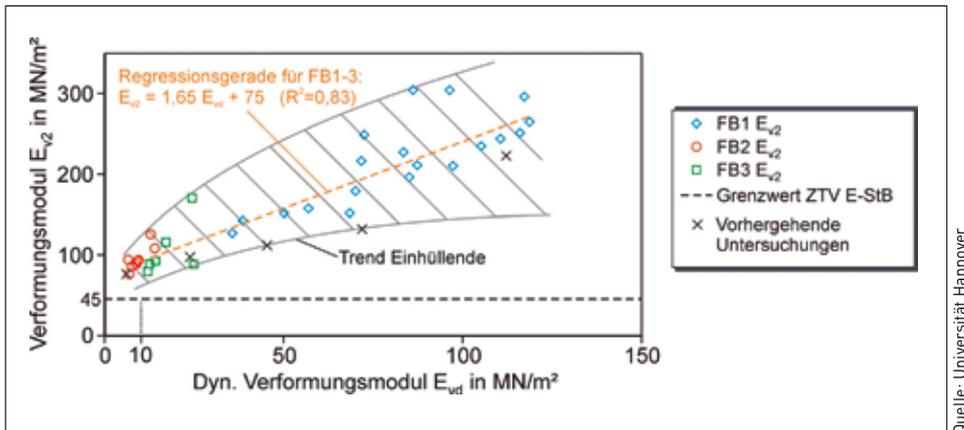


Abbildung 7: Abhängigkeit des statischen vom dynamischen Verformungsmodul.

werte  $E_{v2}/E_{vd}$  – eine nicht unerhebliche Schwankungsbreite der Ergebnisse. Je nach Flüssigbodenmaterial kann zum Beispiel ein dynamisches Verformungsmodul  $E_{vd}$  von 70 MPa einem statischen Verformungsmodul  $E_{v2}$  von etwa 130 bis 250 MPa entsprechen. Unterstellt man einen linearen Zusammenhang zwischen  $E_{v2}$  und  $E_{vd}$ , so ergibt sich aus den Versuchen mit den Materialien FB1, FB2 und FB3 folgende Ausgleichsgerade:

$$E_{v2} = 1,65 \times E_{vd} + 75 \quad \text{bzw.} \quad E_{vd} = 0,61 \times E_{v2} - 45 \quad (2)$$

Hierin sind die Verformungsmodulen in MPa einzusetzen. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,83 ( $>0,65$ ) entspricht diese Gleichung gemäß [4] einer zulässigen Regression. Hinsichtlich eines für einen  $E_{v2}$ -Wert von 45 MPa mindestens erforderlichen  $E_{vd}$ -Wertes ergibt sich hieraus aber wegen der relativ großen Streuung keine verwertbare Aussage, da rechnerisch für  $E_{vd} = 0$  bereits ein  $E_{v2}$ -Wert von 75 MPa vorliegt. Nur für das Material FB2 und für das in den Voruntersuchungen untersuchte Flüssigbodenmaterial wurden überhaupt  $E_{vd}$ -Werte kleiner 10 MPa gemessen. Die Anwendung von Gleichung (2) sollte daher auf  $E_{vd} > 10$  MPa begrenzt werden.

Dennoch lässt sich aus Abb. 7 eine für die Praxis wichtige Schlussfolgerung ziehen. Konstruiert man Trendlinien für die Umhüllenden aller Messpunkte (wie in Abb. 7 eingezeichnet), so wird deutlich, dass für alle untersuchten Materialien gilt, dass ein  $E_{v2}$ -Wert von 45 MPa bei einem  $E_{vd}$ -Wert kleiner (ggf. deutlich kleiner) als 10 MPa erreicht wird. Diese Schlussfolgerung basiert lediglich für das Material FB1 auf einer Extrapolation.

Damit erscheint die Hypothese gerechtfertigt, dass dies generell für „Mixed in Plant“-Flüssigböden mit Sand als Gesteinskörnung zutrifft.

#### 4 Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieses Projektes wurden drei unterschiedliche „Mixed in Plant“-Flüssigböden mit Sand als Gesteinskörnung in Labor- und Feldversuchen bezüglich verschiedener Parameter untersucht. Die Ausführung sowohl statischer als auch dynamischer Plattendruckversuche zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Einbau der Flüssigböden ermöglichte die Aufstellung einer Korrelationsgleichung für die Ergebnisgrößen  $E_{v2}$  und  $E_{vd}$ . Die ausgewerteten Ergebnisse lassen für diese Flüssigböden den Schluss zu, dass für den dynamischen Plattendruckversuch

ein Wert von  $E_{vd} > 10$  MPa ausreichend ist, um den geforderten Grenzwert von  $E_{v2} = 45$  MPa des statischen Plattendruckversuchs zu erreichen bzw. zu übersteigen. Es ist davon auszugehen, dass dies auch für andere, mit Sand hergestellte „Mixed in Plant“-Flüssigböden gilt. Das Kriterium ist praxistauglich und stellt einen Zusammenhang zwischen dem statischen und dem dynamischen Plattendruckversuch her.

Der Ansatz kann allerdings durchaus je nach Flüssigboden sehr konservativ sein und dient in erster Linie der ersten Abschätzung des Zusammenhangs zwischen beiden Versuchsmethoden. Weitere Untersuchungen bezüglich der Einschätzung von verschiedenen Flüssigböden könnten zu teilweise deutlichen Verbesserungen des Ansatzes und damit ggf. zu wirtschaftlicheren Ergebnissen führen.

Institut für Geotechnik, Leibniz Universität Hannover  
[www.igth.uni-hannover.de](http://www.igth.uni-hannover.de)

#### Referenzen

- [1] ZTV E-StB 09: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen im Straßenbau. Bundesministerium für Verkehr. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, Ausgabe 2009.
- [2] Institut für Geotechnik der Leibniz Universität Hannover & Erd- und Grundbaulabor der Hochschule Koblenz: Zusammenfassender Bericht „Durchführung von Kalibrierversuchen an Flüssigböden“ im Auftrag der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB), 13.02.2018.
- [3] Institut für Geotechnik der Leibniz Universität Hannover: Bericht „Durchführung von Kalibrierversuchen an Flüssigböden“ im Auftrag von AGFW, BQF, Dornburger Zement und FTB, April 2015.
- [4] TP BF-StB – Teil E4: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau, Teil E4: Kalibrierung eines indirekten Prüfmerkmals mit einem direkten Prüfmerkmal. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, Ausgabe 2003.
- [5] Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau (H ZFSV). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Köln, Ausgabe 2012. □