



HOCHSCHULE  
KOBLENZ  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

**IGtH**  
Institut für Geotechnik

# **„Durchführung von Kalibrierversuchen an Flüssigböden“**

## **Zusammenfassender Bericht**

**zum Auftrag der Forschungsgemeinschaft  
Transportbeton e.V. (FTB) vom 20.07.2016**

**Hannover/Koblenz, 20.02.2018**

Leibniz Universität Hannover, Institut für Geotechnik (IGtH),  
Appelstr. 9A, 30167 Hannover, <http://www.igth.uni-hannover.de>  
Tel.: 0511 – 762 3370, Fax: 0511 – 762 5105, E-Mail: [info@igth.uni-hannover.de](mailto:info@igth.uni-hannover.de)

Hochschule Koblenz, Erd- und Grundbaulabor,  
Konrad-Zuse-Straße 1, 56075 Koblenz, [http:// www.hs-koblenz.de/bauingenieurwesen](http://www.hs-koblenz.de/bauingenieurwesen)  
Tel.: 0261 – 9528 626, Fax: 0261 – 9528 648, E-Mail: [quarg@hs-koblenz.de](mailto:quarg@hs-koblenz.de)

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis .....	I
Anlagenverzeichnis.....	I
1. Darstellung des Projekts .....	2
2. Ergebnisse Institut für Geotechnik (Leibniz Universität Hannover) .....	3
3. Ergebnisse Erd- und Grundbaulabor (Hochschule Koblenz).....	4
4. Fazit und Ausblick .....	5

## Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Bericht Leibniz Universität Hannover

Anlage 2: Bericht Hochschule Koblenz



## **Zusammenfassender Bericht zum Projekt „Durchführung von Kalibrierversuchen an Flüssigböden“**

### **1. Darstellung des Projekts**

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 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 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  $E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$  ausgegangen werden kann. Zusätzlich stellt sich die Frage, ob die ausreichende Tragfähigkeit des Flüssigbodens auch mittels spezieller in situ-Pfahlzugversuche beurteilt werden kann.

Das Institut für Geotechnik der Leibniz Universität Hannover (LUH) und das Erd- und Grundbaulabor der Hochschule Koblenz (HK) wurden deshalb von der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB) im Rahmen des Projekts „Durchführung von Kalibrierversuchen an Flüssigböden“ mit entsprechenden Untersuchungen beauftragt.

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 h bis 56 d) in situ sowie im Labor untersucht:

- Vom Institut für Geotechnik der LUH wurden in situ 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.
- Vom Erd- und Grundbaulabor der HK wurden ergänzend Versuche zum Auszieh Widerstand von Verankerungskörpern und dessen zeitlicher Entwicklung durchgeführt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Einzelberichten des Instituts für Geotechnik der LUH (Anlage 1) und des Erd- und Grundbaulabors der HK (Anlage 2) ausführlich dargestellt und ausgewertet.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der jeweiligen Einzelberichte kurz zusammen (Abschnitte 2 und 3) und zieht ein gemeinsames Fazit (Abschnitt 4).

## 2. Ergebnisse Institut für Geotechnik (Leibniz Universität Hannover)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vom Institut für Geotechnik (IGtH) der LUH durchgeführten Feld- und Laborversuche zusammenfassend dargestellt. Eine genaue Beschreibung der Versuche sowie eine ausführliche Auswertung der Ergebnisse sind dem Bericht des IGtH (Anlage 1) zu entnehmen.

In den Feldversuchen wurden  $E_{v2}$ - und  $E_{vd}$ -Werte mittels statischer und dynamischer Plattendruckversuche ermittelt. In den begleitenden Laborversuchen wurden außerdem mittels direkter Scherversuche die dränierten Scherparameter  $\varphi'$  und  $c'$  sowie mittels einaxialer Druckversuche die undränierte Scherfestigkeit  $c_u$  bzw. die Druckfestigkeit  $\sigma_{max}$  ermittelt. Als Ergebnis der Untersuchungen liegen damit für die drei untersuchten Flüssigböden Zeitverläufe von Steifigkeits- und Festigkeitsparametern vor.

Um die Beziehungen verschiedener Parameter zueinander zu untersuchen, wurden Korrelationsanalysen durchgeführt. Für die Beziehung zwischen Steifigkeits- und Festigkeitswerten konnte aus den Ergebnissen kein eindeutiger Zusammenhang ermittelt werden. Allerdings konnte in der Korrelationsanalyse für die untersuchten Flüssigböden eine vereinfachte Abschätzung für den Zusammenhang zwischen statischem ( $E_{v2}$ ) und dynamischem ( $E_{vd}$ ) Plattendruckversuch herausgearbeitet werden.

Eine Abschätzung des  $E_{v2}$ -Wertes abhängig vom  $E_{vd}$ -Wert ist über folgende Gleichung möglich:

$$E_{v2} = 1,65 \cdot E_{vd} + 75,11 \quad \text{für } E_{vd} \geq 10 \text{ MPa}$$

Die Gleichung wurde mittels linearer Regressionsberechnung aus den Ergebniswerten für alle drei untersuchten Flüssigböden ermittelt. Die Regressionsgerade ist mit einem Bestimmtheitsmaß von etwa  $R^2 = 0,835$  gemäß den Anforderungen nach TP BF-StB<sup>1</sup> mit  $R^2 > 0,65$  als zulässig zu bewerten.

Da es bei den Versuchen unter anderem durch äußere Einflüsse zu recht großen Ergebnisstreuungen gekommen ist, ist die Regressionsgerade allerdings als Näherung zu betrachten. Der Vertrauensbereich, welcher durch die Einbeziehung der Standardabweichung gebildet wurde, wird durch die folgenden beiden Gleichungen begrenzt:

$$E_{v2+S} = 1,65 \cdot E_{vd} + 114,38 \quad \text{für } E_{vd} \geq 10 \text{ MPa}$$

$$E_{v2-S} = 1,65 \cdot E_{vd} + 35,84 \quad \text{für } E_{vd} \geq 10 \text{ MPa}$$

Desweiteren ist zu beachten, dass die Regressionsgerade sowie der angegebene Wertebereich erst ab einem  $E_{vd} = 10 \text{ MPa}$  gültig sind, da über den Bereich  $E_{vd} < 10 \text{ MPa}$  keine abgesicherten Aussagen getroffen werden können.

Für die untersuchten Flüssigböden konnte allerdings trotzdem herausgearbeitet werden, dass bei einem Wert von  $E_{vd} \geq 10 \text{ MPa}$  mit dem Überschreiten der entsprechenden Grenze von  $E_{v2} = 45 \text{ MPa}$  gerechnet werden kann. Dies stellt für die Praxis ein gut handhabbares Kriterium für die Beurteilung des Flüssigbodens hinsichtlich des geforderten Grenzwertes dar.

### 3. Ergebnisse Erd- und Grundbaulabor (Hochschule Koblenz)

Nachfolgend werden die Ergebnisse der ergänzenden Untersuchungen der Hochschule Koblenz kurz zusammengefasst. Eine ausführliche Beschreibung der Feldversuche und deren Auswertung sind Gegenstand des Berichts des Erd- und Grundbaulabors der HK (Anlage 2).

Im Rahmen der Feldversuche wurde der Herauszieh Widerstand von Verankerungskörpern gemessen. Hierzu wurden Schraubpfähle in die eingebauten Verfüllmaterialien eingedreht und anschließend bis zum Bruch auf Herausziehen belastet. Ergänzt wurden diese Untersuchungen durch Messungen an kleinmaßstäblichen Einschraubdübeln, die in Proben des frischen, fließfähigen Materials eingebracht wurden.

Die Ergebnisse der Herausziehversuche wurden den Werten der undrännierten Scherfestigkeit  $c_u$ , die im Rahmen der begleitenden Laborversuche vom Institut für Geotechnik (IGtH) der LUH ermittelt wurden, gegenübergestellt. Der Abgleich der Ergebnisse zeigt eine unmittelbare, nur von der Pfahlgeometrie abhängige Proportionalität, die aufzeigt, dass die Zugpfahlversuche grundsätzlich geeignet sind, die Scherfestigkeit des zu untersuchenden Materials zu bestimmen.

---

<sup>1</sup> Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau (TP BF-StB) – Teil E 4: Kalibrierung eines indirekten Prüfmerkmals mit einem direkten Prüfmerkmal. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.), Ausgabe 2003, Köln.

In weiteren Auswertungen wurden der zeitliche Verlauf der Festigkeitsentwicklung sowie die möglichen Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Herausziehversuche und den Werten der statischen sowie der dynamischen Lastplattenversuche betrachtet.

Eine gemeinsame Betrachtung der Festigkeitsentwicklungen in den Laborversuchen und den Feldversuchen ergibt ein plausibles Gesamtbild, wobei die Pfahlversuche im Feld vorwiegend die frühe und mittelfristige Festigkeitsentwicklung und die einaxialen Druckversuche im Labor die mittelfristige und längerfristige Festigkeitsentwicklung abbilden.

Unter Berücksichtigung materialabhängiger Faktoren kann eine Korrelation zwischen den Ergebnissen von Pfahlzugversuchen und dynamischer Lastplatte aufgezeigt werden. Eine Korrelation zu den Ergebnissen der statischen Lastplattenversuche ist aufgrund der geringen Anzahl parallel durchgeführter Versuche nicht möglich. Ursächlich hierfür waren insbesondere anfängliche Probleme bei der Durchführung von Pfahlversuchen an Material mit höheren Festigkeitswerten.

#### **4. Fazit und Ausblick**

Im Rahmen dieses Projektes wurden drei unterschiedliche Flüssigböden in Labor- und Feldversuchen bezüglich verschiedener Parameter untersucht.

Die ausgewerteten Ergebnisse lassen für diese Flüssigböden den Schluss zu, dass für den dynamischen Plattendruckversuch ein Wert von  $E_{vd} > 10 \text{ MN/m}^2$  ausreichend ist, um den geforderten Grenzwert von  $E_{v2} = 45 \text{ MPa}$  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; dies wäre aber zu verifizieren. 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.

Die zusätzlich durchgeführten Pfahlzugversuche haben ergeben, dass die Festigkeit eines Flüssigbodens grundsätzlich durch den Herausziehwiderstand eines Zugpfahles nachgewiesen werden kann. Eine Prognose für den Verfestigungsverlauf kann anhand weniger Versuche erstellt werden. Die Versuche zur Pfahltragfähigkeit zeigen außerdem einen direkten Zusammenhang zwischen dem Pfahlzugversuch und dem einaxialen Druckversuch, welcher materialunabhängig ist und eine Beurteilung der Festigkeitsentwicklung ( $f_z$ -Wert) zulässt. Für die Korrelation bezüglich des dynamischen Plattendruckversuchs wird ein materialabhängiger Faktor benötigt, welcher durch Kalibrierung an einem Pfahlzugversuch vor Ort bestimmt werden kann.

Generell wäre die Anwendung des  $E_{v2}$ - und hilfsweise des  $E_{vd}$ -Kriteriums in Frage zu stellen. Flüssigböden weisen eine von herkömmlichen Verfüllmaterialien abweichende Steifigkeitscharakteristik auf (große Steifigkeit bis zum Brechen der Bindungen, danach weicher). Der im statischen Plattendruck zwischen 30 und 70 % der Maximallast (in der Regel zwischen 150 und 350 kPa) ermittelte Modul ist deshalb gar nicht unbedingt repräsentativ. Es ist daher sinnvoll zu untersuchen, ob eine Beurteilung anhand anderer Steifigkeitskriterien oder anhand eines Festigkeitskriteriums für Flüssigböden zweckmäßiger ist.

Die Beurteilung der Wiederaushubfähigkeit von Flüssigböden erfolgt beispielsweise gemäß H-ZFSV anhand eines Festigkeitskriteriums. Ein weiteres Festigkeitskriterium für die Beurteilung der Überbaubarkeit erscheint in diesem Zusammenhang naheliegend und würde eine konsistente Güteüberwachung durch Kontrolle der Festigkeitsentwicklung ermöglichen.

# Anlage

## **Anlage 1: Bericht Leibniz Universität Hannover**

Durchführung von Kalibrierversuchen an Flüssigböden – Bericht. Institut für Geotechnik, Leibniz Universität Hannover, Oktober 2017, Hannover

## **Anlage 2: Bericht Hochschule Koblenz**

Durchführung ergänzender Untersuchungen zu den Kalibrierversuchen an Flüssigböden – Bericht. Erd- und Grundbaulabor, Hochschule Koblenz, Oktober 2017, Koblenz